

UCH - FC  
Q. Ambiental  
P227  
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA LAGUNA DE ACULEO Y  
ANÁLISIS DEL SEDIMENTO”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial  
de los requisitos para optar al Título de:

**Químico Ambiental**

**Lucero Alejandra Paredes Reyes**



Director de Seminario de Título: Ing. Mesenia Atenas  
Profesor Patrocinante: M. Cs. Ximena Molina

Noviembre de 2009  
Santiago – Chile



## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

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 candidata:

**LUCERO ALEJANDRA PAREDES REYES**

“ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA LAGUNA DE ACULEO Y ANÁLISIS DEL SEDIMENTO”

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

### COMISIÓN DE EVALUACIÓN

*Ing. Cívil Mesenia Atenas*  
**Director Seminario de Título**

M. Cs. Ximena Molina  
**Profesor Patrocinante**

M. Cs. Sylvia Copaja  
**Corrector**

*Dr. Mauricio Isaacs*  
**Corrector**



Santiago de Chile, Noviembre de 2009

## RESEÑA



Lucero Alejandra Paredes Reyes, comienza con sus estudios universitarios el año 2004, donde se incorpora a la Carrera Profesional Química Ambiental, en la Universidad de Chile. Al cuarto año cursado, para completar su Licenciatura en Ciencias Ambientales con mención en química, realiza su unidad de investigación en el Laboratorio de la Profesora Sylvia Copaja C., desarrollando el tema del “Estudio de la adsorción, desorción y degradación de Clorpirifos en suelos Mayulermo y Collipulli”, trabajo que se presenta en el Congreso Iberoamericano de Química: 75 años de la Sociedad Química del Perú XXIV Congreso Peruano de Química Cusco-Perú”. 2008.

Es en este laboratorio donde por dos semestres es ayudante de laboratorio de los cursos de Análisis Instrumental II y Química de Aguas, a cargo de la Profesora Sylvia Copaja, donde le permitió aprender experimentalmente la preparación de reactivos y uso de equipos cromatográficos.

A mediados del quinto y último año de carrera, ingresa al Departamento de Conservación y Protección de los Recursos Hídricos perteneciente a la Dirección General de Aguas, del Ministerio de Obras Públicas, donde desarrolla el tema de Seminario de Título.



***Dedicatoria***

*...A mi Familia...*



## Agradecimientos

Agradezco al Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, perteneciente a la Dirección General de Aguas, por permitirme desarrollar mi tema, apoyarme y resolver mis dudas, especialmente a Mónica Musalem, que siempre se dio el tiempo para escuchar y ayudar en todo lo que fue necesario.

A todo el equipo humano que trabaja en el Laboratorio Ambiental de la DGA, como a Cinthya Montecinos, Yania Ulloa, José Ortiz, Freddy Astudillo, Pablo y Karina, por facilitarme información, material de laboratorio necesario para analizar la parte experimental de mi seminario y por enseñarme a muestrear y participar en la campaña de monitoreo realizada en la Laguna de Aculeo. Muchas gracias.

A Verónica Rodríguez de CONAMA R.M, por entregarme información muy relevante para desarrollar mi tema.

A la profesora Sylvia Copaja, por los consejos, ayuda que siempre me brindó y por facilitarme su laboratorio para desarrollar los análisis de sedimentos.

A la Facultad de Ciencias, por acogerme y sentir que fue mi segundo hogar durante todos estos años, y por permitirme aprender y madurar como persona.

A mi familia, tanto a mis padres, hermanos, abuelos, tíos y primos, por darme su apoyo, comprensión durante estos 5 años, por soportar mi genio en días de pruebas, y por disfrutar las salidas familiares y que sin duda sin ellos, no podría haber conseguido todos estos logros. Muchas gracias por todo.

Y por último, a mis amigos y compañeros de Universidad, no tan sólo a los que ingresaron conmigo, sino a los que conocí dentro y fuera de mi carrera, que desde el primer día de clases sentí su apoyo, amistad y compañerismo. Por compartir días de estudio, relaxo y diversión. Por permitirme entrar en sus vidas y ellos en la mía.

## ÍNDICE DE CONTENIDO



Contenido	Página
<b>I. INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Marco Teórico.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Lagos y Lagunas.....	1
1.1.2 Relación Calidad del Agua y Trofia.....	3
1.1.3 Sedimentos.....	7
1.1.4 Interfaz Sedimento-Agua.....	8
<b>1.2 Descripción del Área de Estudio.....</b>	<b>11</b>
1.2.1 Antecedentes Generales de la Laguna de Aculeo.....	11
1.2.2 Ubicación Geográfica.....	12
1.2.3 Mofometría.....	14
1.2.4 Geomorfología.....	16
1.2.5 Hidrografía.....	17
1.2.6 Clima.....	17
1.2.7 Actividades Económicas.....	18
1.2.7.1 Actividad Agrícola y Ganadera.....	19
1.2.7.2 Actividad Forestal.....	20
1.2.7.3 Actividad Inmobiliaria y Residencial.....	20
1.2.7.4 Actividad Turística y Recreación.....	20
1.2.8 Flora y Fauna.....	21
1.2.8.1 Flora.....	21
1.2.8.2 Fauna.....	21
<b>1.3 Dirección General de Aguas y la Red Mínima de Control de Lagos.....</b>	<b>22</b>
<b>1.4 Calidad del Agua y Norma Chilena Oficial 1.333/78.....</b>	<b>23</b>
<b>1.5 Descripción del Problema.....</b>	<b>24</b>
<b>1.6 Hipótesis.....</b>	<b>25</b>



<b>1.7 Objetivos.....</b>	<b>25</b>
1.7.1 Objetivo General.....	25
1.7.2 Objetivos Específicos.....	26
<b>II. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1 Muestreo y Toma de Muestras.....</b>	<b>27</b>
2.1.1 Campaña de Muestreo.....	27
2.1.2 Toma de Muestras.....	28
2.1.2.1 Agua.....	28
2.1.2.2 Sedimentos.....	29
2.1.3 Determinación de las Variables a Estudiar.....	30
2.1.3.1 Variables en Aguas.....	30
2.1.3.2 Variables en Sedimentos.....	31
<b>2.2 Métodos de Calidad de Agua usados por DGA.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3 Métodos usados en Sedimentos.....</b>	<b>32</b>
2.3.1 Secado de Muestras.....	32
2.3.2 Almacenamiento de Muestras.....	33
2.3.3 Tamizado y Análisis de la Granulometría.....	34
2.3.4 Medición de pH y Conductividad Eléctrica.....	35
2.3.5 Determinación de Factor de Humedad (fh) y Porcentaje de Saturación (PS).....	36
2.3.6 Determinación de Materia Orgánica.....	38
2.3.7 Determinación de Fósforo.....	40
2.3.8 Determinación de Bicarbonato.....	42
2.3.9 Determinación de Sales Solubles.....	43
<b>2.4 Análisis de Datos de Calidad de Aguas.....</b>	<b>45</b>



<b>III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1 Calidad del Agua de la Laguna de Aculeo.....</b>	<b>46</b>
3.1.1 pH.....	46
3.1.2 Claridad.....	47
3.1.3 Temperatura.....	48
3.1.4 Conductividad Eléctrica.....	50
3.1.5 Oxígeno Disuelto.....	51
<b>3.2 Comportamiento de Variables en Perfil de Profundidad.....</b>	<b>52</b>
3.2.1 pH.....	52
3.2.2 Conductividad Eléctrica.....	55
3.2.3 Temperatura.....	59
3.2.4 Oxígeno Disuelto.....	63
3.2.5 Nitrato.....	66
3.2.6 Fosfato.....	69
3.2.7 Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	72
<b>3.3 Comportamiento anual de las variables en la Laguna de Aculeo.....</b>	<b>75</b>
<b>3.4 Caracterización de los Sedimentos.....</b>	<b>78</b>
3.4.1 Variables Fisicoquímicas.....	78
3.4.2 Granulometría.....	79
3.4.3 Macroelementos.....	80
3.4.3.1 Bicarbonato.....	80
3.4.3.2 Cationes Solubles.....	80
3.4.3.3 Aniones Solubles.....	81
3.4.3.4 Fósforo Disponible (Fosfato).....	82
<b>3.5 Análisis Relación Agua-Sedimento.....</b>	<b>83</b>

IV. DISCUSIÓN GENERAL .....	87
V. CONCLUSIONES.....	97
VI. REFERENCIAS.....	99
VII. ANEXOS.....	104
Anexo I. Ejemplos de cálculo.....	105
Anexo II. Tablas.....	112
Anexo III. Gráficos.....	120



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condición Trófica de lagos y relación con la calidad del agua (Parra, 1989)...	5
Tabla 2. Datos Morfométricos de la Laguna de Aculeo.....	14
Tabla 3. Estaciones de monitoreo de la Laguna de Aculeo, coordenadas y códigos BNA. (Fuente: Musalem, M. 2006).....	22
Tabla 4. Características de cada punto de muestreo en la Laguna de Aculeo.....	28
Tabla 5. Métodos de las variables fisicoquímicas determinadas por el Laboratorio Ambiental de la DGA.....	32
Tabla 6. Disponibilidad de datos de los monitoreos estaciones realizados por DGA en la Laguna de Aculeo.....	45
Tabla 7. Temperaturas superficiales promedio por estación del año, en los tres puntos de muestreo en la Laguna.....	49
Tabla 8. Variación anual de las variables para el año 2008 en Sector Desagüe.....	75
Tabla 9. Variación anual de las variables para el año 2008 en Frente Puntilla el León.....	76
Tabla 10. Variación anual de las variables para el año 2008 en Casa de Bombas.....	76
Tabla 11. Variables fisicoquímicas, resultados de sedimentos.....	78
Tabla 12. Concentración de Bicarbonato en sedimentos de la Laguna de Aculeo.....	80
Tabla 13. Concentración de Fosfato en sedimentos de la Laguna de Aculeo.....	82
Tabla 14. Tabla comparativa de resultados obtenidos en agua y sedimentos en la Laguna de Aculeo. (a) Variables principales, (b) Macroelementos.....	83
Tabla 15. Explicación de cálculo de promedios acumulados.....	105
Tabla 16. Clasificación de suelos según pH (USDA).....	112
Tabla 17. Granulometría. Porcentajes y Masas obtenidas en tamizado.....	112
Tabla 18. Masas registradas para la obtención del Factor de Humedad.....	112
Tabla 19. Masas de sedimento usado para la determinación de materia orgánica....	112
Tabla 20. Volumen de $\text{FeSO}_4$ (mL) gastados y potencial (mV) registrados para las muestras. (Obtenidos de la primera derivada de la curva de titulación). Determinación de la materia orgánica.....	113

Tabla 21. Clasificación según materia orgánica (MO).....	113
Tabla 22. Absorbancias obtenidas en la curva de calibración con estándares de Fósforo.....	113
Tabla 23. Absorbancias obtenidas en las muestras. Determinación de fosforo.....	113
Tabla 24. Concentración de Fósforo ( $\text{mgL}^{-1}$ ) para cada muestra en el extracto.....	113
Tabla 25. Concentración de Fósforo ( $\text{mgKg}^{-1}$ ) para cada muestra en el extracto.....	114
Tabla 26. Masas obtenidas en las muestras. Determinación del porcentaje de Saturación.....	114
Tabla 27. Porcentaje de saturación obtenidos en las muestras de sedimentos.....	114
Tabla 28. Volumen (mL) de HCl 0,1 N gastados en la titulación de extracto de saturación en las muestras de sedimento. Determinación de Bicarbonato.....	114
Tabla 29. Concentración de $\text{HCO}_3^-$ ( $\text{meqL}^{-1}$ ) en muestras por cada estación.....	114
Tabla 30. Concentración de $\text{HCO}_3^-$ ( $\text{mgL}^{-1}$ ) en muestras por cada estación.....	114
Tabla 31. Concentración de $\text{HCO}_3^-$ ( $\text{mgKg}^{-1}$ ) en muestras por cada estación.....	115
Tabla 32. Áreas registradas de estándares en cationes solubles.....	115
Tabla 33. Cationes Solubles. Área de las bandas cromatográficas (HPLC), obtenidas en las muestras (extracto de saturación).....	115
Tabla 34. Concentraciones de cationes solubles ( $\text{mgL}^{-1}$ ), para cada muestra.....	115
Tabla 35. Concentraciones de cationes solubles ( $\text{mgKg}^{-1}$ ), para cada muestra.....	116
Tabla 36. Áreas registradas de estándares en aniones solubles.....	116
Tabla 37. Aniones solubles. Área de las bandas cromatográficas (HPLC), obtenidas en las muestras (extracto de saturación).....	116
Tabla 38. Concentraciones de aniones solubles ( $\text{mgL}^{-1}$ ), para cada muestra.....	117
Tabla 39. Concentraciones de aniones solubles ( $\text{mgKg}^{-1}$ ), para cada muestra.....	117
Tabla 40. Comparación de concentraciones de Metales pesados encontrados en Campaña de Monitoreo DGA, Verano 2008 en las tres estaciones de la Laguna de Aculeo, con la concentración permitida por la Norma Chile 1.333/78, Uso del agua en riego.....	118

Tabla 41. Comparación de concentraciones de Metales pesados encontrados en Campaña de Monitoreo DGA, Otoño 2008 en las tres estaciones de la Laguna de Aculeo, con la concentración permitida por la Norma Chile 1.333/78, Uso del agua en riego..... 118

Tabla 42. Comparación de concentraciones de Metales pesados encontrados en Campaña de Monitoreo DGA, Invierno 2008 en las tres estaciones de la Laguna de Aculeo, con la concentración permitida por la Norma Chile 1.333/78, Uso del agua en riego..... 119

Tabla 43. Comparación de concentraciones de Metales pesados encontrados en Campaña de Monitoreo DGA, Primavera 2008 en las tres estaciones de la Laguna de Aculeo, con la concentración permitida por la Norma Chile 1.333/78, Uso del agua en riego..... 119

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Balance de agua en un Lago.....	1
Figura 2. Clasificación de los lagos, (A) oligotrófico; (B) Eutrófico.....	4
Figura 3. Ubicación geográfica de la Laguna de Aculeo.....	13
Figura 4. Ubicación de los cerros que rodean a la Laguna de Aculeo.....	14
Figura 5. Batimetría de la Laguna de Aculeo.....	15
Figura 6. Precipitaciones Laguna de Aculeo, periodo 1989-2008. Fuente: Dirección General de Aguas, 2008.....	18
Figura 7. Ubicación Estaciones de muestreo DGA en Laguna de Aculeo. (Elaborado por CED, 2008).....	27
Figura 8. Promedios Acumulados de pH superficial en el tiempo. Comparación con NCh 1333 y entre estaciones.....	47
Figura 9. Promedios Acumulados de Claridad (medidos en profundidad Disco Secchi) en el tiempo. Comparación con NCh 1333 y entre estaciones.....	48
Figura 10. Promedios Acumulados de Temperatura superficial en el tiempo. Comparación con NCh 1333 y entre estaciones.....	49
Figura 11. Promedios Acumulados de Conductividad eléctrica superficial en el tiempo. Comparación con NCh 1333 y entre estaciones.....	50
Figura 12. Promedios Acumulados de Oxígeno Disuelto superficial en el tiempo. Comparación con NCh 1333 y entre estaciones.....	51
Figura 13. Perfil para profundidad de pH en el tiempo, Sector Desagüe.....	52
Figura 14. Perfil de profundidad de pH en el tiempo, Frente Puntilla el León.....	53
Figura 15. Perfil de profundidad de pH en el tiempo, Casa de Bombas.....	54
Figura 16. Perfil de profundidad para Conductividad Eléctrica en el tiempo, Sector Desagüe.....	55
Figura 17. Perfil de profundidad para Conductividad Eléctrica en el tiempo, Frente Puntilla el León.....	56
Figura 18. Perfil de profundidad para Conductividad Eléctrica en el tiempo, Casa de Bombas.....	57

Figura 19. Perfil de profundidad para Temperatura en el tiempo según estación del año, Sector Desagüe.....	59
Figura 20. Perfil de profundidad para Temperatura en el tiempo según estación del año, Frente Puntilla el León.....	61
Figura 21. Perfil de profundidad para Temperatura en el tiempo según estación del año, Casa de Bombas.....	62
Figura 22. Perfil de profundidad para Oxígeno Disuelto en el tiempo, Sector Desagüe.....	63
Figura 23. Perfil de profundidad para Oxígeno Disuelto en el tiempo, Frente Puntilla el León.....	64
Figura 24. Perfil de profundidad para Oxígeno Disuelto en el tiempo, Casa de Bombas.....	65
Figura 25. Perfil de profundidad para Nitrato en el tiempo, Sector Desagüe.....	66
Figura 26. Perfil de profundidad para Nitrato en el tiempo, Frente Puntilla el León.....	67
Figura 27. Perfil de profundidad para Nitrato en el tiempo, Casa de Bombas.....	68
Figura 28. Perfil de profundidad para Fosfato en el tiempo, Sector Desagüe.....	69
Figura 29. Perfil de profundidad para Fosfato en el tiempo, Frente Puntilla el León.....	70
Figura 30. Perfil de profundidad para Fosfato en el tiempo, Casa de Bombas.....	71
Figura 31. Perfil de profundidad para DQO en el tiempo, Sector Desagüe.....	72
Figura 32. Perfil de profundidad para DQO en el tiempo, Frente Puntilla el León.....	73
Figura 33. Perfil de profundidad para DQO en el tiempo, Casa de Bombas.....	74
Figura 34. Granulometría encontrada por estación de muestreo: (a) Sector Desagüe, (b) Frente Puntilla el León, (c) Casa de Bombas.....	79
Figura 35. Concentraciones de cationes solubles registradas en sedimentos de la Laguna de Aculeo.....	80
Figura 36. Concentraciones de aniones solubles registradas en sedimentos de la Laguna de Aculeo.....	81
Figura 37. Perfil de profundidad de pH en el tiempo, Sector Desagüe. Incluido el perfil más profundo.....	120

Figura 38. Perfil de profundidad de pH en el tiempo, en Casa de Bombas. Incluido el perfil más profundo.....	121
Figura 39. Perfil para profundidad de Oxígeno Disuelto en el tiempo, en Casa de Bombas. Incluido el perfil más profundo.....	122
Figura 40. Perfil de profundidad de Nitrato en el tiempo, Sector Desagüe. Incluido el perfil más profundo.....	122
Figura 41. Perfil de profundidad de Nitrato en el tiempo, en Casa de Bombas. Incluido el perfil más profundo.....	123

## RESUMEN

La Laguna de Aculeo es un cuerpo de agua natural, clasificada como una laguna eutrofizada, en la que se han informado muertes de peces y emanación de malos olores, lo que han producido un notable deterioro no tan solo en la calidad de sus aguas, sino en un deterioro ambiental de la cuenca (erosión, malas prácticas en las riberas, etc), debido a un aumento de la influencia antrópica, que se vio favorecida por las condiciones morfométricas de la cuenca. Los antecedentes expuestos anteriormente determinan una condición crítica de contaminación de las aguas en la laguna de Aculeo por lo que este estudio tuvo como objetivo, determinar la calidad del agua de la laguna de Aculeo mediante el análisis de datos históricos de 20 años y estudiar la influencia de los sedimentos sobre la columna de agua a través del análisis de las propiedades fisicoquímicas de los sedimentos de la laguna, sobre la base de los datos entregados por la Dirección General de Aguas (DGA) mediante análisis según metodología APHA. Las variables consideradas para el estudio de la calidad del agua fueron, el pH; Claridad, medida por disco Secchi; Conductividad eléctrica; Oxígeno disuelto; Temperatura, de las cuales se obtuvo, según la comparación con la Norma Referencial, Norma Chilena Oficial 1.333/78, que las aguas de la Laguna de Aculeo son aptas para los usos de regadío y vida acuática, aún siendo un cuerpo de agua eutrofizado, que contiene altas cantidades de nutrientes como nitratos y fosfatos. Sin embargo, con los registros obtenidos, las aguas de la laguna no son aptas para recreación con contacto directo. En relación con los resultados en sedimentos, se pudo observar que estos poseen una gran concentración de fosfato (con un máximo de  $3,148 \text{ mgL}^{-1}$ ), muy superior a la encontrada en las aguas ( $0,016 \text{ mgL}^{-1}$ ), además se pudo ver una diferencia notoria entre las estaciones muestreadas, para las variables de

nitrate, phosphate and Organic Matter (OM), these were found in greater quantities in the West and central of the Lagoon, coinciding with the use given to the banks surrounding the Lagoon, since in these zones the most developed activity is tourism, and agriculture, while in the East sector, (Sector Desagüe) only has some agricultural zones. In relation to the movement of nutrients between the sediment and water, it was found that the lagoon does not present thermal stratification, which favors that from the sediments the accumulated nitrate is released during periods of low turbulence of the waters, while the phosphate is found stored in the sediments and is not released during periods of circulation of the waters.

## ABSTRACT

Aculeo Lake is a natural water body classified as eutrophic, which has reported fish deaths and emanation of odors, which have resulted in a significant deterioration not only in the quality of water, but also in an integrated environmental degradation of the watershed (erosion, poor practices in the banks, etc.), due to increasing anthropogenic influence, which was favored by its morphometric conditions. The background outlined above identifies a critical condition of water pollution in the Aculeo lake. The aims of this study is to determine the water quality of Aculeo by analyzing 20 years of historical data and study the influence of sediments on the water column through the analysis of its physicochemical properties, the former based on data supplied by the Dirección General de Aguas (DGA) by analysis procedures according to APHA method. The variables considered for the study of water quality were pH, clarity - measured by Secchi disc- electrical conductivity, dissolved oxygen and temperature. Comparing this variables with the Standard Reference, Norma Chilena Oficial 1333/78, was obtained that the water of Aculeo Lake fits the purposes of irrigation and aquatic life, despite its eutrophic condition, which means it contains high amounts of nutrients such as nitrates and phosphates. However, with the records obtained, the lake's water is unsuitable for recreation with direct contact. Regarding the results in sediments, it was noted that these have a high concentration of phosphate (up to  $3,148 \text{ mgL}^{-1}$ ), much higher than that found in water ( $0,016 \text{ mgL}^{-1}$ ), it was perceived also a noticeable difference between the stations sampled for the variables of nitrate, phosphate and organic matter, these presented them selves in greater quantities in the central and west part of the lake, coinciding with the use given to the surrounding shores of the lake because in these

*areas are mostly tourism and agriculture activities, while the east part (Sector Desagüe)* has only a few agricultural areas. In relation to the movement of nutrients between sediments and water was found no thermal stratification in the lake, which means that the accumulated nitrate is released from the sediments in periods of low water turbulence, while the phosphate is stored in sediments and is not released during periods of water movement.

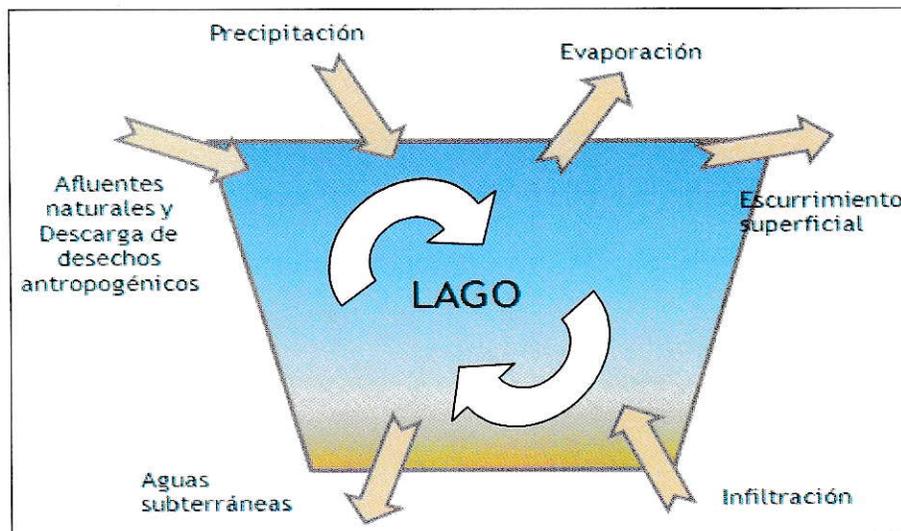
# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Marco Teórico

### 1.1.1 Lagos y Lagunas

Los lagos son cuerpos de agua dulce, que ocupan generalmente depresiones naturales, que se localizan principalmente en el centro de las cuencas de drenaje. Son sistemas dinámicos y sensibles a los cambios del clima local y al uso del suelo en los terrenos aledaños (Davison, 1988).

Las entradas y salidas de un lago son determinantes en su composición. Dentro de los principales factores que afectan la composición química y biológica de los lagos en relación con su cantidad y calidad, se encuentran: el clima, la vegetación terrestre, la morfología, las actividades económicas desarrolladas alrededor del cuerpo de agua, etc., aspectos que se muestran en la figura 1.



**Figura 1.** Balance de agua en un Lago.

Los aportes hídricos o entradas al cuerpo de agua son variados, algunos lagos reciben sus aguas principalmente de la precipitación, algunos otros están dominados por el escurrimiento superficial, y otros están controlados por los sistemas acuíferos o subterráneos.

Se pueden diferenciar entre Lagos y Lagunas, dependiendo si presentan o no estratificación térmica.

La estratificación es la formación de un gradiente térmico de densidad, producido por el calentamiento diferencial de las capas superficiales del cuerpo de agua, con respecto a las profundas. Así, se pueden distinguir los Lagos, cuerpos de aguas que presentan estratificación térmica y Lagunas, que no presentan esta diferencia de temperatura en sus aguas. Aunque también se aceptan generalmente el límite de 3 m de profundidad media para distinguir Lagos de Lagunas (Moss y col., 1994). De esta manera los lagos muestran una estratificación térmica que separa la capa superior, que se encuentra a una mayor temperatura, (epilimnion) de una capa que presenta una temperatura baja o hipolimnion, por lo que se impide la interacción de la capa superior con el sedimento aislando comunidades y procesos en cada una de las diferentes capas.

En las Lagunas o lagos someros, la masa de agua tiende a estar completamente mezclada como consecuencia del efecto del viento. Esta mezcla constante (polimixis), provoca un continuo reciclaje de nutrientes entre el sedimento y el agua, generando una mayor productividad (Jeppesen y col., 1997).

Este estudio se realizó en la Laguna de Aculeo, lago somero, por ello, este trabajo se referirá en términos teóricos al concepto de Lagunas.

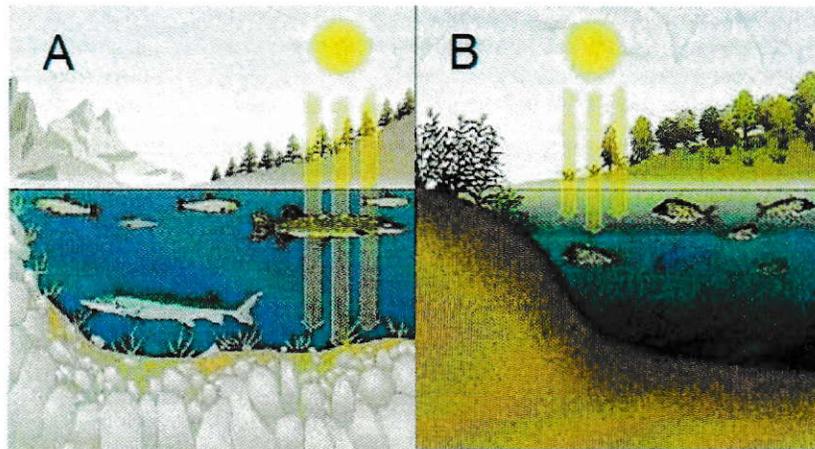
### 1.1.2 Relación Calidad del Agua y Trofia

Un lago somero o laguna recibe constantemente entradas de agua desde su cuenca o área de drenaje (entorno terrestre) y desde la atmósfera (entorno atmosférico) (figura 1).

La calidad del agua de una laguna es el reflejo de los efectos acumulados de dichas entradas. En el tiempo, una laguna recibe y acumula materiales traídos por las corrientes de entrada, alterándose la relación superficie-volumen al disminuir cada vez más en profundidad. Esta continua transformación origina una fase de pantano y finalmente un sistema terrestre. Este proceso, en forma natural, demora miles de años en completarse. Bajo estas condiciones, el crecimiento de algas y plantas acuáticas está en equilibrio con las entradas de nutrientes.

Históricamente, los lagos y lagunas han sido clasificados de acuerdo al nivel de trofia que presentan, esto se refiere en general a la riqueza de nutrientes, en especial nitrógeno y fósforo. De esta manera, los cuerpos de aguas se pueden diferenciar en oligotróficos, eutróficos y mesotróficos (Vollenweider, 1968). Así, un lago somero puede presentar diferentes estados tróficos, dentro de los que se encuentran la Oligotrofia (figura 2 A), que es la propiedad de las aguas de lagos o lagunas con un bajo contenido de nutrientes y que por lo general, presentan una mayor diversidad en las comunidades de plantas y animales, un bajo nivel de

productividad primaria y de biomasa y una buena calidad del agua para distintos usos (Margalef, 1983). Otro estado es la Mesotrofia, la cual se define como la propiedad de las aguas que contienen cantidades moderadas o intermedias de nutrientes y que pueden contribuir a un mayor desarrollo de organismos acuáticos (Roldán, 1992). Mientras que el estado de Eutrofia, se presenta por un enriquecimiento de las sustancias nutritivas en el agua, que pueden generar un mayor nivel de productividad y de biomasa, pero con aguas pobres en oxígeno y un crecimiento de plantas acuáticas (Margalef, 1983) (figura 2, B).



**Figura 2.** Clasificación de los lagos, (A) Oligotrófico; (B) Eutrófico.

Basándose en las condiciones tróficas, se puede determinar una relación entre la calidad del agua aceptable para los usos de un determinado cuerpo de agua y su nivel de trofia. Se puede identificar así, la calidad del agua, aceptable u óptima para determinados usos. Aunque esto no tiene un carácter cuantitativo en su naturaleza, una revisión de los usos de los cuerpos de agua se muestra en la tabla 1, el estado

trófico óptimo como el mínimamente aceptable para diferentes uso del agua en los lagos (Parra, 1989).

Los asentamientos humanos, la deforestación y cualquier otro proceso de deterioro antropogénico en el área de la cuenca de drenaje de un laguna puede cambiar la velocidad del proceso de eutroficación. Los ciclos químicos y biológicos se alteran, provocando un aumento no deseado de nutrientes, especialmente fósforo y nitrógeno, los que estimulan el crecimiento de algas y plantas acuáticas, disminuyendo la calidad del agua de la laguna, ya que empeoran el uso recreacional del agua; se producen problemas para usar esta agua como potable; se origina una competencia por el consumo del Oxígeno disuelto, lo que provoca la muerte masiva de peces, por lo que hay una pérdida gradual para usar estas aguas para la pesca y deportes acuáticos. (Ingeniería Ambiental y medio ambiente, 2000).

**Tabla 1.** Condición Trófica de lagos y relación con la calidad del agua (Parra, 1989).

Uso del agua deseado	Condición Trófica <sup>(*)</sup>	
	Requerido	Todavía tolerable
Producción de agua potable	Oligotrófico	Mesotrófico
Recreación (natación)	Mesotrófico	Suavemente eutrófico
Deportes náuticos (sin natación)	Mesotrófico	Eutrófico
Acuicultura (peces)	Oligotrófico	Mesotrófico
Riego (por medio de canales)	---	Fuertemente eutrófico
Producción de energía	---	Fuertemente eutrófico

<sup>(\*)</sup> Considerando las concentraciones límites, que tiene cada estado trófico, según OECD (Organization for economic cooperation and development) (1982):

Oligotrófico:  $N_{total}: 661 \text{ ugL}^{-1}$ ,  $P_{total}: 8,0 \text{ ugL}^{-1}$   
 Mesotrófico:  $N_{total}: 753 \text{ ugL}^{-1}$ ,  $P_{total}: 26,7 \text{ ugL}^{-1}$   
 Eutrófico:  $N_{total}: 1875 \text{ ugL}^{-1}$ ,  $P_{total}: 84,4 \text{ ugL}^{-1}$

Como ya se mencionó anteriormente, relacionado con la trofia, se encuentran los nutrientes como el nitrato y fosfato, que inciden directamente en la calidad de las aguas. La actividad de las bacterias, cuya participación en los ciclos biogeoquímicos es crucial en el reciclado de nutrientes, es también un factor que modifica la calidad

química del agua. La interfase atmósfera-agua representa un equilibrio de la incorporación de gases al agua, especialmente Oxígeno, que es el más importante y crucial para la vida vegetal y animal interactuando en muchas reacciones químicas y biológicas. De acuerdo con la altitud a la que están emplazados los sistemas, la presión atmosférica ejerce su efecto. Los lagos contienen naturalmente entre 8 y 12 mg/L de Oxígeno. La dinámica de los sistemas se refleja en variaciones diurnas y estacionales de Oxígeno las cuales reflejan el estado trófico del sistema. En los sistemas oligotróficos la demanda y la producción de Oxígeno es baja, y por lo tanto los valores de Oxígeno son constantes en profundidad y en tiempo. En los lagos eutróficos, la alta demanda de Oxígeno durante la noche, por respiración de las comunidades biológicas y la descomposición de la materia orgánica, hace que este gas disminuya progresivamente su concentración en profundidad, llegando en algunos casos hasta la anoxia. (Vila, 2003).

El estado de anoxia produce un cambio en la óxido reducción de los sedimentos o en el potencial de óxido reducción. El factor ambiental más importante en la regulación de la cantidad de Oxígeno en el agua es la temperatura. La concentración de Oxígeno disuelto es inversamente proporcional a la temperatura. El incremento de la temperatura durante primavera y verano de los sistemas templados disminuye la cantidad de Oxígeno hasta en un 50%. Esta cantidad es modificada por las relaciones de respiración y fotosíntesis durante la noche. Mientras más eutrófico es el sistema, mayor es la disminución de Oxígeno hacia el fondo (Wetzel, 2001). En lagunas someras y con grado de eutrofización alto, durante la noche, además de la temperatura, hay un efecto de consumo de Oxígeno por las plantas.

### 1.1.3 Sedimentos

Uno de los componentes importantes en los cuerpos de agua, son los sedimentos, que pueden definirse como material en suspensión o depositado en el fondo de un sistema acuático, que se compone tanto por material orgánico como inorgánico, provocados por procesos de erosión o dentro del mismo cuerpo de agua, los cuales son transportados por agentes de transporte como corrientes de agua y viento, para finalmente ser depositados en las partes bajas de cuerpos de agua (García & Masa, 1998).

La composición de los sedimentos puede ser tanto orgánica como inorgánica. El contenido orgánico puede consistir en microorganismos (plancton y bacterias), residuos de animales y vegetales, además del detritus del material descompuesto (Golterman, 1983), mientras el contenido inorgánico, incluye productos generados en la erosión de rocas, materiales sueltos y consolidados, además de compuestos generados químicamente por precipitación de sales disueltas producto de la evaporación y reacciones químicas, tales como sulfatos, carbonatos y sílice, generados fuera o dentro del cuerpo de agua por compuestos solubles o por las acciones indirectas de los organismos acuáticos (Hakanson, 1983).

Los sedimentos no sólo están constituidos por las partículas, además éstos contienen agua. Parte de ésta agua, se encuentra enlazada a la red cristalina de los minerales de los sedimentos, pero mucha de ésta agua simplemente ocupa el espacio entre las partículas de los sedimentos, denominada agua intersticial o agua de poro que contiene compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos (Golterman, 1983).

El origen de los sedimentos en los cuerpos de agua no sólo se debe a procesos naturales, las actividades humanas también pueden influir en el aumento de este material. Muchas de estas actividades generan polvos y material particulado, los cuales pueden ser transportados a sistemas acuáticos, como las actividades mineras, obras de ingeniería (construcción de caminos), los sistemas de alcantarillado, etc., que conducen materiales y exceso de nutrientes a ríos y lagos, favoreciendo un aumento de la carga de sedimentos (García & Masa, 1998).

#### 1.1.4 Interfaz Sedimento-Agua

La interfaz sedimento-agua es la zona que separa la columna de agua de los sedimentos y a través de la cual hay transferencia de masa desde y hacia los sedimentos. A este proceso pueden influir condiciones físicas, químicas y biológicas propias de esta capa.

En la última década, se ha observado un gran interés en el estudio de los sedimentos en relación con los ciclos biogeoquímicos y su importancia en el proceso de eutrofización de los cuerpos de agua continentales. La interfaz sedimento-agua desempeña un papel esencial en los sistemas dulceacuícolas y se ha confirmado que la capacidad de almacenamiento de compuestos en el sedimento excede entre 100 y 1000 veces la columna de agua. El sedimento puede servir como una fuente de componentes químicos, como nutrientes los que se podrían liberar hacia la columna de agua (Bonetto, 1982; Margalef, 1983).

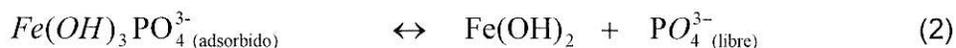
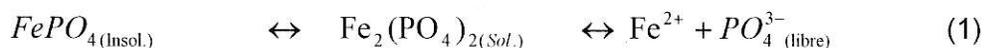
La importancia de esta zona para los estudios de calidad ambiental, está dada principalmente por los efectos adversos que puede producir en los organismos acuáticos y el medio ambiente, cuando presenta contaminación por retención de especies contaminantes. Los efectos adversos, ocurren porque los sedimentos contaminados entran en contacto directo con la biota, especialmente con organismos bentónicos, al proporcionarles el hábitat y el alimento, generando efectos tóxicos y permitiendo la bioacumulación de especies contaminantes, lo que determina una potencial transferencia de éstos a través de las cadenas alimentarias y eventualmente un perjuicio a la salud humana (FDEP, 1994). También pueden indirectamente afectar la salud ambiental de un sistema acuático al tener la capacidad de liberar contaminantes hacia columna de agua, quedando disponibles para los organismos que habitan en esta, mediante mecanismos de liberación a través de la interfaz sedimento-agua, donde ocurren las principales reacciones químicas que determinan la movilidad de nutrientes y especies contaminantes. Es por lo anterior, que los sedimentos son considerados tanto receptores como fuentes de contaminación (FDEP, 1994; Stepheson, 1994; Calmano, 1996).

En la zona de interfase entre el agua y el sedimento se llevan a cabo reacciones de liberación de nutrientes mediante mecanismos de óxido-reducción y actividad bacteriana principalmente; el conocer los procesos de liberación y acumulación que se efectúan en esta zona, por medio del análisis de diferentes parámetros, permite establecer algunas relaciones de productividad y aprovechamiento de los nutrientes suspendidos y sedimentados del sistema, ya que estos últimos sustentan la productividad primaria proporcionando los elementos esenciales para el desarrollo de organismos autótrofos y heterótrofos, que resultan primordiales para el

metabolismo de la biota acuática y del mismo lago. (Wetzel, 1975; Boyd y col., 1981; Margalef, 1983; Coler & Rockwood, 1989; Avnimelech *et al.*, 1981; Levine & Schindler, 1989).

Por reducción en los primeros centímetros del sedimento que son los únicos activos considerando los intercambios agua-sedimento, ciertos iones o elementos pueden ser liberados o atrapados alternativamente. Es el caso de los fosfatos, estos son almacenados en los sedimentos en forma de fosfato de hierro  $FePO_4$ , adsorbidos sobre las partículas de hidróxido de hierro (III),  $Fe(OH)_3$  y de Carbonato de Calcio,  $CaCO_3$  ó sobre las formas orgánicas con los ácido húmicos. Cuando el potencial óxido-reducción de la interfase disminuye el fósforo es liberado a la columna de agua. (UNESCO, 1984).

Así, las reacciones involucradas son:



El sedimento anaeróbico libera, en general, más fósforo que el aeróbico, ya que este último contiene hierro en estado de oxidación tres, mientras que el sedimento anaeróbico contiene hierro en estado de oxidación dos. El hierro (III) es mucho más insoluble que el hierro (II) (Barzi, J, 2003).

## **1.2 Descripción del Área de Estudio**

### **1.2.1 Antecedentes Generales de la Laguna de Aculeo**

Desde la segunda mitad del Siglo XIX, los terrenos de la cuenca de Aculeo, son adquiridos por la familia Letelier, quienes traen población desde otras zonas, con el fin de hacer productiva la hacienda, acarreado con ello, un aumento demográfico importante. Estas familias se instalaron en las zonas denominadas Rangue, Pintué y Los Hornos. Durante el Siglo XX, Aculeo se dio a conocer por su producción agrícola, frutícola, vitivinícola y cerealera. Ya para mediados de siglo, el turismo comenzó a perfilar como una actividad económicamente rentable en especial en la zona denominada "Las Casas", sector donde se encontraba la casa patronal de los Letelier y Pintué. La creación de algunas posadas y hosterías con la venia y concesión del dueño, aumentaba la cantidad de turistas que buscaban en la laguna un lugar para descansar. Esta actividad en conjunto con las otras desarrolladas en la Laguna, más las características propias de la zona, son las que han llevado a que hoy en día la Laguna de Aculeo, presente una diversidad de usos en sus aguas, y se genere un deterioro ambiental en este sector.

Es en el año 2006, cuando la Laguna presenta un grave problema ambiental, informando a las autoridades, una mortandad masiva de peces en las aguas de Aculeo, específicamente en el Sector Puntilla el León, donde se registraron muertes de grupos de pejerreyes. Por ello se dispuso de un monitoreo de las aguas por parte del servicio sanitario. DGA en tanto prepara un informe histórico de calidad de aguas, informando que las muertes masivas de peces corresponden a una situación normal de un cuerpo de agua con estas características, proponiendo realizar un manejo ambiental en la Laguna. Desde ese año, se ha mantenido un permanente interés en la evolución

de la calidad de las aguas, para que no vuelva a ocurrir un evento ambiental como el sucedido.

### 1.2.2 Ubicación Geográfica

La laguna de Aculeo, se ubica en la hoya hidrográfica del Maipo y es uno de los cuerpos de agua naturales más grandes ubicados en la Depresión Central de Chile. Se considera un cuerpo de agua de origen natural, ubicada a 50 Km. al suroeste de Santiago en la cordillera de la costa, comuna de Paine, en la Región Metropolitana.

La laguna se ubica en los  $33^{\circ}50'S$ ,  $70^{\circ}54'O$  y a 360 m de altitud (CED, 2008).

(Figura 3).



### 1.2.3 Morfometría

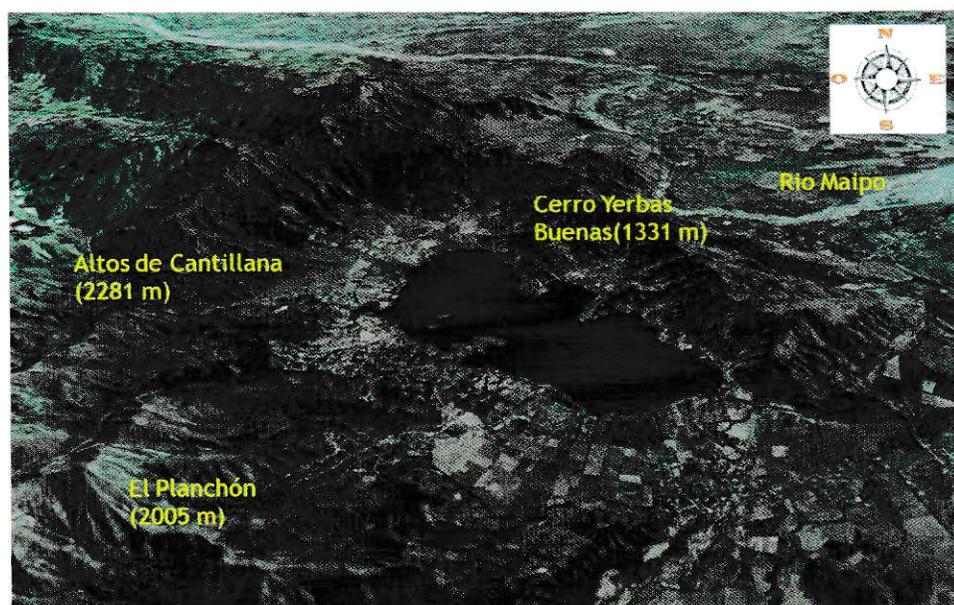
Las principales características morfométricas, se muestran en la tabla 2. Entre los que destaca, una profundidad máxima de 5 metros (Salazar & Soto, 1999), lo que clasifica a la laguna de Aculeo, como un cuerpo de agua somero (Andaur, 2008).

**Tabla 2.** Datos Morfométricos de la Laguna de Aculeo.

Superficie	11,5 (Km <sup>2</sup> )
Profundidad media	3,4 (m)
Profundidad máxima	5 (m)
Volumen de agua	53,6*10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )

Fuente: Salazar y Soto, 1999 - Leyton y Parra, 2007.

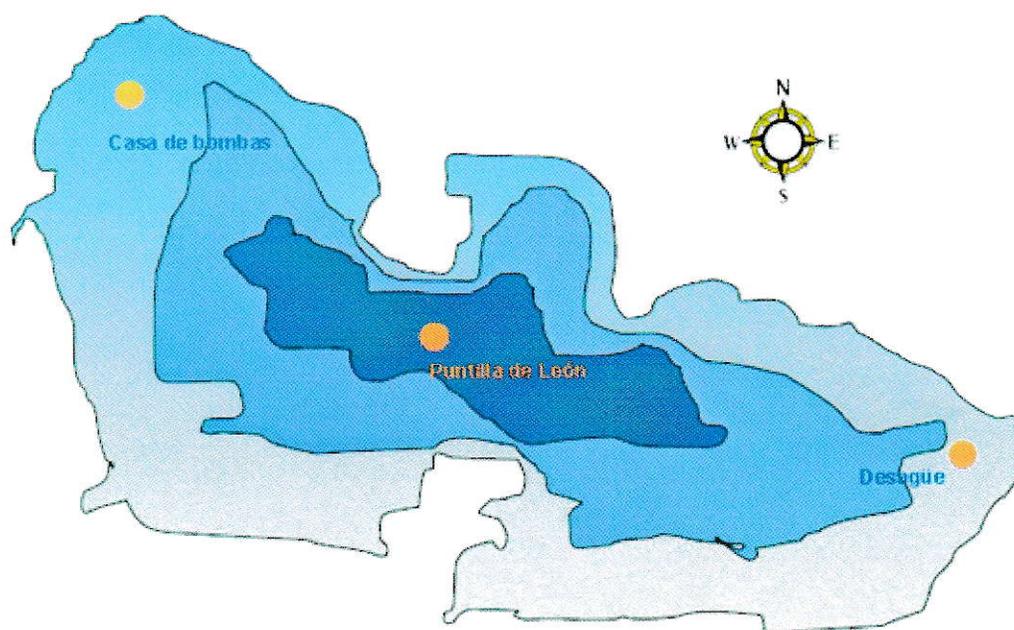
La laguna se encuentra rodeada de cerros, al lado norte se encuentra el cerro Yervas Buenas (1.331 m) y el cerro Tralcaco (747 m); al sur por un cordón montañoso compuesto por el cerro El Planchón (2.005 m), Altos de Cantillana (2.2281 m) y Horcón de Piedra (2476 m) (www.lagunadeaculeo.com). Mostradas en la figura 4.



**Figura 4.** Ubicación de los Cerros que rodean a la Laguna de Aculeo.

## - Batimetría de La Laguna

La figura 5 indica la distribución de las profundidades en el espejo de agua, así para la zona central de la laguna, (azul oscuro) nombrada como Puntilla de León, tiene una profundidad que se encuentra entre 3 a 6 m. Mientras que para el sector Noreste (azul claro), nombrado como Desagüe, la profundidad alcanza entre 2 a 3 m, y para la zona celeste, conocido como Casa de Bombas, la profundidad sólo obtiene entre 0-2 m. (CED, 2008).



**Figura 5.** Batimetría de Laguna de Aculeo.

#### 1.2.4 Geomorfología

El origen de la Laguna, se debe a la acumulación de sedimentos arrastrados por el río Maipo y que junto a los materiales de deyección, acumulados a la salida de las quebradas Ramadillas, Huiticalán y Abrantes, terminaron por represar el drenaje natural de la Rinconada de Aculeo. (Sancha y col, 1977).

Todo el alrededor de la Laguna, pertenece a una fosa tectónica (fosa tectónica de Santiago) rellena principalmente, con materiales producto de procesos erosivos del cuaternario. Esta fosa o cuenca tectónica, presenta una morfología de relleno sedimentario y se encuentra conectada con los cordones de cerros a través de depósitos aluviales de poca extensión superficial. Los principales valles del área, por el norte, son la llanura del Río Maipo-Angostura, del cual forma parte la Laguna de Aculeo (Centro EULA, 2004)

Esta Laguna se altera fácilmente frente a los eventos de lluvia, debido a lo escarpado del relieve que rodea el cuerpo de agua, alcanzando alturas de 2.000 m.s.n.m en la parte sureste, y la presencia de numerosos arroyos temporales, que drenan desde los cerros que la circundan.

La geología de cuenca esta constituida principalmente por andesitas y granodioritas, con ausencia de carbonatos. El lago esta rodeado por depósitos aluviales del cuaternario, que en la actualidad son utilizados en la agricultura. Además, desde la Laguna se generan una gran cantidad de canales de regadío que permiten la actividad agrícola en esta zona (Centro EULA, 2004).

### 1.2.5 Hidrografía

La Laguna de Aculeo, es un cuerpo de agua endorreico, es decir, no tiene una salida superficial hacia el mar y no tiene afluentes de agua que la alimenten permanentemente y su origen se explica por el afloramiento de aguas subterráneas someras que se encuentran en el sistema acuífero que conecta con la Laguna.

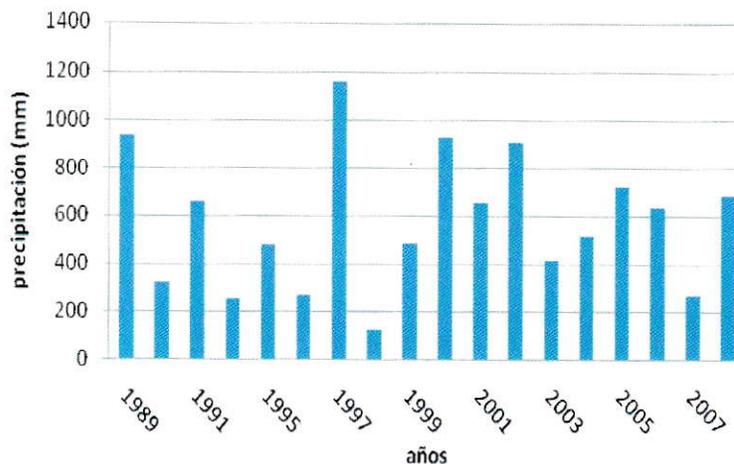
Pertenece a la Hoya Hidrográfica del río Maipo, con régimen de carácter nivopluvial con escurrimiento torrencial estacional (Andaur, 2008), su drenaje natural lo constituye el estero Aculeo, afluente del río Angostura, el cuál a su vez desemboca en el río Maipo, a unos 3 Km. al oeste de la localidad de Valdivia de Paine. El estero Aculeo permanece seco durante la época estival y escasamente presenta agua en el invierno; por lo tanto, las pérdidas superficiales a través del desagüe pueden ser despreciadas, ocurriendo principalmente a través de la evaporación. (CED, 2008).

### 1.2.6 Clima

El clima de la zona es del tipo templado-cálido, con una estación seca 6 a 8 meses; el nivel medio anual de precipitaciones en la cuenca es de 611 mm, siendo el mes más frío julio, con temperaturas promedio de 7,6 °C, y el más cálido enero con temperaturas promedio de 20,3 °C. El nivel de agua de la columna es regido por aportes pluvionivales estacionales, con máximos pluviales en Julio-Agosto, y máximos nivales en Septiembre- Octubre.

Los cordones montañosos que rodean a la laguna poseen el clima sub-húmedo, que poseen altos niveles de precipitación. El régimen hídrico se caracteriza por una

precipitación media anual de 577,3 mm., donde el mes más lluvioso es Junio, con 162,6 mm. (BNA, 1989-2008), observados en la figura 6.



**Figura 6.** Precipitaciones Laguna de Aculeo, periodo 1989-2008. Fuente: Dirección General de Aguas, 2008.

### 1.2.7 Actividades Económicas

Las actividades económicas desarrolladas en el entorno de la laguna son variadas, incluyen agricultura, turismo, ganadería, forestal, actividad silvopastoril, y recreación.

El uso de la tierra alrededor de la laguna y el uso del cuerpo de agua mismo en recreación se han ido incrementando con el tiempo, por lo que la laguna constituye un centro turístico y recreacional de creciente atracción en la actualidad. Las actividades y construcciones recreacionales se dan en todo el entorno de la laguna.

Las actividades desarrolladas en los valles situados entre los 300 y 600 m.s.n.m, que rodean a la Laguna de Aculeo, presentan muy buenas condiciones climáticas para actividades agrícolas intensivas, como la vitivinicultura y fruticultura, y el establecimiento de agroindustrias (Centro EULA, 2004), actividades que son desarrolladas en las zonas aledañas a la Laguna.

### 1.2.7.1 Actividad Agrícola y Ganadera

Se desarrolla la actividad agrícola intensiva, cultivos anuales tales como trigo en invierno y maíz; y grano seco en verano. Esta actividad es generadora de importantes empleos e ingresos para la población local. La exportación de bienes agrícolas intermedios es también una de las actividades primarias más importantes. Sin embargo, en el último tiempo se ha observado una reducción de las tierras arables, a causa del desarrollo inmobiliario, con efectos tales como la disminución de cultivos anuales y la consolidación de la horticultura y viñedos. Estos usos del suelo se desarrollan en suelos regados de origen sedimentario, con capacidades de uso II y III, principalmente en sectores aledaños a la ribera sur de la Laguna de Aculeo (Centro EULA 2004).

El desarrollo agrícola y turístico afecta en forma importante la condición trófica de la laguna, fundamentalmente por el aporte de fertilizantes a los cultivos y las actividades deportivas acuáticas, esta actividad se desarrolla principalmente en el lado este y oeste de la laguna.

Los sectores destinados a la ganadería, se ubican desde los faldeos de los cerros hasta sus mismas cumbres. El uso ganadero más intensivo se desarrolla gran parte del año en terrenos bajos que presentan pendientes inferiores a un 30%.

La zona de uso extensivo localizada en gran parte del cordón montañoso que rodea a la laguna, en sectores con pendientes que superan el 50%, son utilizadas en los períodos en que disminuye la disponibilidad de forraje en las partes bajas. (Leyton y Parra, 2007).

#### 1.2.7.2 Actividad Forestal

Esta actividad se destina principalmente a la extracción de madera para leña y carbón. Sin embargo, es una de las actividades que repercuten negativamente en el cuerpo de agua, ya que ha provocado importantes impactos sobre la vegetación nativa, los suelos y la erosión de éstos, incidiendo en la cantidad de sedimentos que entra a la Laguna.

#### 1.2.7.3 Actividad Inmobiliaria y Residencial

Corresponde principalmente a proyectos inmobiliarios desarrollados alrededor de la Laguna de Aculeo, con una superficie aproximada de 1.316 ha. (Leyton y Parra, 2007). Lo que ha provocado un incremento en la intensidad de uso del suelo. La venta de terrenos aledaños a la laguna, principalmente parcelas de agrado, ha permitido un importante desarrollo de estos proyectos destacando, en la zona oeste y noroeste.

#### 1.2.7.4 Actividad Turística y Recreación

Se concentra mayoritariamente en los alrededores de la laguna misma, siendo la localidad de Pintué el sector con mayor densidad de ocupación y localización de complejos turísticos.

## 1.2.8 Flora y Fauna

### 1.2.8.1 Flora

En las zonas aledañas a la Laguna de Aculeo, se pueden encontrar muchas especies nativas de la zona, como el romerillo (*Baccharis linearis*), voqui auca (*Ercilla volúbilis*), palqui (*Cestrum parqui*), la avellanita (*Avellanita bustillosii*) encontrada bajo los 700 metros de altitud, entre otras. Esta última especie es endémica de la zona y se encuentra en peligro de extinción, en la categoría de conservación en peligro. También se encuentran el Roble *Nothofagus macrocarpa*, Peumo (*Cryptocarya alba*) y Quillay (*Quillaja saponaria*), Boldo (*Peumus boldus*), entre otros (Leyton y Parra, 2007).

### 1.2.8.2 Fauna

La fauna terrestre está constituida por aves como la Perdiz, la Tórtola, la Codorniz, la Diuca, la Loica, entre otras. La fauna cercana a la laguna, como las variedades de patos, las diferentes Garzas, Taguas y roedores como la lauchita de los espinos, y la escasa Chinchilla. Con respecto a la fauna acuática de la laguna, existen principalmente las carpas y pejerreyes. Sin embargo desde el año 2006, con la mortandad de peces que ocurrió en la laguna, los pejerreyes desaparecieron (SEREMI de Salud, 2006).

### 1.3 Dirección General de Aguas y la Red Mínima de Control de Lagos

La Dirección General de Aguas (DGA) desde el año 1983, comienza con estudios destinados a establecer una red de calidad de aguas en lagos y embalses. Esta red actualmente cuenta con 60 estaciones de monitoreo en 16 cuerpos lénticos distribuidos en las regiones IV, VI, VIII, IX, X y Metropolitana (DGA, 2002), en 1988 la Laguna de Aculeo se incluye en esta red.

La red de calidad mínima de control de lagos, monitoreada por la Dirección General de Aguas, considera en la laguna de Aculeo 3 estaciones de monitoreo de calidad de aguas las que se muestran en la Tabla 3, junto con sus coordenadas UTM (PSDA 56, HUSO 19) y código BNA (Banco Nacional de Aguas)<sup>1</sup>.

**Tabla 3.** Estaciones de monitoreo de la Laguna de Aculeo, coordenadas y código BNA. Fuente: Musalem, M. 2006.

Estaciones	Coordenadas (UTM) <sup>2</sup>		Código BNA
	N (m)	E (m)	
Sector Desagüe	6253000	325000	05716010-1
Frente Puntilla León	6253500	323000	05716009-8
Frente Casa de Bombas	6255500	321300	05716008-K

Los datos registrados son tomados estacionalmente durante el año, siendo las épocas de muestreo de calidad de agua en otoño, invierno, primavera y verano. Se tienen valores desde el año 1988 hasta la fecha, dentro de los que se encuentran un

<sup>1</sup> El banco Nacional de Aguas es el sistema bajo el cual la DGA organiza una serie de base de datos, entre ellos, la base de datos de calidad de aguas en lagos, lagunas y embalses.

<sup>2</sup> Las coordenadas UTM es una proyección cartográfica conocida como Universal Transversal Mercator, en la que se proyectan cilindros en forma transversal a la tierra, generándose zonas UTM. Este sistema trabaja en coordenadas Norte y Este. La numeración sigue una regla: el Ecuador hacia el Hemisferio Norte vale 0 m aumentando hacia el Polo, y el Ecuador en dirección al Hemisferio Sur, vale 10.000.000 m y disminuye hacia el Polo. (Definición modificada de "La Proyección UTM", disponible en:

[www.elgeomensor.cl/downloads/cartografia/index.php?file=proyeccion\\_utm.pdf](http://www.elgeomensor.cl/downloads/cartografia/index.php?file=proyeccion_utm.pdf)

monitoreo de 8 parámetros meteorológicos (Temperatura ambiental, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, entre otros) y 24 parámetros físicos, químicos y biológicos (Temperatura, Conductividad eléctrica, pH, Oxígeno disuelto, % Saturación de Oxígeno, Turbiedad, Nitratos, Nitritos, Amoniac, Nitrógeno total, Fosfatos, Fósforo total, Sílice, cationes y aniones solubles, DQO y Clorofila "a"), medidos por el laboratorio ambiental de la DGA.

El objetivo de esta red es caracterizar los cuerpos de agua y detectar los cambios tempranamente que se puedan producir de las variables analizadas a través del tiempo (DGA, 1985, 2004).

DGA no muestrea sedimentos, por lo que este trabajo pretende aportar información de importancia para poder realizar monitoreos de sedimentos de lagos someros.

#### **1.4 Calidad del Agua y Norma Chilena Oficial 1.333/78**

La Norma Chilena Oficial 1.333 (NCh 1333) es la Norma de Calidad para el Recurso Agua según el uso dado en el cuerpo o masa de agua usado como receptor. Fija los límites máximos para los diferentes parámetros considerados como requisitos de calidad. Su cumplimiento se encuentra regulado tanto por la DGA, del MOP, como por las oficinas del Servicios de Salud respectivo. Esta norma es sólo de carácter referencial y no obligatoria.

Por calidad de un agua se entenderá al conjunto de características físicas, químicas y biológicas que hacen que el agua sea apropiada para un uso determinado. El monitoreo de las aguas es uno de los más importantes métodos para soportar la estrategia y políticas de protección y conservación del recurso hídrico, siendo la

implementación de programas de monitoreo de cantidad y calidad del recurso hídrico, un aporte para mejorar la planeación, desarrollo, protección y manejo de las aguas, anticipando o controlando la contaminación y los problemas de sobreexplotación o degradación de las mismas (Leiva, M. y López, M., 2006).

Sobre la base de los usos dados a la laguna (Recreación con contacto directo e indirecto; riego; vida acuática), se toma como referencia la Norma Chilena 1333, que indica las concentraciones máximas permitidas de determinados parámetros, dando así la aptitud para este cuerpo de agua.

### **1.5 Descripción del Problema**

La Laguna de Aculeo es clasificada como una Laguna Eutroficada (Andaur, 2008), lo que significa que posee grandes cantidades de nutrientes como fosfatos y nitratos. Cada cierto tiempo se informa de muertes masivas de peces y de emanación de malos olores, generalmente en épocas de verano y otoño. Entre los factores de este deterioro ambiental se distinguen dos grandes causas:

#### **Antrópicas:**

- Reflejada por los diversos usos que se le da al agua de la laguna
- La deforestación producida en las riberas y faldeos de los cerros.
- La gran actividad turística e inmobiliaria que ha aumentado.
- El control sobre el estero Pintué, que incide sobre la entrada y/o salida de las aguas.

Estas causas sin duda se ven favorecidas por las causas naturales,

**Naturales:**

- Condición morfométrica que posee esta zona, ya que la laguna está emplazada en una microcuenca, rodeada de cerros.
- El carácter endorreico que posee, lo que genera un estancamiento del agua elevado, debido a que no posee afluentes y efluentes naturales que hagan renovar las aguas constantemente
- Es un cuerpo de agua somero, favorece la mezcla del sistema agua-sedimento.
- 

**1.6 Hipótesis**

La Laguna de Aculeo es considerada un sistema eutroficado, los sedimentos estarían contribuyendo a la disminución de la calidad del agua superficial lo que se reflejaría en la relación sedimento-agua.

**1.7 Objetivos****1.7.1 Objetivo General**

Determinar la calidad del agua de la laguna de Aculeo mediante el análisis de datos históricos de 20 años y estudiar la influencia de los sedimentos sobre la columna de agua a través del análisis de las propiedades fisicoquímicas de los sedimentos de la laguna.

### **1.7.2 Objetivos Específicos**

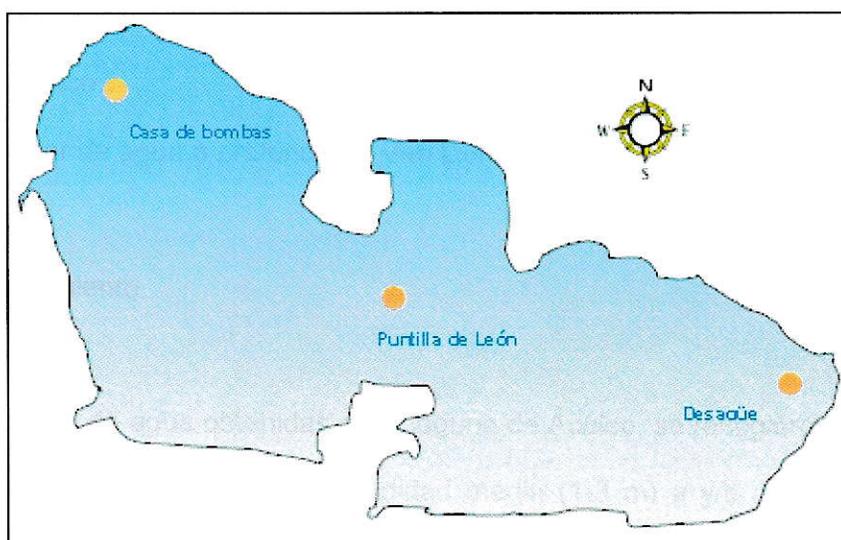
- Analizar los datos históricos de calidad del agua de la Laguna de Aculeo, proporcionados por la Red Mínima de Control de Lagos, que la DGA controla permanentemente.
- Determinar variables relevantes que alteren la calidad del agua.
- Comparar de los resultados de las variables monitoreadas con los valores límites de la NCh 1333.
- Caracterizar fisicoquímica del sedimento superficial de la Laguna de Aculeo.
- Analizar los resultados de los sedimentos de la Laguna de Aculeo y relacionarlo con la calidad del agua antes evaluada.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Muestreo y Toma de Muestras

#### 2.1.1 Campaña de muestreo

El muestreo de agua y sedimento se realizó el día 27 de Octubre de 2008, correspondiente a la campaña de monitoreo de primavera que ejecuta DGA para la calidad del agua en la Laguna de Aculeo. Las estaciones seleccionados para la toma de muestras de sedimentos, corresponden a estaciones que usa DGA para la calidad del agua, los cuales son tres sitios, Sector Desagüe, Sector Puntilla de León y Sector Casa de Bombas (tabla 3). Se usó ese criterio, para así tener una relación precisa de la calidad del agua y del sedimento que se encuentra en dicho sitio a muestrear. La ubicación de los sitios se encuentra en la figura 7. En la tabla 4 se registran las características observadas en los puntos de muestreos.



**Figura 7.** Ubicación Estaciones de muestreo DGA en Laguna de Aculeo. (Elaborado por CED, 2008).

Cabe destacar que los bidones no tienen preservantes al momento de recoger agua, estos preservantes se adicionan (si así lo requiere el análisis) al momento de terminar el muestreo, como máximo 6 horas después de la toma de muestras (según métodos DGA.)

#### 2.1.2.2 Sedimentos

- Materiales
  - Muestreador de sedimento "Core" (Tubo de PVC, 6 m. de largo con tapa).
  - Hielera hermética.
  - Frascos plásticos boca ancha de 500 mL capacidad, para el almacenamiento de muestras.
  
- Procedimiento

Las muestras de sedimentos fueron recolectadas a través de un "Core", por cada sitio de monitoreo, se extrajo aproximadamente 1L de sedimentos (2 frascos plásticos por sitio), sacando aproximadamente los primeros 10 cm de sedimentos, luego los frascos fueron etiquetados y dispuestos en una hielera hermética a baja temperatura hasta su traslado al laboratorio, para así reducir una posible variación externa y mantener la cadena de frío.

### 2.1.3 Determinación de las variables a estudiar

#### 2.1.3.1 Variables en Aguas

En este trabajo se seleccionaron:

- 6 variables físicas y químicas: pH, Conductividad eléctrica, Oxígeno disuelto, Claridad -medida por profundidad Disco Secchi-, y Temperatura, que tienen relación con la Norma Chilena NCh 1333. Se estableció si el agua de la Laguna está o no cumpliendo dicha norma, para los usos identificados en la Laguna.
- Variables físicas y químicas: P-PO<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, Demanda química de oxígeno (DQO), Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, que serán relacionadas con la relación sedimento-agua. Se eligieron los nutrientes, fosfato y nitrato, debido a que la laguna está eutroficada y se requiere saber como es la relación entre sedimentos y agua. Las sales solubles (aniones y cationes) se eligieron (aunque no haya una continuidad de datos por parte del laboratorio ambiental DGA) debido a que en sedimentos se determinarán, para su caracterización, por lo tanto se podría hacer también una relación entre lo encontrado en el agua y lo del sedimento.

### 2.1.3.2 Variables en Sedimentos

Se estudiaron las siguientes variables: pH, Conductividad eléctrica, granulometría, P-PO<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, Materia orgánica (MO), Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Dichas variables se eligieron debido a que se requiere una caracterización de los sedimentos de la Laguna de Aculeo, por ende, se medirán las variables más importantes a ser estudiadas (Zenteno, P. 2006).

## 2.2 Métodos de Calidad de Agua usados por DGA

Los métodos usados en las aguas de la Laguna de Aculeo, por el Laboratorio Ambiental de la DGA, se pueden clasificar en *in situ*, y en laboratorio: - *in situ*, incluyen, la sonda Multiparamétrica, para las variables como pH, Conductividad eléctrica, Temperatura, Oxígeno disuelto y profundidad máxima; la claridad o transparencia del agua se midió con disco secchi. Según metodologías recomendadas por APHA, 1998.

- Para los métodos usado en el laboratorio, se ocupan los procedimientos mencionados en la tabla 5.

**Tabla 5.** Métodos de las variables fisicoquímicas determinadas por el Laboratorio Ambiental de la DGA.

Variable	Metodología/ técnica	Referencia	Límite de detección
Fosfatos	Método del ácido ascórbico/ E.A.M	SMEWW 19th Edition, Method 4500-P-E. Hach Method 8048, USEPA Approved	0,003 mg/L
Nitratos	Salicilato sódico / E.A.M <sup>(*)</sup>	Rodier, 1981	0,002 mg/L
Sodio	Espectroscopía de absorción atómica	SMEWW 19th Edition, Method 3111 B	0,05 mg/L
Potasio	Espectroscopía de absorción atómica	SMEWW 19th Edition, Method 3111 B	0,03 mg/L
Calcio	Espectroscopía de absorción atómica	SMEWW 19th Edition, Method 3111 B	0,08 mg/L
Magnesio	Espectroscopía de absorción atómica	SMEWW 19th Edition, Method 3111 B	0,03 mg/L
Cloruro	Titulación/ titulación analítica	SMEWW 19th Edition, Method 4500-Cl-C	1,00 mg/L
Sulfato	Turbidimetría/ E.A.M <sup>(*)</sup>	SMEWW 19th Edition, Method 4500-SO4- E	2,00 mg/L
DQO	Método del Reactor de Digestión/ E.A.M <sup>(*)</sup>	Hach Method 8000, USEPA Approved	1,00 mg/L

<sup>(\*)</sup>E.A.M= Espectroscopía de absorción molecular

### 2.3 Métodos usados en Sedimentos

Las muestras de sedimentos de la Laguna de Aculeo se sometieron a una caracterización fisicoquímica, mediante el análisis de la granulometría, pH, conductividad eléctrica, fósforo disponible, cationes, aniones solubles, materia orgánica. Mediante métodos descritos por INIA. (Sadzawka, 1990).

#### 2.3.1 Secado de Muestras

- Materiales
- Bandejas de plástico.
- Varilla de agitación.

- Procedimiento

Una vez trasladados los sedimentos al laboratorio, se dispusieron en bandejas de plástico para su secado, cada muestra húmeda se colocó en una bandeja, en total se ocuparon 6 bandejas, dejándolas secar en un cuarto por varios días a temperatura ambiente. Cuidando de que estuvieran aisladas de cualquier foco de contaminación. A medida que las muestras se iban secando, se movía constantemente el sedimento para disgregarlo con una varilla de agitación para evitar la formación de agregados.

### 2.3.2 Almacenamiento de Muestras

- Materiales

- Bolsas de plástico con cierre hermético
- Espátula de metal
- Mortero

- Procedimiento

Una vez secas las muestras, se disgregaron lo más posible con una espátula y con un mortero, para así lograr partículas lo más fina posible. Para que la muestra fuera representativa se procedió a hacer un “cuarteo”, donde se toma una cantidad significativa de muestra a través de cuatro cuadrantes en la bandeja, haciendo un recorrido de acuerdo a un esquema en Z. Luego, de cada muestra por sitio se toma la misma cantidad de sedimento y se guardan en una bolsa plástica rotulada. En total, se obtuvo 150 g de cada sitio.

### 2.3.3 Tamizado y Análisis de la Granulometría

Las características fisicoquímicas del sedimento se analizan en la fracción fina de éstos, ya que es aquí donde se concentran la mayor parte de materia orgánica. Esta fracción fina corresponde a las partículas inferiores a 63  $\mu\text{m}$ , la cual incluye a las arcillas ( $< 2 \mu\text{m}$ ) y limos (2-63  $\mu\text{m}$ ).

- Materiales

- Tamiz de luz de malla de 1,000 mm
- Tamiz de luz de malla de 0,850 mm
- Tamiz de luz de malla de 0,500 mm
- Tamiz de luz de malla de 0,355 mm
- Tamiz de luz de malla de 0,212 mm
- Tamiz de luz de malla de 0,106 mm
- Tamiz de luz de malla de 0,063 mm

- Equipos

- Rotor para tamizado marca Joy modelo N°: 30X186624001
- Balanza de precisión (Acculab V-2400)

- Procedimiento

Para realizar la determinación de la granulometría, se ocupa las muestras de sedimentos previamente almacenadas y secas. Luego, se montan una serie de tamices uno sobre otro, en orden descendente de luz de malla. Una vez ordenados los tamices, se adicionan 100 g de sedimento seco. Posteriormente se tapa la columna de tamices

y se pone en el rotor, asegurándolos bien. Una vez fijados, se ponen en agitación constante por 30 minutos. Luego de esto, se retiran los tamices y se separan cada uno de ellos, masando el contenido de sedimentos almacenados en cada tamiz, esta masa corresponde luego al porcentaje de sedimento que tiene ese tamaño granulométrico.

Cabe destacar que para los análisis siguientes, se utiliza el sedimento fino, es decir el tamizado a 0,063 mm (de luz de malla).

#### 2.3.4 Medición de pH y Conductividad Eléctrica

El pH, se medirá la acidez actual, que corresponde a la concentración de iones hidrógenos libres, extraídos por el agua, desde los poros del suelo.

La conductividad eléctrica (CE), es la capacidad que tiene un suelo para conducir la corriente eléctrica, producida por los iones de las sales disociadas. La magnitud de la CE, dependerá de la cantidad de iones cargados positiva y negativamente y de su movilidad. La CE se determina en una solución acuosa de suelo.

La medición del pH y la CE en muestras de sedimentos se realizarán en una proporción 1:2,5 sedimento/agua.

- Materiales

- Agua desionizada
- Envases de plástico boca ancha, 150 mL. Con tapa.

- Equipos

- Balanza de precisión, Acculab (V-2400)
- Agitador orbital, modelo Boeco 05-20 Orbital Shaker

- Potenciómetro, modelo Hanna HI 111
- Electrodo de vidrio.
- Conductivímetro pH-/EC/TDS HI9813-0 (HANNA INSTRUMENTS).

- Procedimiento

Para la determinación del pH y CE, se pesan 20 g de cada muestra de sedimento en frascos plásticos, luego se agrega 50 mL de agua desionizada (porción 1:2,5). Después se agitan los frascos con la solución sedimento-agua por 2 horas a 100 rpm en agitador. Luego se deja sedimentar a las muestras y al sobrenadante se le mide la conductividad eléctrica y el pH.

### 2.3.5 Determinación de Factor de Humedad (fh) y Porcentaje de Saturación (PS)

- **Factor de Humedad:**

El método seguido fue pérdida de peso a 105°C, que es el secado de la muestra hasta peso constante. Este es el parámetro corrector de la humedad del sedimento seco.

- Materiales

- Vasos de precipitado 10 mL.
- Espátula de acero inoxidable.

- Equipos

- Balanza analítica (Shimadzu, AUX220)
- Estufa de secado, marca Jinghong modelo ZHG-9147A.
- Desecadora.

- **Procedimiento**

Se pesó de 1 a 2 g de muestra tamizada por sitio, en vasos de precipitado, previamente masados. Se dejan secar en la estufa a 105 °C por 24 horas. Se retiran los vasos de la estufa y se masan hasta obtener una masa constante.

La fórmula ocupada para obtener el factor de humedad es:

$$\text{factor de humedad (fh)} = \frac{a - c}{b - c} \quad \text{Ec./1/}$$

Donde:

a = masa en g del sedimento seco al aire + recipiente

b = masa en g del sedimento seco a 105 °C + recipiente

c = masa en g del recipiente.

- **Porcentaje de saturación:**

Se pesó de 1 a 2 g de muestra saturada por sitio, en vasos de precipitado, previamente masados. Se dejan secar en la estufa a 105 °C por 24 horas. Se retiran los vasos de la estufa y se masan hasta obtener una masa constante. La muestra saturada se realiza, masando una cantidad de sedimento dada, trasvasiéndola a un frasco plástico, luego se procede a agregar agua suficiente para saturar la muestra, agitando y revolviendo constantemente la mezcla con una espátula, hasta el punto de saturación. (INIA, 2006)

La fórmula ocupada para obtener el Porcentaje de Saturación es:

$$\text{Porcentaje de Saturación (PS)} = \frac{a - b}{b - c} * 100 \quad \text{Ec./2/}$$

Donde:

a = masa en g de pasta saturada + recipiente

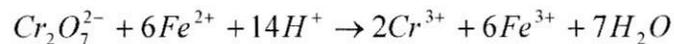
b = masa en g de pasta saturada seca a 105 °C + recipiente

c = masa en g del recipiente.

### 2.3.6 Determinación de Materia Orgánica

La Materia Orgánica se determinará por el método de combustión húmeda de Walkley y Black, que implica la oxidación de la MO fácilmente oxidable, con dicromato de potasio en medio ácido ( $H_2SO_4$ ), y una vez ocurrida la reacción, se titula el exceso de dicromato con sulfato ferroso ( $FeSO_4$ ). Por método potenciométrico es posible construir una curva de titulación y obtener el volumen de sulfato ferroso sobrante, necesario para oxidar al hierro.

Reacción:



- Materiales

- Matraz Erlenmeyer boca ancha, 250 mL.
- Bureta de vidrio, 50 mL.
- Solución de dicromato de potasio 0.1667 M ( $K_2Cr_2O_7$ ) (Merck p.a)
- Acido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ) (Merck p.a)
- Acido fosfórico concentrado ( $H_3PO_4$ ) (Merck p.a)
- Agua desionizada.
- Solución de sulfato ferroso 0,5 M ( $FeSO_4$ ) (Merck p.a)

- Equipos

- Balanza analítica (Shimadzu AUX220- Equilab)
- Potenciómetro con electrodo de platino (Hanna HI 111)
- Agitador magnético

- Procedimiento

Se masan 0,5 g de cada muestra de sedimento en una balanza analítica, los que se vierten en un matraz Erlenmeyer, previamente masado. Se incluye un blanco. A cada matraz, se le agregan 10 mL de dicromato de potasio 0,1667 M. Luego, se agrega cuidadosamente 20 mL de ácido sulfúrico, agitando el matraz y dejando reposar por 30 minutos. Aquí, el carbono contenido en los suelo se oxida, y el dicromato se reduce a cromato, en una reacción equivalente. Después se agregan 10 mL de ácido ortofosfórico concentrado. Luego se adicionan 180 mL de agua desionizada. Después se titulan las soluciones con  $\text{FeSO}_4$ , hasta el salto de potencial, ocupando un potenciómetro.

Para determinar el contenido de carbono en los suelo, considerar lo siguiente:

$$C(\%) = \frac{V_2 - V_1}{S} * M * 0,39 * fh$$

Ec./3/

Donde:

$V_1$  = mL de solución de sulfato ferroso gastado en el blanco.

$V_2$  = mL de solución de sulfato ferroso gastado en la muestra.

$M$  = molaridad de solución de sulfato ferroso

0,39 =  $(3 * 100 * 1,3 / 1000)$  donde 3 (peso equivalente del carbono); 1,3 (factor de compensación por la combustión incompleta de la MO; 1000 (Meq/eq).

S = peso en gramos de la muestra seca al aire

fh = factor de humedad  $((a-b/b)*100)$ , donde a = es el peso de suelo seco al aire y b= el peso del suelo seco a la estufa.

Para determinar la MO, se ocupa:

$$MO(\%) = 1,724 * C(\%) \quad \text{Ec.14/}$$

Donde el porcentaje de carbono multiplicado por el factor de Van Bemmelen que es 1,724.

### 2.3.7 Determinación de Fósforo

El fósforo disponible se analizó por el método de extracción de Olsen, el que se basa en la extracción de fósforo como ion monoácido por bicarbonato de sodio ajustado a pH 8,5.

- Materiales
  - Bicarbonato de Sodio 0,5 M; pH 8,5 ( $\text{NaHCO}_3$ ) (Merck p.a)
  - Serie de estándares de fósforo.
  - Carbón activado.
  - Reactivo mezclado (ácido sulfúrico 2,5 M, solución de molibdato de amonio, ácido ascórbico y tartrato de potasio y amonio) (Merck p.a)
  - Envases de plástico con base cuadrada, 150 mL
  - Probeta de vidrio, 50 mL
  - Embudos de vidrio
  - Papel filtro
  - Tubos de ensayo

- Equipos
  - Balanza analítica (Shimadzu AUX220)
  - Espectrofotómetro UV-Visible (Jenway 6300 spectrophotometer)
  - Agitador orbital (O5-20, Boeco)

- Procedimiento

Se masaron 2,5 g de cada muestra de sedimento, incluyendo blanco. Se agregó 50 mL de solución de bicarbonato de sodio 0,5 M; pH 8,5. Se agitaron las muestras y blancos por 30 minutos. Luego se filtraron por un filtro fino, se agregaron 3 mL del filtrado en tubos de ensayo, y también 3 mL de estándares en otros tubos. A todos los tubos se agregó 3 mL de reactivo mezclado y se dejó reposar 1 hora para que el color azul se desarrollara al máximo. Se midió la absorbancia a 880 nm. La concentración de fósforo se calcula con una curva de calibración previamente hecha.

$$P \left( \frac{mg}{Kg} \right) = (a - b) * 20 * fh \quad \text{Ec.15/}$$

Donde:

a = mg/L de P en la muestra, obtenido de la curva de calibración.

b = mg/L de P en el blanco, obtenido de la curva de calibración.

20 = relación liquido: sedimento

fh = factor de humedad.

### 2.3.8 Determinación de Bicarbonato

El análisis de bicarbonatos en sedimentos se determina en el sobrenadante del extracto de saturación, mediante la titulación con ácido clorhídrico 0,1 N, usando anaranjado de metilo como indicador. Parámetro analizado por triplicado.

- Materiales

- Acido clorhídrico 0,1 N (Tritisol Merck).
- Bureta automática (Brand) de 25 mL.
- Erlenmeyer boca ancha 100 mL.
- Indicador anaranjado de metilo.
- Agua destilada hervida

- Equipos

- Agitador magnético.

- Procedimiento

A 10 mL del extracto de saturación de cada muestra en matraces erlenmeyer, se titularon con HCl 0,1 N, usando anaranjado de metilo como indicador, el volumen gastado de HCl hasta el cambio de color, corresponden a los meq de bicarbonato presentes en el extracto de saturación.

Para determinar bicarbonato se ocupa la siguiente fórmula:

$$HCO_3^- \left( \frac{meq}{L} \right) = \frac{V * N * 1000}{mL \text{ muestra}} \quad \text{Ec./6/}$$

Donde:

V = volumen de HCl gastado en la titulación

N = normalidad del HCl

### 2.3.9 Determinación de Sales Solubles

Los cationes y aniones solubles se determinaron en el extracto de saturación por cromatografía líquida de alta resolución, ocupando un detector de conductividad (Colin B., 2001). Los iones a analizar son:

Cationes:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ .

Aniones:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ .

- Materiales

- Agua desionizada
- Estándares Tritisol de: Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio, Cloruro, Nitrato, Carbonato, Sulfato,  $1000 \text{ mgL}^{-1}$ .
- Fase móvil cationes: 200  $\mu\text{L}$  de ácido nítrico suprapur (Merck) y 29,6 mg de EDTA en un litro de agua.
- Fase móvil aniones: 20 mL de concentrado (LiOH, Ácido Bórico, ácido glucónico), más 120 mL de acetonitrilo grado HPLC en un litro de agua desionizada.
- Columna IC-Pak<sup>tm</sup> Cationes M/D.
- Columna IC-Pak<sup>tm</sup> Aniones HC.
- Envases de plástico con base cuadrada, de 150 mL
- Matraz de aforo, de 10 mL
- Espátula de metal
- Tubos de centrifuga y tubos Eppendorf.
- Filtro de membrana PVDF de 0,22  $\mu\text{m}$  de poro.

- Equipos
  - Centrífuga (Boeco, U-320)
  - Equipo HPLC (Waters 1515)
  - Detector de conductividad (Waters 432).
  - Balanza de precisión (V-2400 Acculab)

- Procedimiento

Se prepararon extractos de saturación por muestra. Se masaron 30 g de sedimento fino en vasos de dispersión. Se agregó agua desionizada hasta el punto de saturación. Los criterios para obtener este punto son: al golpear el vaso contra el mesón no se colecta agua en la superficie, la pasta brilla por reflejo de la luz, la pasta fluye lentamente al inclinar el vaso, y la pasta fluye libre y limpiamente por la espátula. Luego los extractos se agregaron a tubos de centrifuga, y se centrifugó durante 5 minutos. Los sobrenadantes se centrifugaron otros 5 minutos, en tubos de centrifuga limpios. Los sobrenadantes obtenidos de cada sitio se aforaron a 10 mL con agua desionizada. Las soluciones se guardaron en tubos eppendorf. Se hicieron 3 inyecciones por sitio en el equipo, registrando área y tiempo de retención de la banda cromatográfica. Las concentraciones de los cationes y aniones fueron determinados a través de una curva de calibración realizada con los estándares.

Para obtener los resultados de mg/L a mg/Kg, se ocupa la siguiente formula:

$$Concentración\left[\frac{mg}{Kg}\right] = \frac{Conc.\left[\frac{mg}{L}\right] * PS}{100} \quad Ec.171$$

Donde:

PS= Porcentaje de Saturación para cada muestra.

## 2.4 Análisis de Datos de Calidad de Aguas

Para el análisis de los datos correspondientes a las variables físicas y químicas de calidad del agua de la Laguna de Aculeo, se debió establecer la base de datos entregados desde el banco nacional de aguas (BNA) por parte de DGA, así, las variables fueron ordenadas en columnas, mientras las fechas y profundidades de medición (0 m, profundidad media, y profundidad máxima) en filas de cada estación de monitoreo. Se utilizó el periodo comprendido entre los años 1988 y 2008, para así tener la mayor disponibilidad de datos, de manera de hacer la evolución de la calidad del agua lo más completa posible. Se empleará el programa Microsoft Excel ® y el software Microcal Origin 6.0 ®. Donde se realizaron gráficos de la variable en función del tiempo, para las tres estaciones, mediante método de promedios acumulados (ver Anexo I, punto 1). Incluyendo además lo que indica la Norma correspondiente a cada variable.

La disponibilidad de datos usados en este trabajo, se informa en la siguiente tabla, considerando el período de tiempo en el cual se tienen los registros por cada variable.

**Tabla 6.** Disponibilidad de datos de los monitoreos estacionales realizados por DGA en la Laguna de Aculeo.

Variable	Periodo de tiempo	Número de datos Total	Número de datos en Otoño	Número de datos en Invierno	Número de datos en Primavera	Número de datos en Verano
pH	1988-2008	469	126	113	135	95
CE	1988-2008	369	83	92	116	78
Temperatura	1988-2008	471	126	113	135	97
Oxígeno Disuelto	1988-2008	459	116	113	135	95
Claridad	1988-2008	195	56	47	54	38
Nitrato	1988-2008	417	112	101	114	90
Fosfato	1988-2008	408	111	96	118	83
DQO	1988-2008	376	96	89	94	97

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

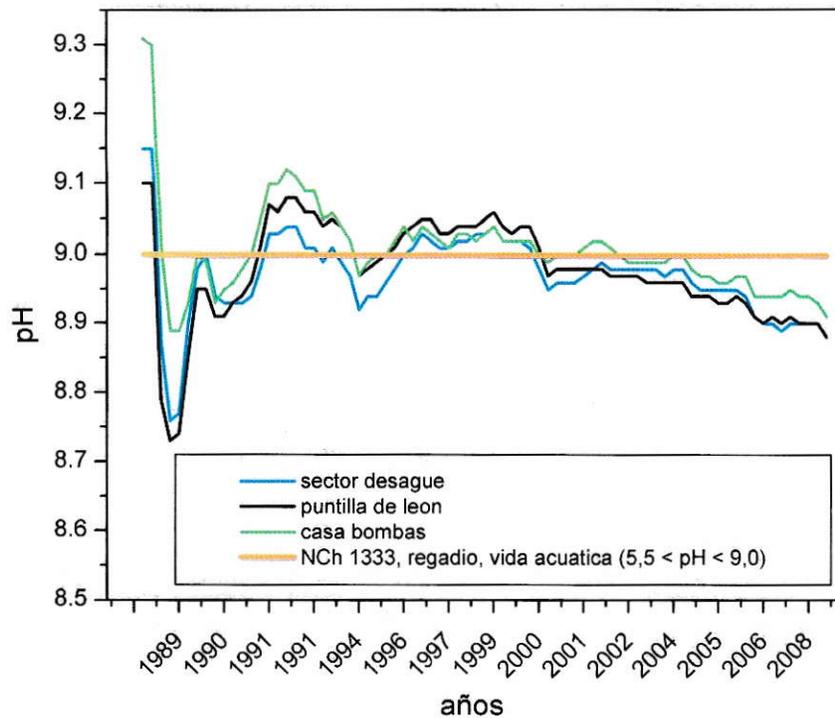
#### 3.1 Calidad del Agua de la Laguna de Aculeo

##### EVALUACIÓN DE VARIABLES CON LA NORMA CHILENA OFICIAL (NCh 1333) Y COMPARACIÓN ENTRE ESTACIONES

Las figuras de este capítulo, fueron realizadas usando los promedios acumulados explicados en el Anexo I, punto 1 y como muestra cada una de estas, al comienzo las curvas tienen una gran amplitud en sus respuestas, pero esto se da porque son pocos los datos que se promedian, mientras que al aumentar estos (más años de medición), la curva se suaviza y es posible ver una tendencia clara de lo que sucede con cada variable.

##### 3.1.1 pH

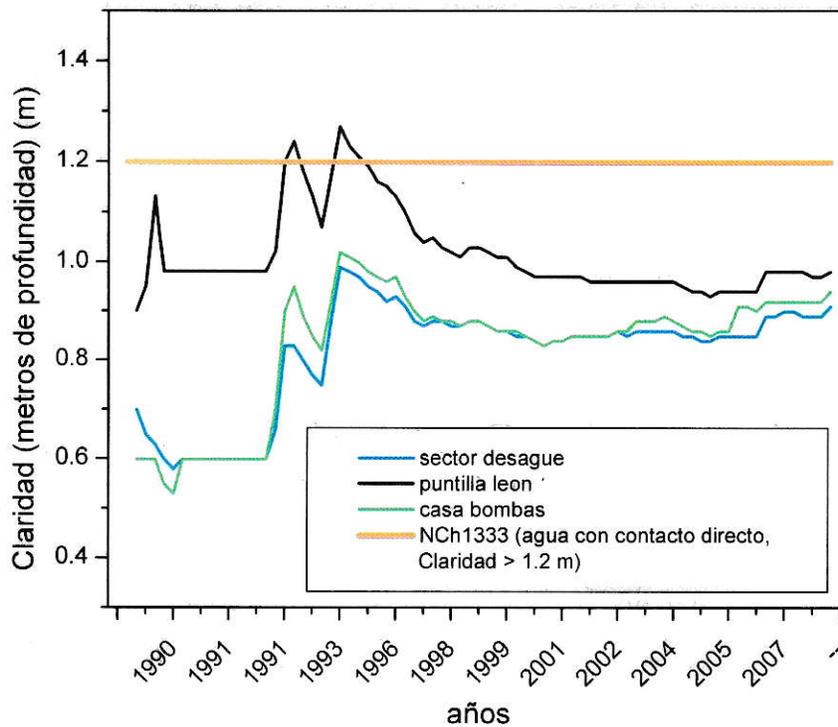
La figura 8 muestra la tendencia (en promedios acumulados) del pH en el periodo de tiempo entre 1988-2008, (que consta de 77 mediciones), donde se observa una disminución notoria desde el año 2000 hacia adelante, tendencia que a largo plazo se ve en las tres estaciones de monitoreo, aunque la amplitud de dicha disminución es baja, ya que de acuerdo a los datos, en 8 años ha decaído 0,1 unidades de pH. De acuerdo a la gráfica, el pH es básico, cercano al límite sugerido para utilización de agua en riego, de acuerdo a la NCh 1333.



**Figura 8.** Promedios Acumulados de pH superficial en el tiempo. Comparación con NCh 1333 y entre estaciones.

### 3.1.2 Claridad

De acuerdo a la figura 9, se puede decir que las tres estaciones de monitoreo, poseen el mismo comportamiento en la tendencia que entregan los promedios acumulados, aunque la estación Puntilla de León es la que presentó mayor claridad. A partir del año 1999 la tendencia de los promedios acumulados comienza a estabilizarse y estos últimos 4 años, las curvas indican que ha aumentado la profundidad de disco Secchi, o claridad del agua para las tres estaciones, aunque este aumento no alcanza aun para cumplir con la Norma.

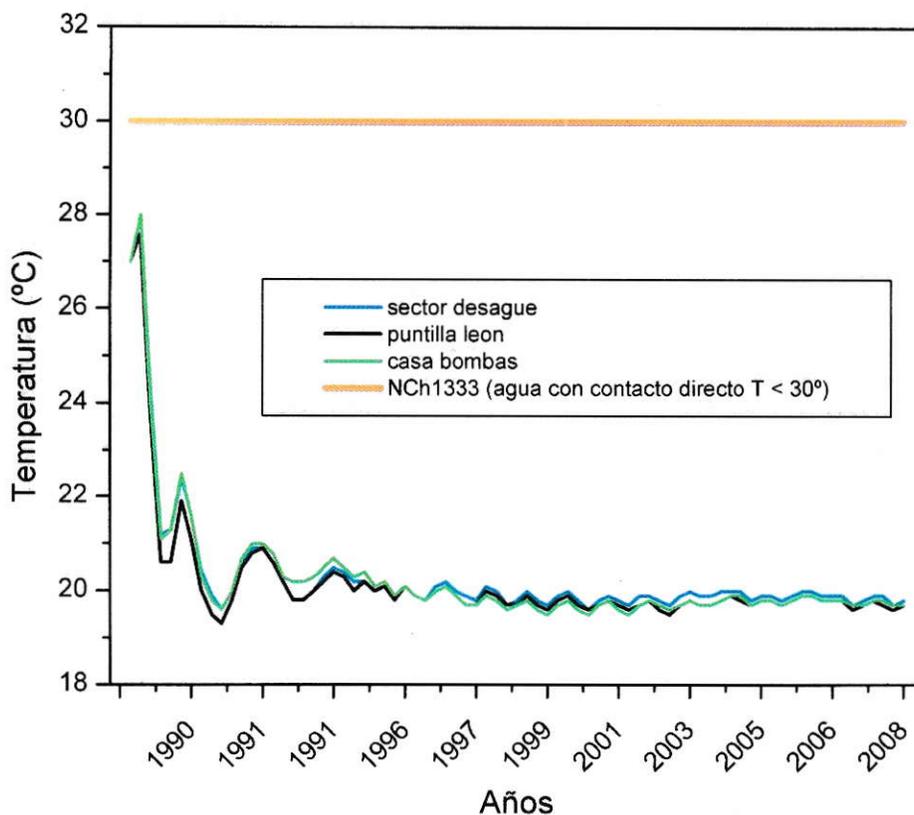


**Figura 9.** Promedios Acumulados de Claridad (medidos en profundidad Disco Secchi) en el tiempo. Comparación con NCh 1333 y entre estaciones.

### 3.1.3 Temperatura

En relación con la temperatura superficial del agua de la Laguna de Aculeo, la figura 10 muestra que las tres estaciones presentan el mismo comportamiento, los primeros años de medición, existe una alta variación en los datos, producto del análisis de promedio acumulados, ya que se cuenta con pocos datos al comienzo y las temperaturas varían de acuerdo a la estación del año (tabla 7). Sin embargo, desde el año 1995 en adelante, la temperatura se mantuvo en los 20°C en promedio, cumpliendo la norma NCh1333 en el uso de recreación con contacto directo, en todo el muestreo de datos. No obstante, la tabla 7, entrega los promedios de Temperatura

separados por estación del año, donde se aprecia una variación notoria temporalmente, mientras que espacialmente, las temperaturas son muy cercanas.



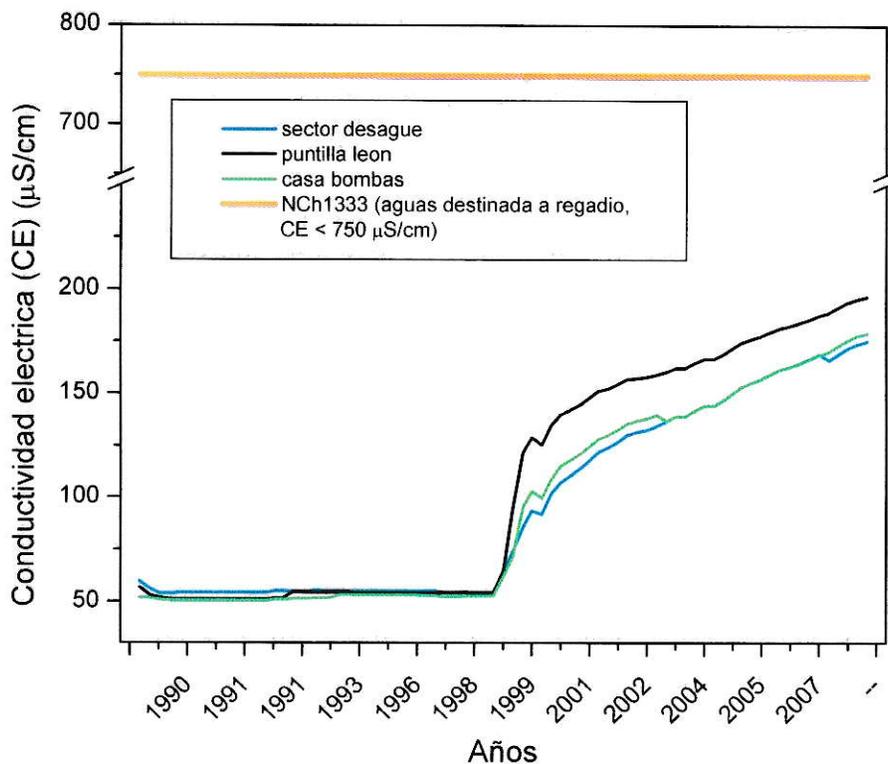
**Figura 10.** Promedios Acumulados de Temperatura superficial en el tiempo. Comparación con NCh 1333 y entre estaciones.

**Tabla 7.** Temperaturas superficiales promedio por estación del año, en los tres puntos de muestreo en la Laguna.

Estación del año	Temperaturas en cada estación de monitoreo (°C)		
	Sector Desagüe	Puntilla el León	Casa de Bombas
Otoño	15,9	15,8	15,6
Invierno	13,5	13,5	13,8
Primavera	24,3	23,9	24,3
verano	26,3	26,1	26,2

### 3.1.4 Conductividad Eléctrica

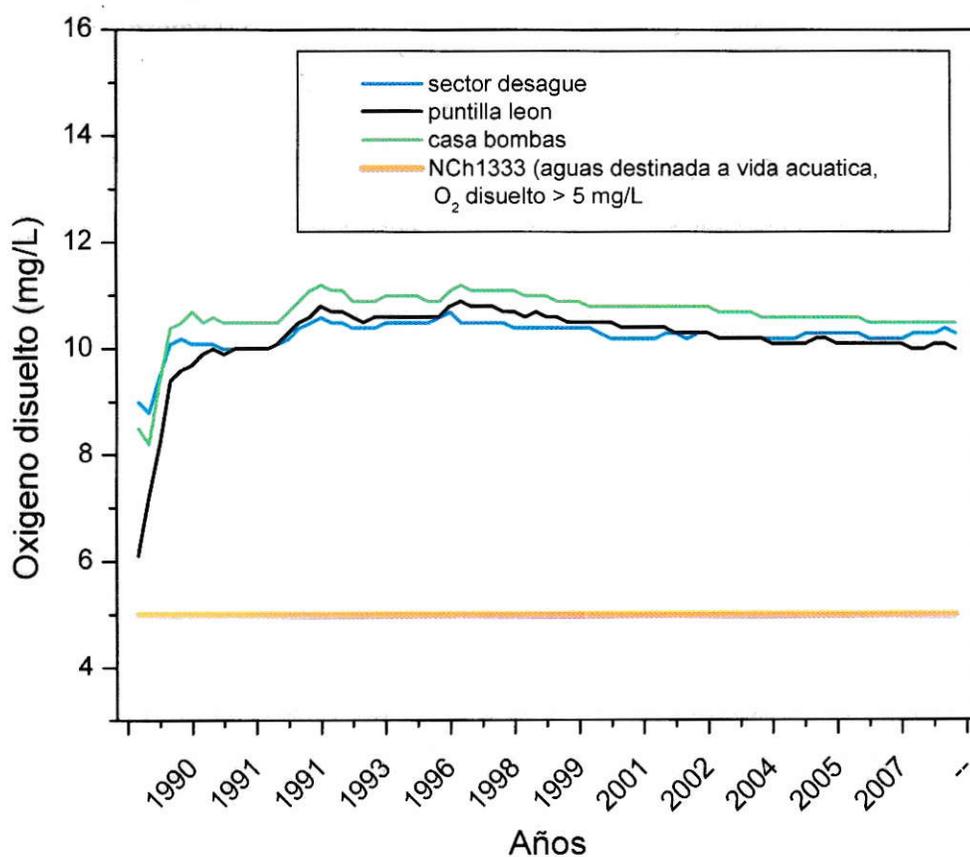
La conductividad eléctrica (CE) superficial de las aguas de la Laguna de Aculeo, mostró un comportamiento que tiende a aumentar, sin superar la NCh1333 para el uso de aguas destinadas a riego (Figura 11). Se observaron en los promedios acumulados dos tendencias, una desde 1988 hasta 1998 con una conductividad eléctrica para las tres estaciones que no superó los 60  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; y otra desde el año 1999 hasta la fecha, llegando a valores sobre los 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Siendo la estación Puntilla de León, la que presentó los valores más altos.



**Figura 11.** Promedios Acumulados de Conductividad eléctrica superficial en el tiempo. Comparación con NCh1333 y entre estaciones.

### 3.1.5 Oxígeno Disuelto

El comportamiento del oxígeno disuelto (OD) superficial en la laguna de Aculeo, mostró similitud entre las estaciones en el periodo de tiempo analizado, los promedios acumulados indican que las aguas poseen 10,5 mg/L de oxígeno disuelto en promedio. Según la NCh1333, estas aguas serian aptas para mantener la vida acuática, superando ampliamente el valor mínimo permitido (5 mg/L).



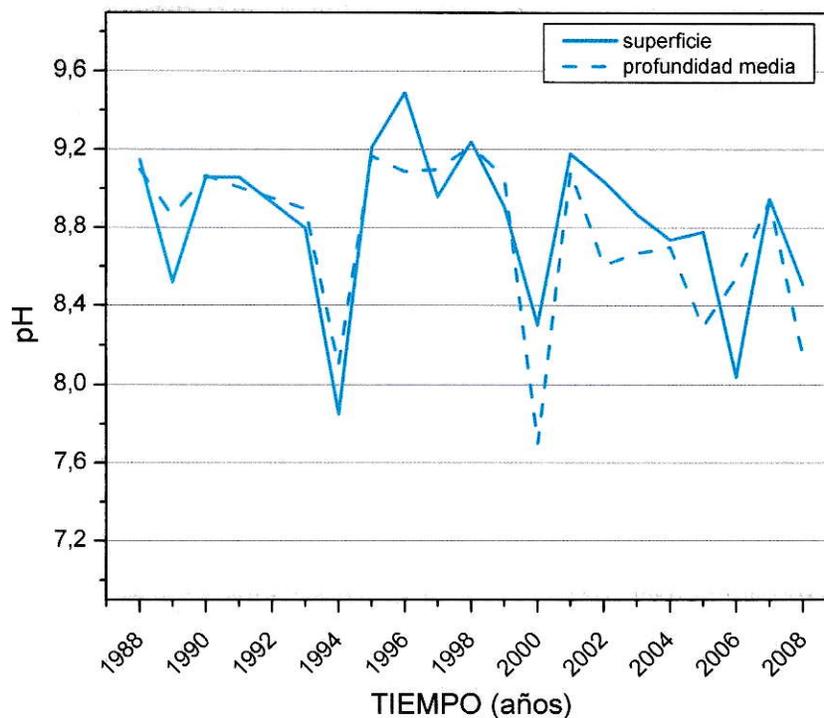
**Figura 12.** Promedios Acumulados de Oxígeno disuelto superficial en el tiempo. Comparación con NCh1333 y entre estaciones.

### 3.2 Comportamiento de Variables en Perfil de Profundidad

El análisis de datos desarrollado en este ítem, involucra promedios anuales de las mediciones realizadas estacionalmente en la Laguna, se obtiene también su tasa de cambio (realizando la regresión lineal de los datos, donde la pendiente de la curva es dicha tasa). Para la variable Temperatura, en cambio, se realizan curvas de acuerdo a la estación del año.

#### 3.2.1 pH

##### a) Sector Desagüe

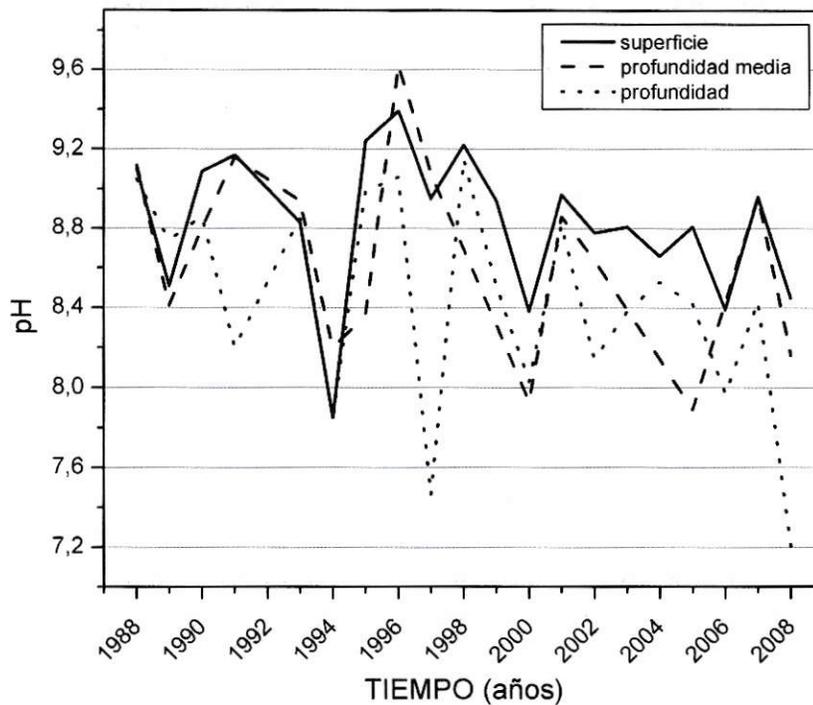


**Figura 13.** Perfil para profundidad de pH en el tiempo, Sector Desagüe

La figura muestra que en el perfil de profundidad, el pH se comporta similar en el perfil muestreado, se observan curvas sin una tendencia clara, sin embargo, se obtuvieron las tasas de cambios, y se encontró que las curvas en el tiempo tienden a

disminuir, así en superficie la tasa fue de  $-0,015$  unidades de  $\text{pH año}^{-1}$ , mientras que en profundidad media, la tasa fue  $-0,028$  unidades de  $\text{pH año}^{-1}$ , lo que nos indica que el pH en el tiempo ha ido disminuyendo en profundidad, siendo éste el que experimenta el mayor descenso. Debido a una poca cantidad de datos en el perfil más profundo, éste no es considerado dentro de este análisis, sin embargo, se puede consultar en el Anexo III.

b) Frente Puntilla el León

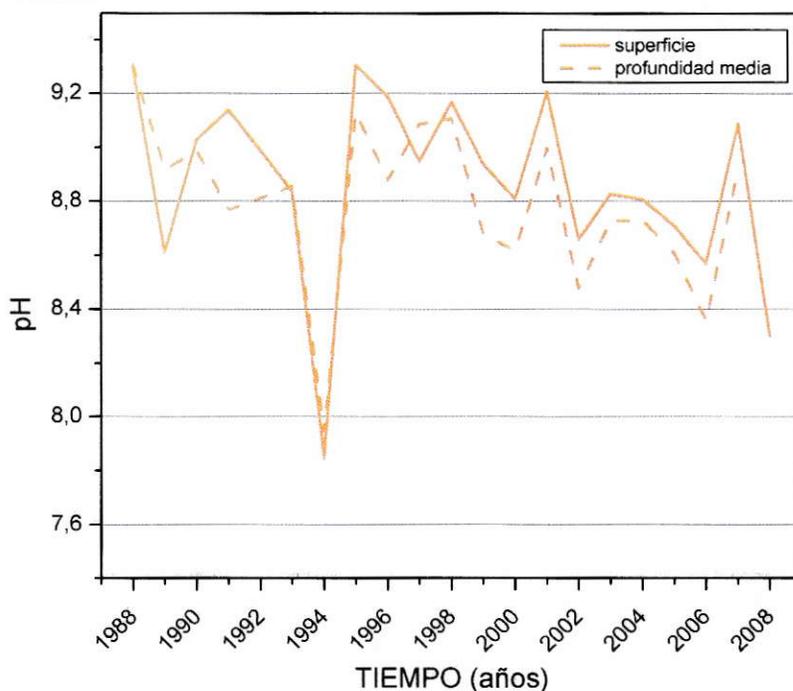


**Figura 14.** Perfil de profundidad para pH en el tiempo, Frente Puntilla el León

Se observa que el perfil de profundidad, existen curvas con variaciones notorias en todo el perfil a lo largo del tiempo, producto de cambios en el sistema, observando que se comporta similar a la estación sector desagüe, es decir se observa que en profundidad el pH tiende a valores un poco más ácidos, que los registros de pH en superficie, donde los pH son 8,8. Se distingue de la gráfica los últimos registros de pH,

donde se tiene una tendencia a la disminución en todo el perfil de profundidad. Ello se comprueba con las tasas de cambio encontradas, las cuales tendieron a disminuir. Así para la superficie, se encontró una tasa de decrecimiento de  $0,015$  unidades de  $\text{pH año}^{-1}$ , la tasa de cambio en profundidad media de la laguna fue  $-0,027$ , mientras que la tasa en profundidad alcanzó  $-0,039$  unidades de  $\text{pH año}^{-1}$ , obteniendo al igual que la estación anterior, la tasa de cambio mayor del pH en el tiempo, en la zona más profunda de la laguna.

c) Casa de Bombas



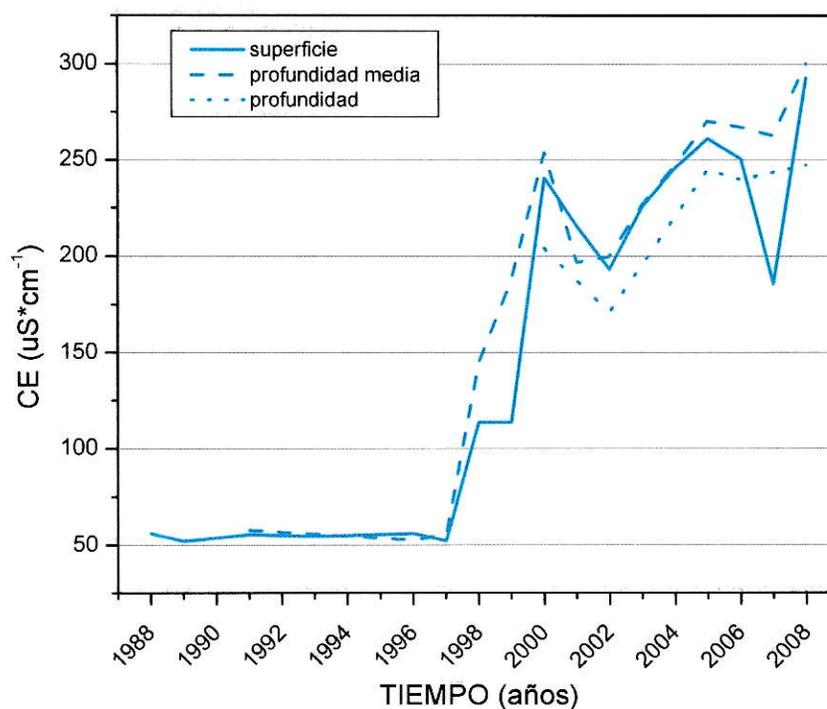
**Figura 15.** Perfil de profundidad para pH en el tiempo, Casa de Bombas

La variable pH se mostró en forma decreciente en el perfil. Así en superficie tuvo un pH cercano a 9 unidades, comportamiento que se asemeja a lo encontrado en profundidad media, donde los valores de pH se encontraron más bajos que en superficie, pero igualmente similares. Se obtuvieron las tasas de cambio para todo el

perfil, encontrando en superficie una tasa de decrecimiento de  $0,014$  unidades de  $\text{pH año}^{-1}$ , mientras que en profundidad media, la tasa de cambio fue  $-0,018$  unidades de  $\text{pH año}^{-1}$ , observándose nuevamente el patrón encontrado en las dos estaciones anteriores, donde se ve que hacia la profundidad los pH tienden a tornarse menos básicos que en superficie. Debido a una poca cantidad de datos en el perfil más profundo, éste no es considerado dentro de este análisis, sin embargo, se puede consultar en el Anexo III.

### 3.2.2 Conductividad Eléctrica

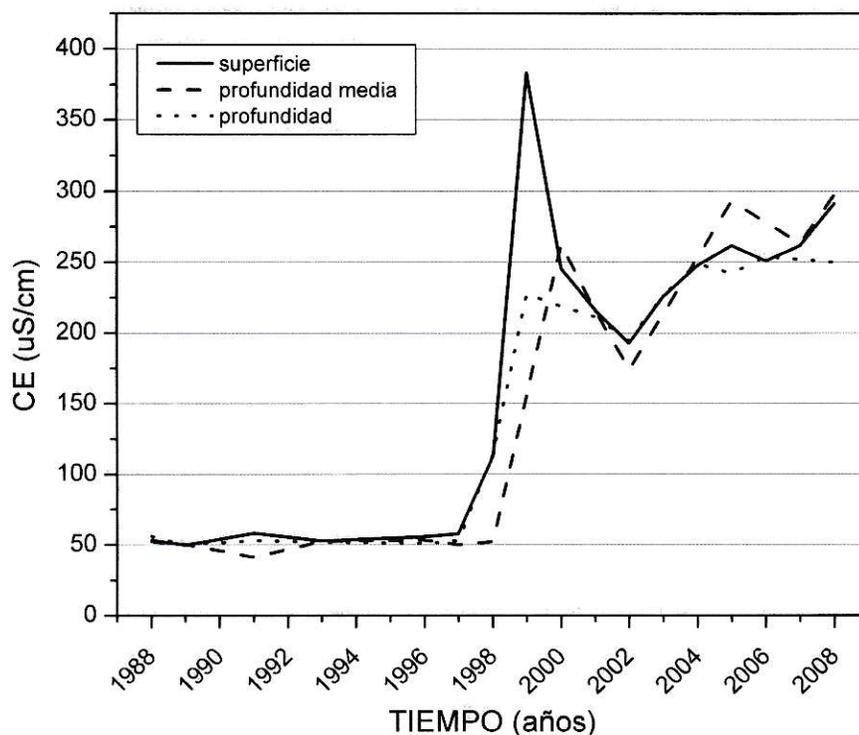
#### a) Sector Desagüe



**Figura 16.** Perfil de profundidad para Conductividad Eléctrica en el tiempo, Sector Desagüe

La conductividad eléctrica en todo el perfil de profundidad se presentó con un aumento a partir del año 1998, comparado con la década en que los rangos no superaban los  $70 \text{ uScm}^{-1}$ . La conductividad aumentó al doble y triple en sus valores, registrándose valores (en promedios anuales) sobre los  $200 \text{ uScm}^{-1}$  en la tres profundidades muestreadas. Las tasas de cambio encontradas para las diferentes profundidades fueron, para la superficie, creciente,  $12,747 \text{ uScm}^{-1}\text{año}^{-1}$ , para profundidad media, una tasa de  $16,239 \text{ uScm}^{-1}\text{año}^{-1}$ , y para la profundidad, una tasa de  $8,22 \text{ uScm}^{-1}\text{año}^{-1}$ , observando claramente las tasas en aumento, notando que el mayor aumento por año lo tiene la superficie, mientras que la conductividad aumenta en menor medida en profundidad.

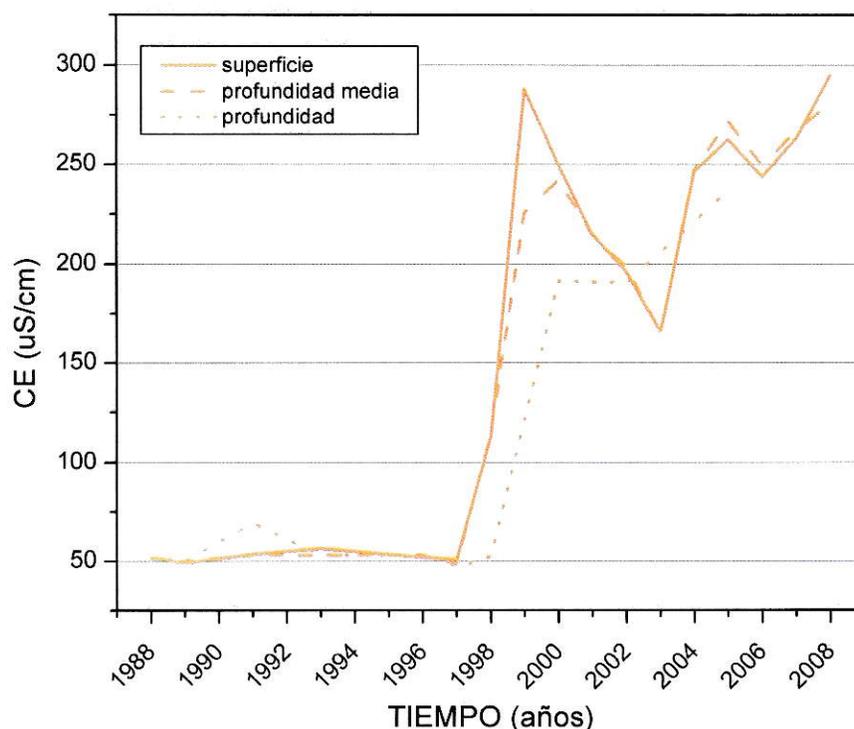
b) Frente Puntilla el León



**Figura 17** . Perfil de profundidad para Conductividad Eléctrica en el tiempo, Frente Puntilla el León

Al igual que la estación anterior, se presentó ese aumento de conductividad en el año 1998, pero en esta estación el aumento en la superficie es mayor, ya que de promedios anuales que no superaron los 60  $\mu\text{Scm}^{-1}$ , en la última década, se han registrado valores de conductividad en superficie 6 veces mayores. En general siendo este sector el más profundo de la laguna, con profundidad máxima promedio de 5 metros, no se observaron grandes variaciones en el perfil. Sus tasas de cambio, como fue esperado, tendieron a un aumento de la conductividad en el tiempo, así la tasa de crecimiento en la superficie fue  $13,662 \mu\text{Scm}^{-1}\text{año}^{-1}$ , mientras que para la profundidad media, fue de  $14,309 \mu\text{Scm}^{-1}\text{año}^{-1}$ , y para la zona más profunda de la estación y de la laguna, la tasa fue  $13,065 \mu\text{Scm}^{-1}\text{año}^{-1}$ .

c) Casa de Bombas



**Figura 18.** Perfil de profundidad para Conductividad Eléctrica en el tiempo, Casa de Bombas

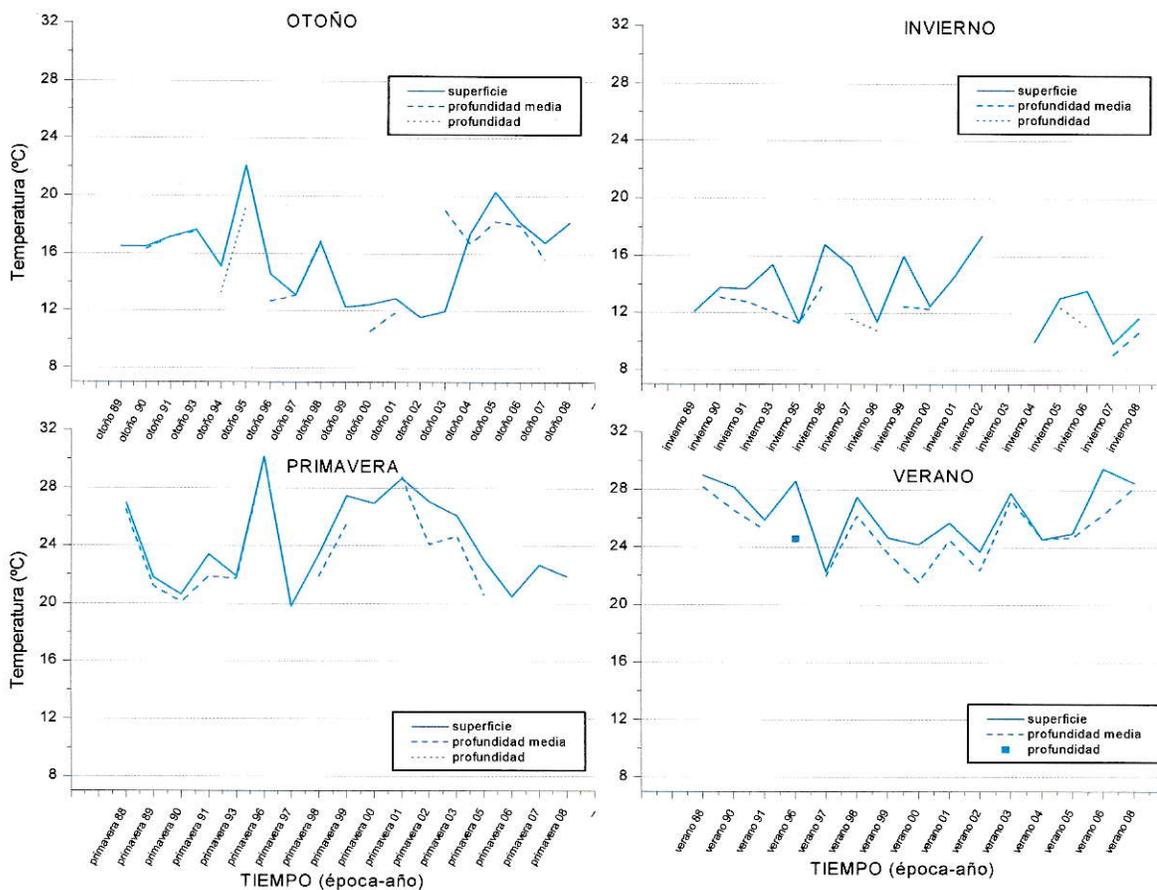
Sin duda, la tendencia del aumento notorio de la conductividad en el año 1998, es aplicable a toda la laguna, observándose también que este sector, la zona menos profunda de todo el cuerpo de agua (2,5 metros en profundidad máxima), posee valores altos de conductividad en superficie y en su profundidad media, mientras que valores un poco menores en profundidad.

Las tasas de cambio son, para la superficie,  $13,445 \text{ uScm}^{-1}\text{año}^{-1}$ , para la profundidad media,  $13,507 \text{ uScm}^{-1}\text{año}^{-1}$ , y para las mediciones en profundidad la tasa es de  $10,613 \text{ uScm}^{-1}\text{año}^{-1}$ , lo que muestra que el cambio mayor anualmente en la concentración de iones, ocurre en profundidad media, aunque la tasa en superficie es un poco menor, tasa que se distancia de la encontrada en profundidad.

### 3.2.3 Temperatura

Las figuras siguientes se pueden relacionar con la tabla 7, donde muestran los promedios en superficie de la variable Temperatura separada por estación del año.

#### a) Sector Desagüe



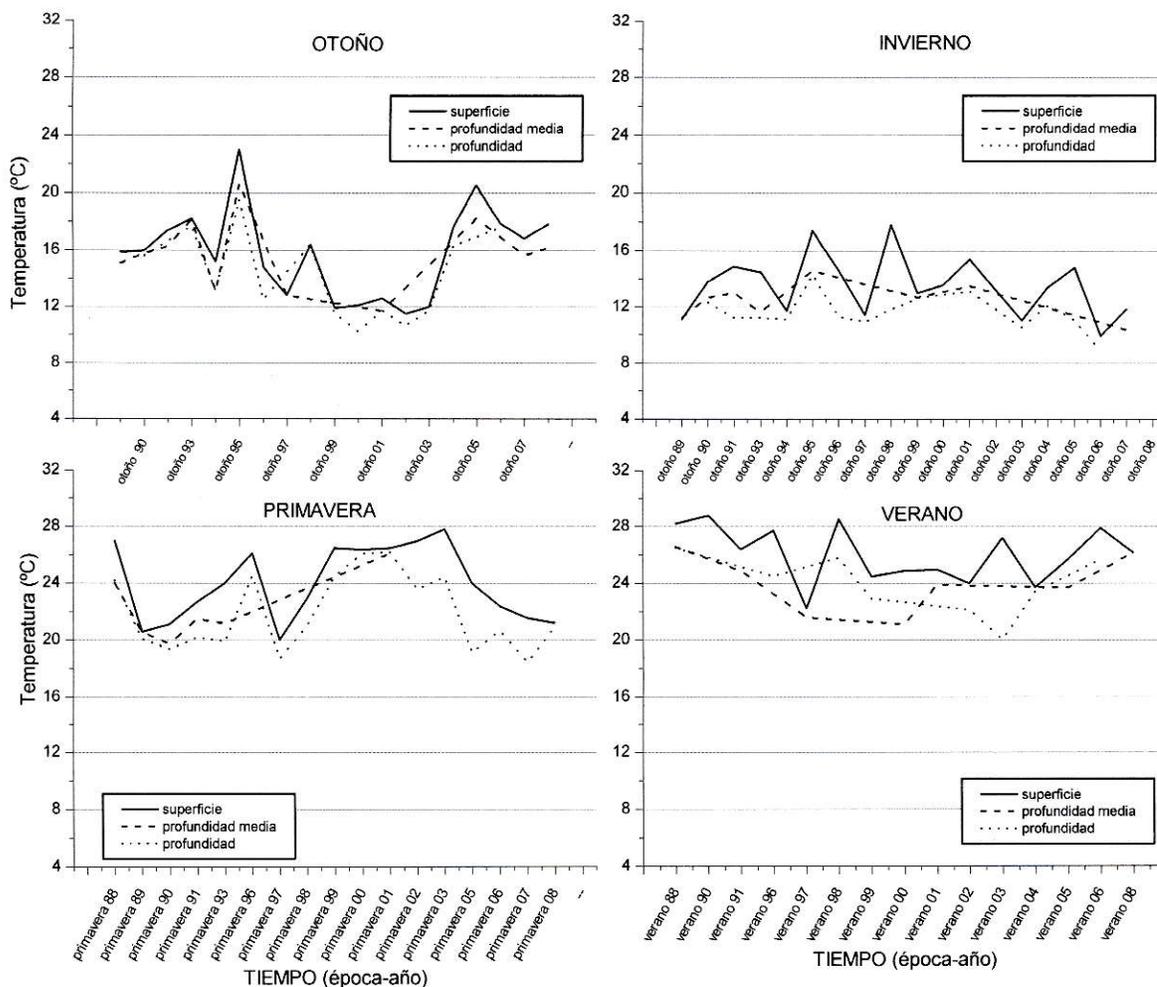
**Figura 19.** Perfil de profundidad para Temperatura en el tiempo según estación del año, Sector Desagüe

De la figura anterior, se observa claramente que la Temperatura varió a lo largo del año, ya que las temperaturas máximas para la laguna se registraron en verano, con un promedio de 26,3 °C en superficie y 24,6 °C en profundidad, mientras que las

menores Temperaturas se encontraron en invierno, donde en promedio se alcanzó los 13,5 °C en superficie y 12 °C en profundidad. Las estaciones de otoño y primavera fluctuaron entre 15,9 °C y 24,3 °C en superficie, respectivamente y en profundidad entre 14,4 °C y 21,7 °C, respectivamente. Respecto al comportamiento de esta variable en el perfil de profundidad, se puede observar que en este sector, la Temperatura fue muy similar en superficie que en profundidad, diferenciándose en promedio, entre 1 °C y 2 °C, tendencia que se mostró durante todo el año, en las 4 estaciones. Cabe destacar que en verano, sólo se registró un solo valor de Temperatura en profundidad, debido a que generalmente en esta época del año, el volumen de agua disminuye y no es posible tomar muestras de aguas a profundidades cercanas a las 5 m.

Se observa además una gran variabilidad de los datos, ya que de un otoño al otoño del siguiente año, la Temperatura cambió en 7 °C (otoño 1994 – otoño 1995).

b) Frente Puntilla el León



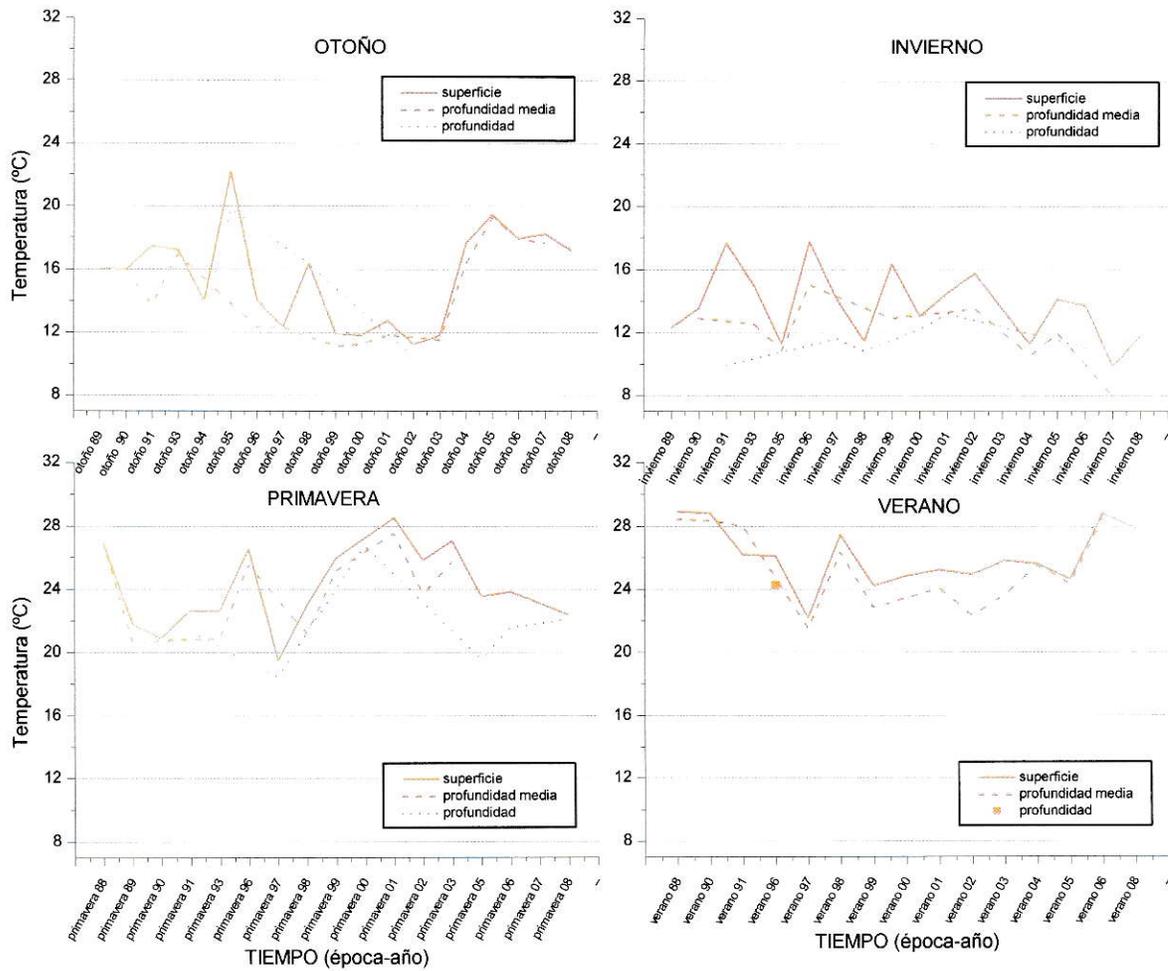
**Figura 20.** Perfil de profundidad para Temperatura en el tiempo según estación del año, Frente Puntilla el León

En este sector, zona media de la laguna, también se observó que la Temperatura promedio más baja ocurre en invierno y la más alta en verano, llegando estas sobre los 28 °C en superficie, de acuerdo al clima de la zona, esto es esperable en toda la laguna.

En relación con la tendencia en profundidad (siendo esta la zona que posee la mayor profundidad de la laguna), las Temperaturas encontradas en el fondo del cuerpo

de agua, distan en no más de 3 °C en promedio con las Temperaturas en superficie, inclusive en todas las estaciones del año.

c) Casa de Bombas



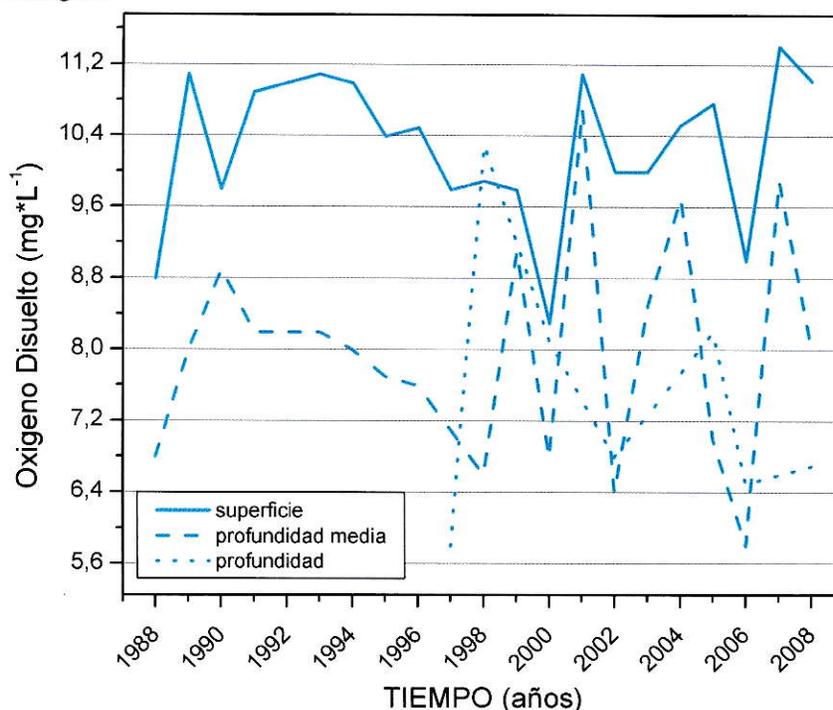
**Figura 21.** Perfil de profundidad para Temperatura en el tiempo según estación del año, Casa de Bombas

La figura muestra la tendencia ya encontrada en las otras dos estaciones de muestreo, donde queda claramente establecido que las Temperaturas mayores se registraron en superficie, y en verano, mientras las Temperaturas menores se

encontraron en invierno y en las zonas más profunda de cada sitio. Sin embargo, esta zona es la menos profunda de la laguna, por ende las Temperaturas en el perfil de profundidad distan en promedio 1 °C entre la superficie y la zona profunda.

### 3.2.4 Oxígeno Disuelto

#### a) Sector Desagüe

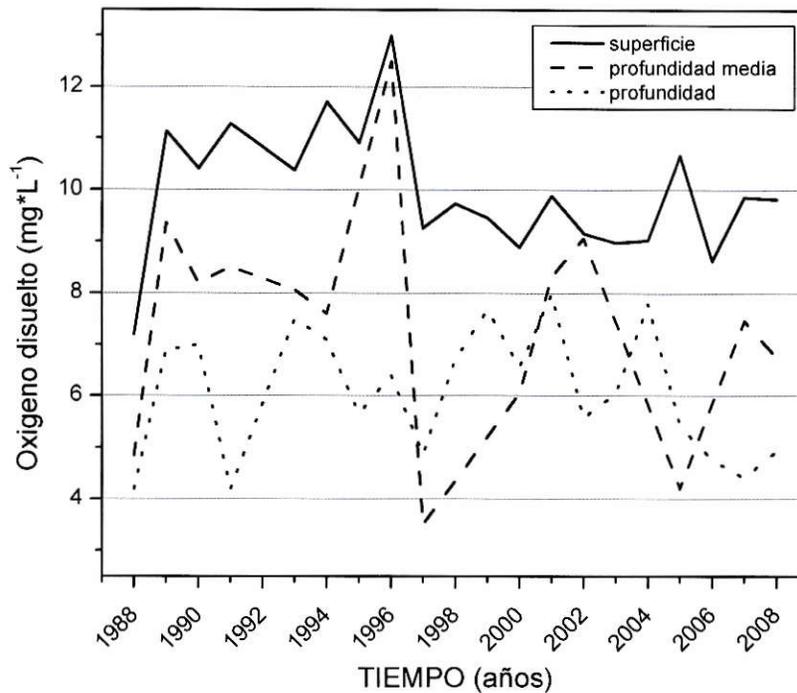


**Figura 22.** Perfil de profundidad para Oxígeno Disuelto en el tiempo, Sector Desagüe

De la figura, se observa aumentos y bajas en las concentraciones de OD, por lo que se puede decir que ha permanecido constante en el tiempo, sin embargo, en el perfil de profundidad, se aprecia que en la superficie ha existido una mayor concentración de Oxígeno Disuelto que en profundidad. Las tasas de cambio para esta estación, son muy leves, registrando en superficie,  $0,010 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ ; en profundidad media  $0,013 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ ; y en profundidad una tasa de decrecimiento de

-0,100 mgL<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>, así mientras a profundidades menores, el OD tuvo una tendencia a aumentar levemente en el año; en profundidad la tendencia fue a disminuir en una razón mayor a lo que se aumenta en las zonas menos profundas.

b) Frente Puntilla el León

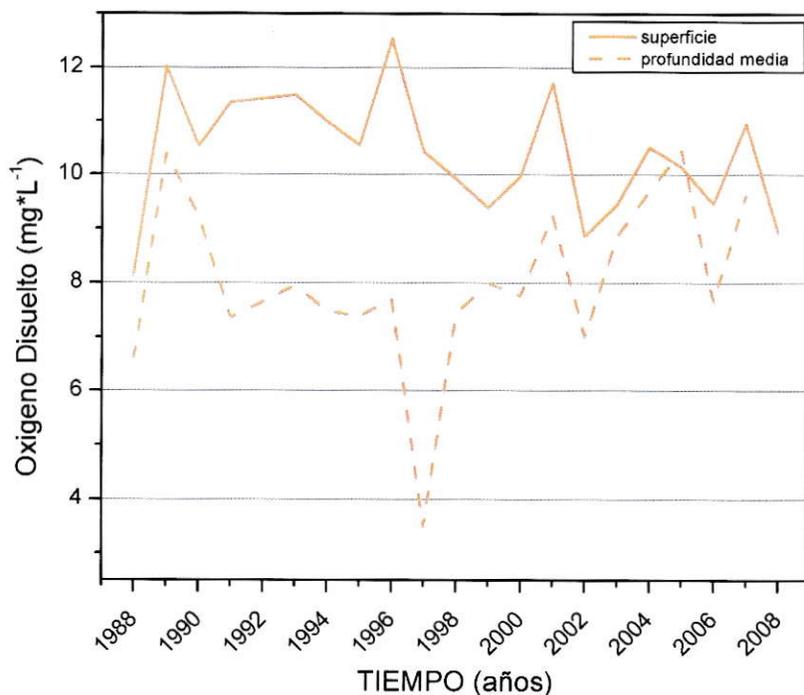


**Figura 23.** Perfil de profundidad para Oxígeno Disuelto en el tiempo, Frente Puntilla el León

La tendencia mostrada en el perfil de profundidad, indicó que las tres profundidades monitoreadas, se inclinaron a disminuir en el tiempo, ya que las tasas de cambio son decrecientes, así para la superficie se encontró, -0,051 mgL<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>; para la profundidad media, -0,063 mgL<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>; y para el perfil más profundo -0,024 mgL<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. Además se observó que en superficie se presentan los mayores valores en promedios

anuales de Oxígeno Disuelto, mientras que al aumentar la profundidad, el Oxígeno Disuelto disminuye.

c) Casa de Bombas

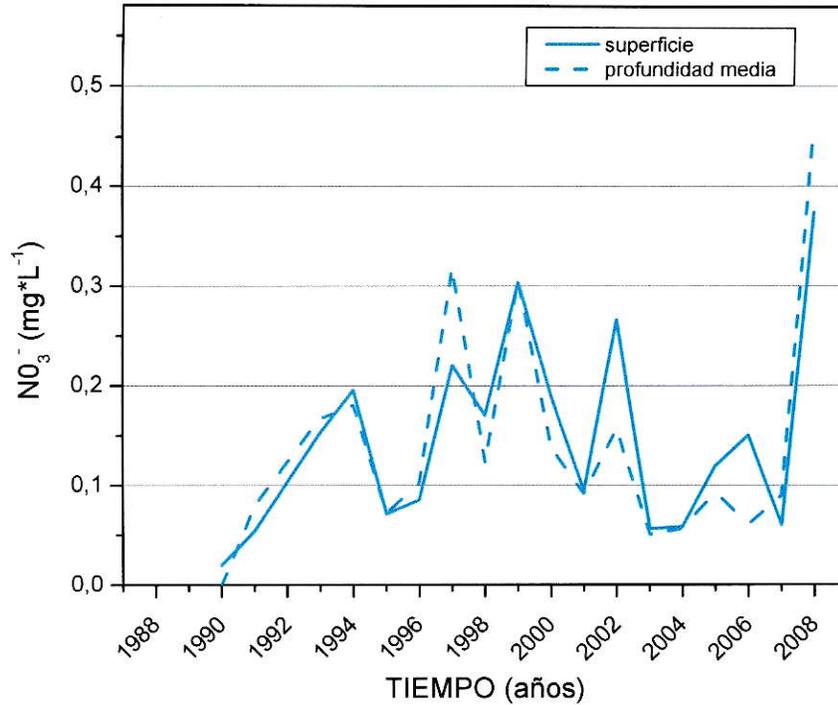


**Figura 24.** Perfil de Profundidad para Oxígeno Disuelto en el tiempo, Casa de Bombas

En la estación Casa de Bombas, la tendencia en el perfil de profundidad, fue relativa, ya que en superficie la tasa de cambio fue decreciente, y en la profundidad media la tasa de cambio fue al aumento, así los resultados fueron: en superficie  $-0,054 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$  y en profundidad media  $0,061 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ . Se encontró la misma relación que en las dos estaciones de monitoreo anteriores, existió una mayor concentración de OD en superficie, y menor en profundidad. Debido a una poca cantidad de datos en el perfil más profundo, éste no es considerado dentro de este análisis, sin embargo, se puede consultar en el Anexo III.

### 3.2.5 Nitrato

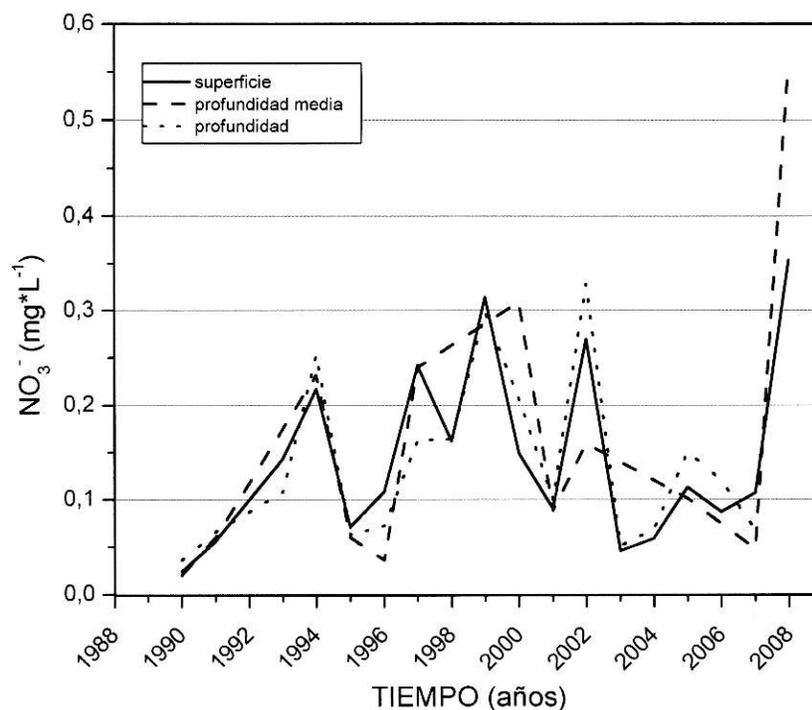
#### a) Sector Desagüe



**Figura 25.** Perfil de Profundidad para Nitrato en el tiempo, Sector Desagüe

Se observa en la figura que la concentración de Nitrato fue muy similar en todo el perfil para esta zona, se muestra también que se tiende al aumento (de acuerdo a los últimos años), encontrándose tasas de crecimiento en superficie  $0,005 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$  y en profundidad media  $0,004 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ . Debido a una poca cantidad de datos en el perfil más profundo, éste no es considerado dentro de este análisis, sin embargo, se puede consultar en el Anexo III.

b) Frente Puntilla el León



**Figura 26.** Perfil de profundidad para Nitrato en el tiempo, Frente Puntilla el León

En esta figura al igual que para la estación Sector Desagüe, las concentraciones en todo el perfil de profundidad, tendieron al aumento en el periodo de tiempo muestreado (1988-2008), se encontró en este último año, las concentraciones promedio más altas para esta zona, superando los 0,5 mgL<sup>-1</sup> en profundidad media. Las tasas de cambio encontradas, son para superficie, 0,004 mgL<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> para profundidad media 0,011 mgL<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> y para profundidad 0,002 mgL<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>.

c) Casa de Bombas

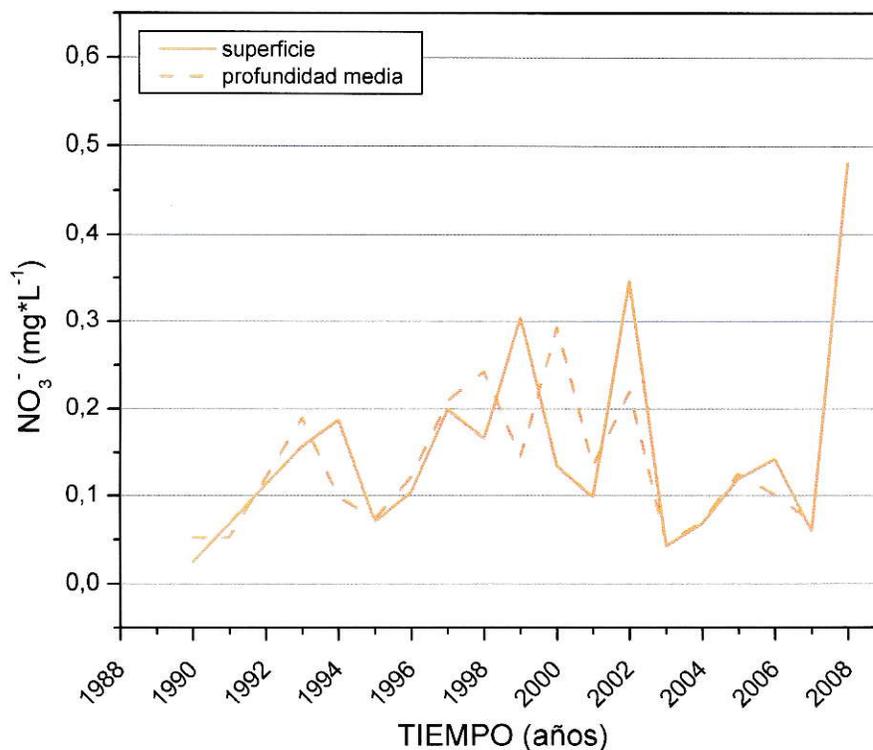
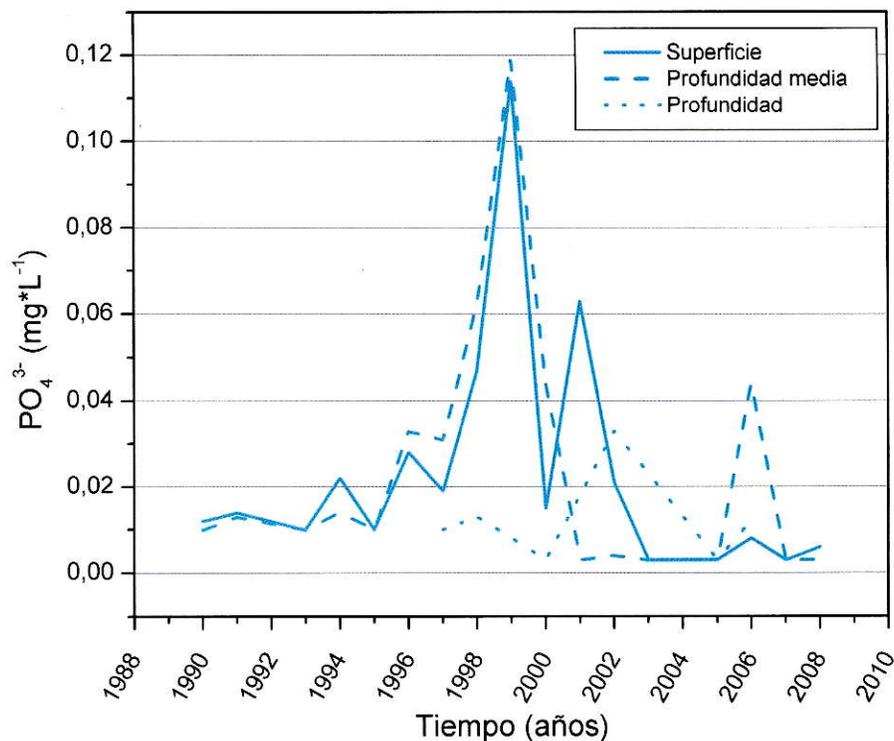


Figura 27. Perfil de profundidad para Nitrato en el tiempo, Casa de Bombas

Al igual que las dos estaciones anteriores, surge un aumento de las concentraciones de Nitrato en el tiempo, con tendencias al aumento, así en superficie,  $0,007 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$  y en profundidad media  $0,0004 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ . Debido a una poca cantidad de datos en el perfil más profundo, éste no es considerado dentro de este análisis, sin embargo, se puede consultar en el Anexo III.

### 3.2.6 Fosfato

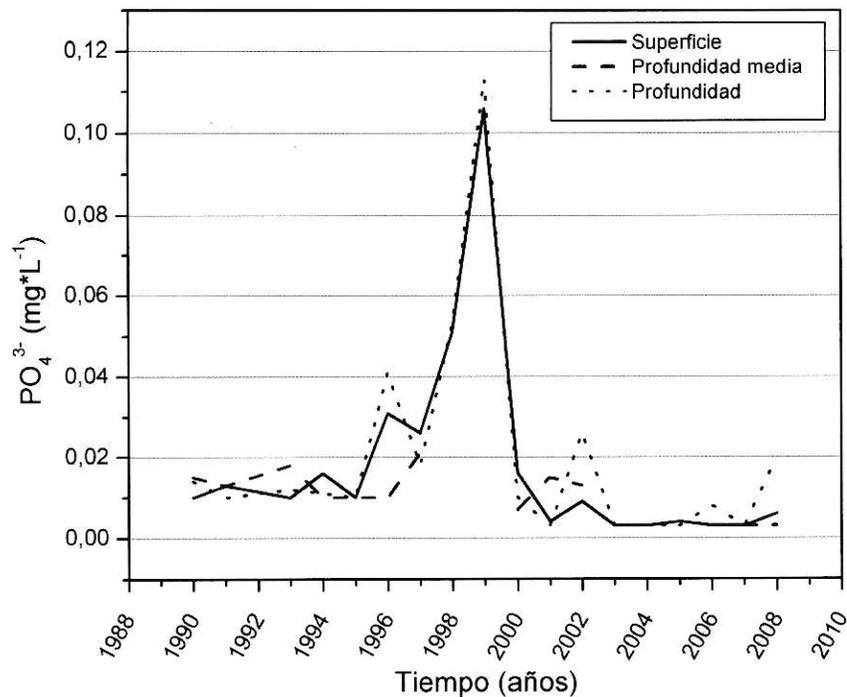
#### a) Sector Desagüe



**Figura 28.** Perfil de profundidad para Fosfato en el tiempo, Sector Desagüe

En esta variable se observó un fuerte crecimiento entre los años 1998-1999, se registró concentraciones casi 10 veces mayor. En cuanto al comportamiento con la profundidad, se puede decir que en las zonas superficiales las concentraciones son mayores en la mayoría de los puntos, mientras que en profundidad se encuentran concentraciones menores. Las tasas de cambio, en todo el perfil resultan ser decrecientes, siendo para superficie  $-7,2 \cdot 10^{-4} \text{ mgL}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ; para profundidad media  $-3,7 \cdot 10^{-4} \text{ mgL}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ; y para profundidad  $-2,5 \cdot 10^{-4} \text{ mgL}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ .

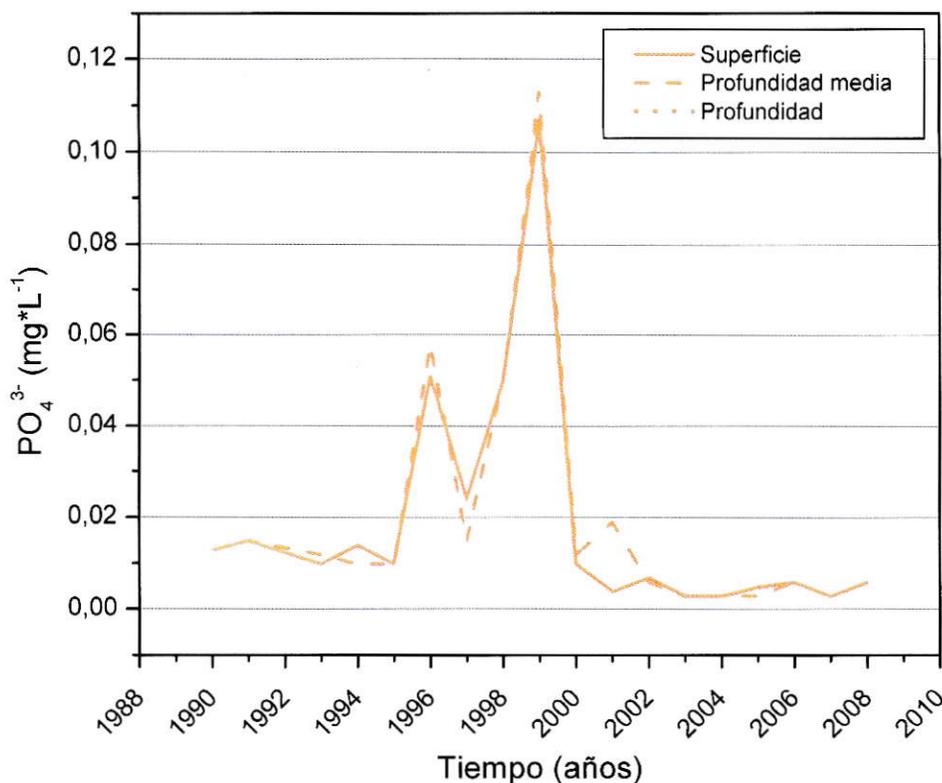
b) Frente Puntilla León



**Figura 29.** Perfil de profundidad para Fosfato en el tiempo, Frente Puntilla el León

La figura muestra el comportamiento en el tiempo del Fosfato en el sector medio de la Laguna y la zona más profunda. Se observó el mismo patrón que en el sector desagüe, un alza en las concentraciones de este nutriente en el año 1999 aprox. Las tasas de cambio encontradas, son decrecientes en el tiempo, así; en superficie -  $9,55 \cdot 10^{-4} \text{ mgL}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ; en profundidad media  $-6,21 \cdot 10^{-4} \text{ mgL}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ; y en profundidad -  $6,29 \cdot 10^{-4} \text{ mgL}^{-1} \text{ año}^{-1}$ .

c) Casa de Bombas

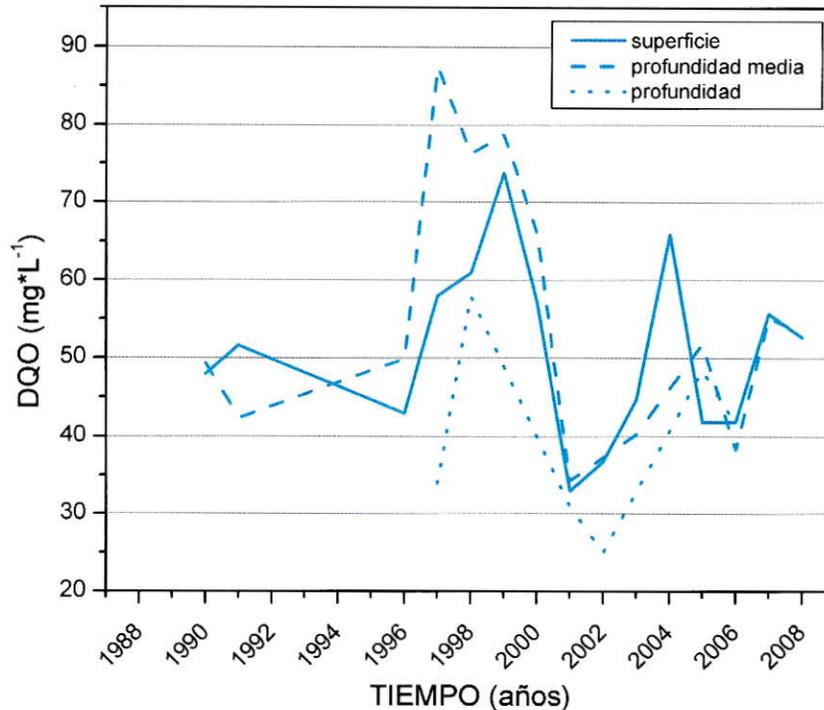


**Figura 30.** Perfil de profundidad para Fosfato en el tiempo, Casa de Bombas

Al igual que las dos estaciones anteriores, hubo un aumento en toda la columna de agua en la concentración de fosfato entre los años 1998-1999. Las tasas de cambio en sus curvas son, en superficie  $-11,1 \cdot 10^{-4} \text{ mgL}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ; en profundidad media  $-9,84 \cdot 10^{-4} \text{ mgL}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ; y en profundidad de  $-6,97 \cdot 10^{-4} \text{ mgL}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Por lo tanto, en el tiempo, tienden a disminuir las concentraciones. En relación con el perfil de profundidad, en esta zona se observó que en la gran mayoría de los años muestreados, las concentraciones no tuvieron gran variación de acuerdo a la profundidad, ya que se pudo encontrar concentraciones muy similares en superficie como en profundidad.

### 3.2.7 Demanda Química d Oxígeno (DQO)

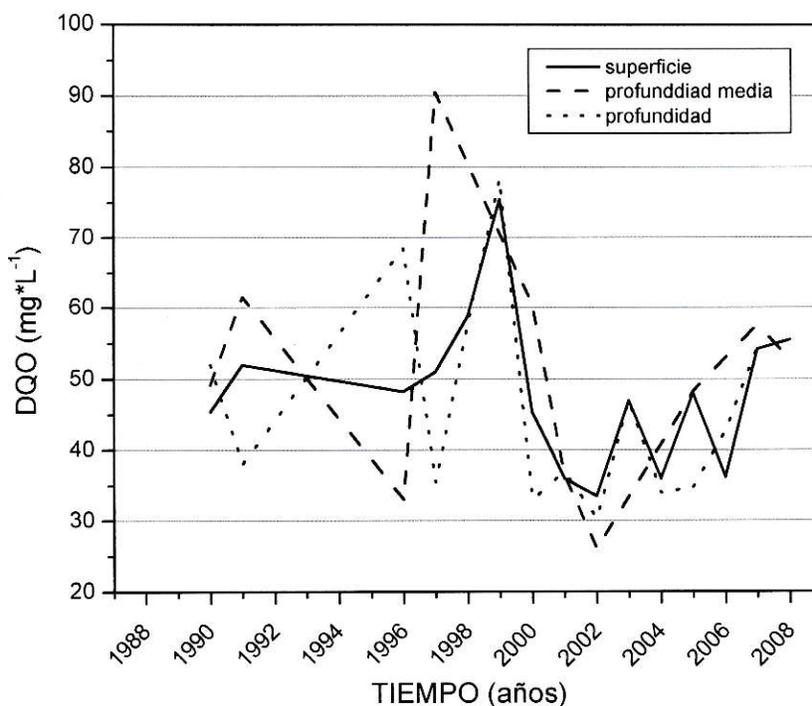
#### a) Sector Desagüe



**Figura 31.** Perfil de profundidad para DQO en el tiempo, Sector Desagüe

De la figura se tiene que hubo una gran variación en los datos en el periodo de tiempo monitoreado, siendo el tramo 1996-2000, los años en los cuales se aumentó en un 80% aproximadamente los valores registrados entre 1990-1996. En este periodo de alza en las concentraciones, se observó que aumenta aún mas las concentraciones en profundidad media que en profundidad. Sin embargo, las tasas de cambio de estas curvas en general tendieron a la disminución en el tiempo, así en superficie se encontró una tasa de  $0,162 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ ; en profundidad media  $-0,504 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ ; y en profundidad una tasa de  $-0,031 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ .

b) Frente Puntilla el León



**Figura 32.** Perfil de profundidad para DQO en el tiempo, Frente Puntilla el León

Al observar la figura y la variación que presenta la Demanda Química de Oxígeno en el tiempo, se distinguió al igual que en Sector Desagüe una alteración de las concentraciones significativa en el periodo 1996-2000. En relación al perfil de profundidad en este sector, se mostró que en la zona media se produce la mayor concentración registrada; sin embargo, para los años siguientes hubo un decrecimiento de las concentraciones mas bien homogéneo en todo el perfil. Las tasas de cambio para esta zona indicaron un decrecimiento en el tiempo para esta variable, así en superficie se encontró un  $-0,312 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ ; en profundidad media un  $-0,137 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ ; y en profundidad  $-0,582 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ .

c) Casa de Bombas

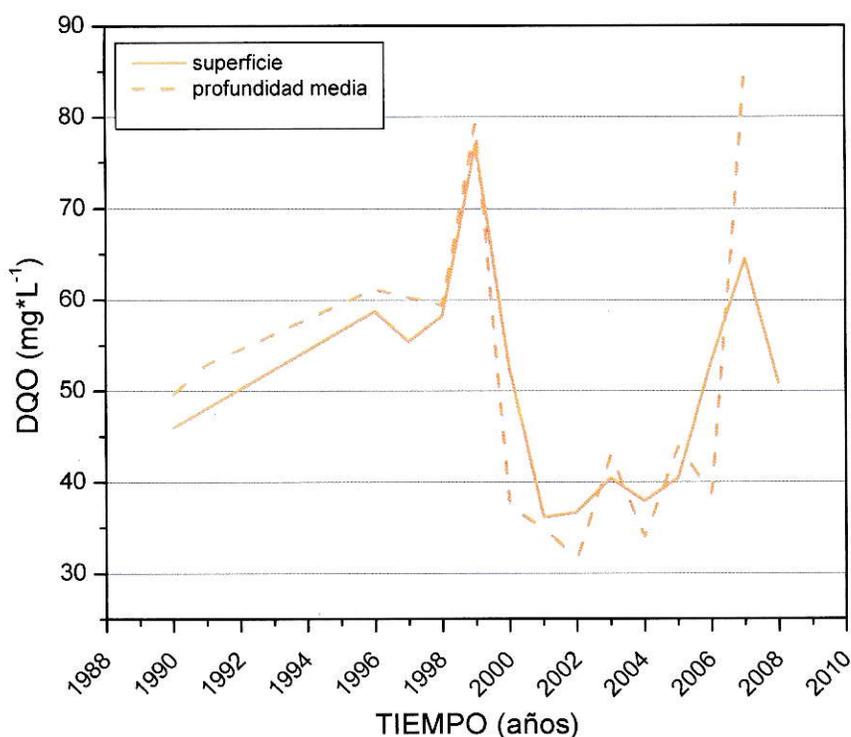


Figura 33. Perfil de profundidad para DQO en el tiempo, Casa de Bombas

De acuerdo a la figura anterior, se observó una tendencia variable en el tiempo, siendo los años 1999 y 2007, puntos donde se registraron las más altas concentraciones de DQO, mientras que entre los años 2001-2006, fue un periodo de bajas concentraciones. Según sus tasas de cambio, indicaron que esta variable tiende a la baja, así para la superficie, se encontró  $-0.318 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ ; y para profundidad,  $-0,323 \text{ mgL}^{-1}\text{año}^{-1}$ . Se observó además que los cambios de concentraciones con el tiempo, afectaron a toda la columna de agua.

### 3.3 Comportamiento Anual de las variables en la Laguna de Aculeo

Se consideró el monitoreo del año 2008, para ello se contó con los registros en las 4 estaciones del año, para las variables que se vieron afectadas por el proceso de eutrofización. Donde la medición en Enero equivale al verano; Abril a otoño; Julio a Invierno y Octubre a primavera.

**Tabla 8.** Variación anual de las variables para el año 2008 en Sector Desagüe.

SECTOR DESAGUE, 2008								
variable	Enero		Abril		Julio		Octubre	
	Sup.	Prof.	Sup.	Prof.	Sup.	Prof.	Sup.	Prof.
pH	8,77	8,7	9,12		8,53	7,6	7,62	7,43
CE	313,9	314	329,1		282,8	287,4	247,7	247,5
Temperatura	28,5	28,2	18,2		11,7	10,7	21,9	21,8
OD	9,4	8,86	15,67		12,07	7,18	6,93	6,73
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,073	0,073			0,675	0,839	2,42	3,7
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,003	0,003	0,003		0,003	0,003	0,013	0,013
DQO	51,4	61,1			54	45,4	15	15
Claridad	0,4		0,5		1		2,2	
Prof. Máxima		2,4		2				4,7
Ca <sup>2+</sup>	25,1	25,3	28,2		13,5	13,7	20	19,5
Mg <sup>2+</sup>	12,9	13	14,1		11,6	11,7	10,1	9,6
Na <sup>+</sup>	27,8	26,1	28,7		21	21,3	16,7	16,9
K <sup>+</sup>	3,6	3,5	4,1		2,8	2,9	2,3	2,2
Cl <sup>-</sup>	11,3	11,7	12,5		9,7	10,4	7,4	8,4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	27	22	27		22	22	19	19

Las variables están en unidades de concentración (mgL<sup>-1</sup>), a excepción de pH, CE (uScm<sup>-1</sup>)

\*Cabe destacar que las casillas en blanco, no fueron medidas.

**Tabla 9.** Variación anual de variables para el año 2008 en Frente Puntilla el León.

FRENTE PUNTILLA EL LEON, 2008								
variable	Enero		Abril		Julio		Octubre	
	Sup.	Prof.	Sup.	Prof.	Sup.	Prof.	Sup.	Prof.
pH	8,57	8,58	9,07	8,44	8,61	7,47	7,55	7,2
CE	313,9	314	329,1		273,5	280,6	247,9	249,9
Temperatura	26,14	26,14	17,81	16,2	11,81	10,37	21,24	20,93
OD	7,48	7,61	13,3	6,21	12,13	6,42	6,36	4,93
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,073	0,079			0,634	1,035	1,9	1,77
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,016	0,02
DQO	45,9	50,8			61,6	54,7	15	15
Claridad	0,6		0,5		1,1		1,8	
Prof. Máxima		3,5		3				5,6
Ca <sup>2+</sup>	24,8	24,6	28,5	28,1	12,7	12,5	19,4	19,4
Mg <sup>2+</sup>	13	13	14,3	11,2	11,3	11,7	9,6	9,9
Na <sup>+</sup>	26,6	27	29,3	28,6	20,9	21,3	17,5	17,2
K <sup>+</sup>	3,4	3,5	4,3	4,3	2,8	2,9	2,3	2,5
Cl <sup>-</sup>	12,9	11,9	11,6	11,9	9,1	9,4	8,4	8
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	22	22	27	27	21	23	18	18

Las variables están en unidades de concentración (mgL<sup>-1</sup>), a excepción de pH, CE (uScm<sup>-1</sup>)

\*Cabe destacar que las casillas en blanco, no fueron medidas.

**Tabla 10.** Variación anual de variables para el año 2008 en Casa de Bombas.

SECTOR CASA DE BOMBAS, 2008								
variable	Enero		Abril		Julio		Octubre	
	Sup.	Prof.	Sup.	Prof.	Sup.	Prof.	Sup.	Prof.
pH	8,68		8,92		7,9		7,68	7,55
CE	313,9	314,5	326,8		292,2		248	248
Temperatura	27,98		17,25		11,82		22,46	22,14
OD	9,31		10,34		8,87		7,28	7,11
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,071				0,893		2,16	1,77
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>		0,068			0,003	0,003	0,016	0,016
DQO	49,8				52		15	15
Claridad	0,5				1,2		2	
Prof. Máxima		1,4		1				3,5
Ca <sup>2+</sup>	25,3		27,3		12,9		19,7	19,5
Mg <sup>2+</sup>	13		14		11,9		10,1	9,9
Na <sup>+</sup>	28,2		28,6		21,9		16,9	3,5
K <sup>+</sup>	3,5		4,1		2,9		2,5	2,5
Cl <sup>-</sup>	13,9		12,9		10,4		8,4	8,4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	22		27		24		18	16

Las variables están en unidades de concentración (mgL<sup>-1</sup>), a excepción de pH, CE (uScm<sup>-1</sup>)

\*Cabe destacar que las casillas en blanco, no fueron medidas.

Las tablas 8, 9 y 10, mostraron el comportamiento anual de diferentes variables, alguna de las cuales tuvieron una misma tendencia, como en general los macroelementos (aniones y cationes solubles), que presentaron un aumento de las concentraciones en los meses de otoño, y una disminución en primavera, en el siguiente orden: Otoño > Verano > Invierno > Primavera. Similarmente a lo que ocurre en los parámetros de pH y Oxígeno Disuelto, que aumentaron los meses de Otoño, aquí el pH fue el más básico de todo el año y la concentración de OD superó los 10 mg/L en las tres estaciones en superficie. Luego disminuyeron en primavera, encontrando valores cercanos a los 6 mg/L.

En el caso de los nutrientes como Nitrato y Fosfato se observó claramente un aumento en Octubre (primavera), a excepción de la estación Casa de Bombas, que en el caso de fosfato, la concentración más alta se registró en Verano.

La profundidad máxima se produjo en primavera, mientras que la menor profundidad se registró en otoño. Para la temperatura en cambio, ésta se presentó en verano, luego en primavera, otoño y los registros más bajos, se encontraron en invierno.

Según a los datos entregados por DGA, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) presentó valores altos los meses de invierno para Frente Puntilla el León y Casa de Bombas, mientras que para Sector Desagüe, el máximo se registró en verano.

Para Claridad, medida por disco Secchi, los registros indicaron que el aumento en este parámetro ocurrió en primavera, mientras que en verano se encontraron los mínimos.

### 3.4 Caracterización de los Sedimentos

Los cálculos se encuentran explicados en Anexo I.

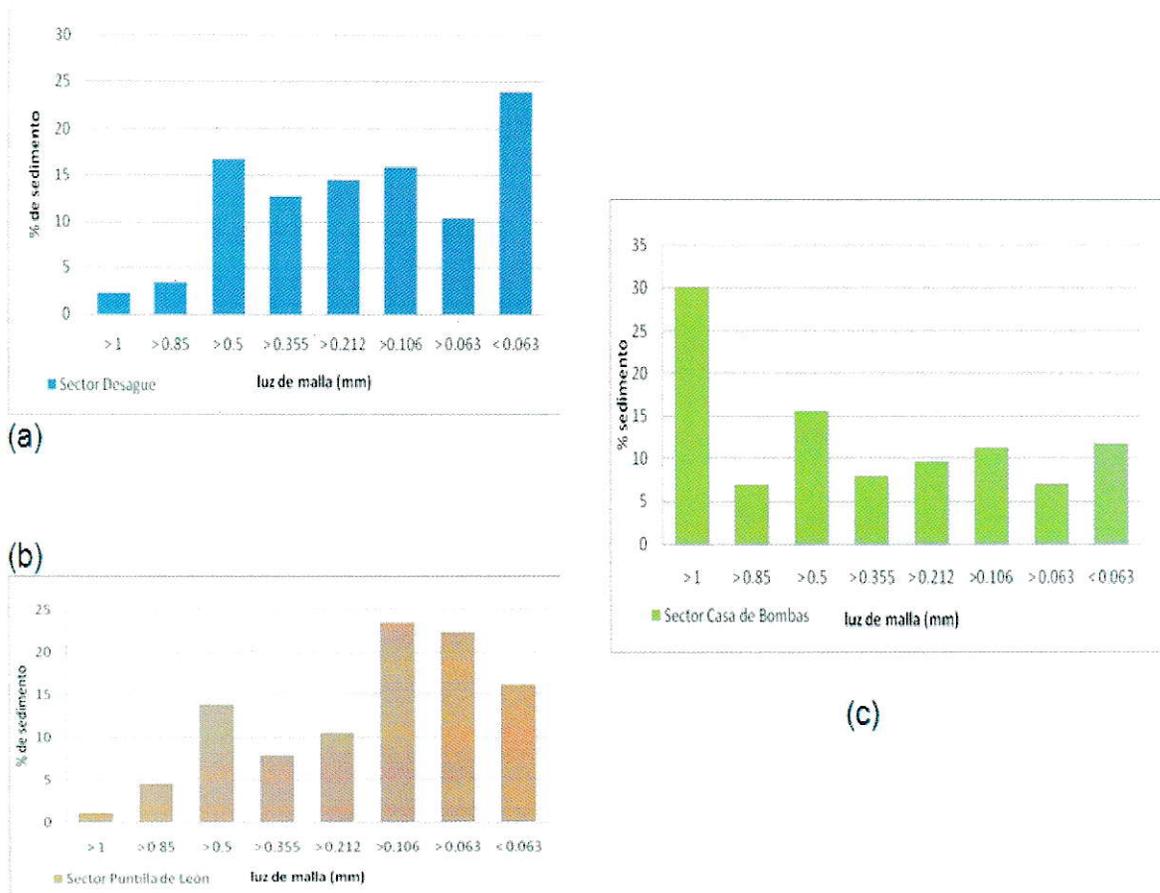
#### 3.4.1 Variables Físicoquímicas

**Tabla 11.** Variables fisicoquímicas, resultados de sedimentos.

<b>Parámetro/Estación</b>	<b>Sector Desagüe</b>	<b>Frente Puntilla el León</b>	<b>Casa de Bombas</b>
pH	7,6	6,7	5,7
Conductividad eléctrica (dS/m)	0,73	1,04	0,71
Materia Orgánica (%)	2,48	5,86	13,41

Se observó que en los resultados de las variables principales hubo diferencias entre las tres estaciones de monitoreo, encontrándose valores de pH medianamente ácido para la estación Casa de Bombas, mientras que neutro para la estación Frente Puntilla León y medianamente básico para Sector Desagüe, según clasificación de la tabla 16. En relación con la conductividad eléctrica, los valores encontrados indicaron que los sedimentos contienen altas cantidades de iones, registrándose en la estación que posee la mayor profundidad, el valor más alto de conductividad, mientras que en la estación menos profunda, la conductividad fue menor. Con respecto a la materia orgánica fácilmente oxidable, se encontró que la estación que posee una mayor cantidad de este parámetro es la Estación Casa de Bombas, coherente con menor pH.

### 3.4.2 Granulometría



**Figura 34.** Granulometría encontrada por estación de muestreo: (a) Sector Desagüe, (b) Frente Puntilla el León, (c) Casa de Bombas

En general se obtuvo tamaños diversos de partículas de sedimentos en las tres estaciones. Se observó que la estación Casa de Bombas posee un porcentaje mayor de material grueso, diferenciándose de las otras dos estaciones que presentaron el más bajo porcentaje de este tamaño de partícula y alto porcentaje de tamaños medio y finos (menores a 0,5 mm).

### 3.4.3 Macroelementos

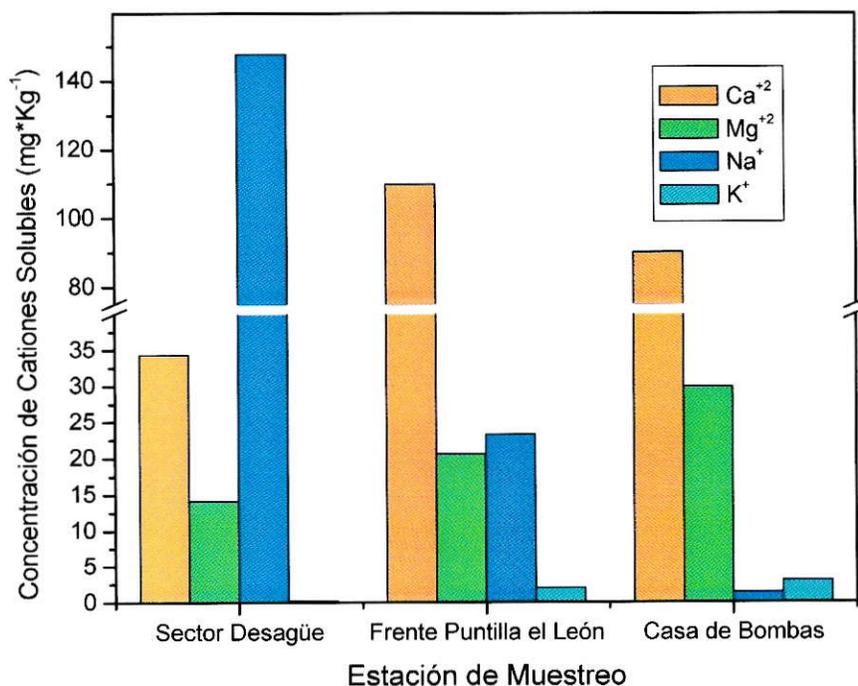
#### 3.4.3.1 Bicarbonato

**Tabla 12.** Concentración de Bicarbonato en sedimentos de la Laguna de Aculeo.

Estación	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mgKg <sup>-1</sup> )
Sector desagüe	223,57 ± 3,99
Frente puntilla el león	156,47 ± 15,26
Casa de Bombas	572,28 ± 3,05

Se distinguió que la estación que presentó la menor cantidad del ion bicarbonato es Frente Puntilla el León, mientras que la estación menos profunda (Frente Casa de Bombas) que registró la mayor concentración.

#### 3.4.3.2 Cationes Solubles

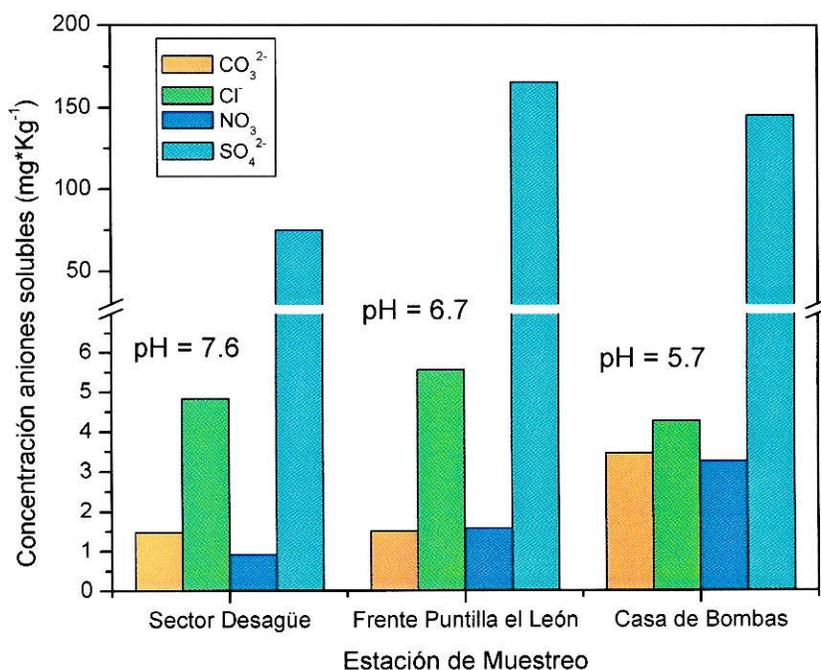


**Figura 35.** Concentraciones de cationes solubles registradas en sedimentos de la Laguna de Aculeo.

De la figura se observa que hay cationes que predominan en cada sitio, así en la estación sector Desagüe, el catión que se encontró en mayor cantidad es el ion Sodio, mientras que para las otras dos estaciones (Frente Puntilla de León y Frente Casa de Bombas) el catión predominante fue el ion Calcio. Las relaciones encontradas son:

- En sector Desagüe:  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$
- En sector Frente Puntilla el León:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$
- En el sector Casa de Bombas:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$

### 3.4.3.3 Aniones Solubles



**Figura 36.** Concentraciones de aniones solubles registradas en sedimentos de la Laguna de Aculeo.

Se observa de la figura, un comportamiento similar al ocurrido en los cationes solubles, ya que en esta gráfica también se observaron aniones que predominan sobre los otros, como el ion sulfato y cloruro, mientras que los aniones carbonato y nitrato se encontraron por debajo de los principales.

Las relaciones encontradas son.

- En sector Desagüe:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{NO}_3^-$
- En sector Frente Puntilla el León:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$
- En el sector Casa de Bombas:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{NO}_3^-$

#### 3.4.3.4 Fósforo Disponible (Fosfato)

**Tabla 13.** Concentración de Fosfato en sedimentos de la Laguna de Aculeo.

Estación	$\text{PO}_4^{3-}$ ( $\text{mgKg}^{-1}$ )
Sector desagüe	$16,37 \pm 0,08$
Frente puntilla el león	$57,52 \pm 0,18$
Casa de Bombas	$64,15 \pm 0,00$

De la tabla anterior, se puede decir Casa de Bombas posee una mayor concentración de Fosfato en sus sedimentos, mientras que Sector Desagüe, presenta menos de la tercera parte que lo encontrado en Casa de Bombas, en Frente Puntilla el León en cambio, posee una concentración de Fosfato muy cercana a Casa de Bombas.

### 3.5 Análisis Relación Agua-Sedimento

Se realizó ocupando los resultados obtenidos en la campaña de monitoreo Primavera 2008, donde se muestreó agua y sedimento de la Laguna de Aculeo en las tres zonas principales. En el Anexo I, punto 2, se explican todos los cálculos para obtener estos resultados. En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos:

**Tabla 14.** Tabla comparativa de resultados obtenidos en agua y sedimentos en la Laguna de Aculeo. (a) Variables Principales, (b) Macroelementos.

(a)

Estación/ Parámetro	Sector Desagüe			Frente Puntilla León			Casa de Bombas		
	Sup.	Prof.	Sed.	Sup.	Prof.	Sed.	Sup.	Prof.	Sed.
pH	7,62	7,43	7,60	7,55	7,20	6,70	7,68	7,55	5,70
CE ( $\mu\text{Scm}^{-1}$ )	247,7	247,5	730,0	247,9	249,9	1040,0	248,0	248,0	710,0
DQO ( $\text{mgL}^{-1}$ ) / MO (%)	15,0	15,0	2,5	15,0	15,0	5,9	15,0	15,0	13,4
$\text{NO}_3^-$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )	2,42	3,70	1,39	1,90	1,77	1,82	2,16	1,77	1,99
$\text{PO}_4^{3-}$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )	0,013	0,013	0,821	0,016	0,020	2,835	0,016	0,016	3,148

(b)

Estación/ Parámetro	Sector Desagüe			Frente Puntilla León			Casa de Bombas		
	Sup.	Prof.	Sed.	Sup.	Prof.	Sed.	Sup.	Prof.	Sed.
$\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )	20,0	19,5	52,5	19,4	19,4	126,8	19,7	19,5	54,9
$\text{Mg}^{2+}$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )	10,1	9,6	21,5	9,6	9,9	23,7	10,1	9,9	18,2
$\text{Na}^+$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )	16,7	16,9	225,7	17,5	17,2	77,1	16,9	16,8	0,8
$\text{K}^+$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )	2,3	2,2	0,3	2,3	2,5	2,2	2,5	2,5	1,8
$\text{Cl}^-$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )	7,4	8,4	7,4	8,4	8,0	6,4	8,4	8,4	2,6
$\text{SO}_4^{2-}$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )	19,0	19,0	114,3	18,0	18,0	191,3	18,0	16,0	88,7

Siendo:

Sup. = Resultado de la variable en agua superficial (0 m.)

Prof. = Resultado de la variable en agua en profundidad (>3,3 m. para Desagüe y Puntilla el León y 2,5 m. para Casa de Bombas)

Sed. = Resultado de la variable en sedimento (en concentraciones de  $\text{mgL}^{-1}$ , de esta forma son comparables las concentraciones en agua y en sedimentos).

De la tabla se obtiene:

- **pH:** En las estaciones Frente Puntilla el León y Casa de Bombas se observó que a medida que aumenta la profundidad, el pH se acidifica, encontrando valores de pH en sedimentos del orden de pH 6 mientras que en Sector Desagüe, el pH en sedimento fue muy cercano a los encontrados en superficie.
- **CE:** Se observó claramente que en los tres sitios, la concentración de iones fue mucho mayor en los sedimentos que en el agua, siendo Frente Puntilla de León, la zona donde se registró los más altos valores de conductividad eléctrica.
- **DQO/MO:** Estas variables fueron relacionadas debido a que ambas indican la cantidad de material orgánico presente que se puede oxidar. Así se distinguió que en el agua toda la columna de agua presentó la misma cantidad de materia orgánica en las aguas, sin embargo, en el sedimento presentó otra conducta, se encontró una mayor cantidad de material orgánico en Casa de Bombas, luego Frente Puntilla de León y en menor cantidad en Sector Desagüe.
- **Nitrato:** Este ión se encontró de forma heterogénea en la Laguna, mientras que en Sector Desagüe hubo una mayor concentración en aguas que en sedimento; en las zonas de Frente Puntilla el León y Casa de Bombas, la cantidad encontrada en sedimentos fue similar a la registrada en la columna de agua.
- **Fosfato:** Para esta variable, se observó un comportamiento claro, esto es, en las tres estaciones muestreadas, las concentraciones de Fosfato son mayores en sedimentos que en el agua, encontrando incluso concentraciones 150 veces

- mayores en sedimento que en agua (Casa de Bombas y Frente Puntilla el León), mientras que en Sector Desagüe esta relación fue mucho más estrecha.
- **Calcio:** Se observó que en el agua de toda la Laguna, las concentraciones fueron muy similares, no hay grandes diferencias, mientras que en sedimentos la zona con mayor profundidad (Frente Puntilla el León) fue la que presentó una alta cantidad de este catión, mientras que para las dos estaciones restantes, los sedimentos registraron concentraciones similares del orden de  $50 \text{ mgL}^{-1}$ .
  - **Magnesio:** Para este catión, hubo un comportamiento muy similar tanto en la columna de agua como en los sedimentos, ya que en las tres estaciones, presentaron concentraciones muy cercanas en superficie y en profundidad, con valores que fluctuaron entre los  $10,1-9,6 \text{ mgL}^{-1}$  en superficie, a  $9,6-9,9 \text{ mgL}^{-1}$  en profundidad. Mientras que en sedimentos, fueron del orden de  $20 \text{ mgL}^{-1}$  para los tres sitios muestreados.
  - **Sodio:** Este ión presentó una gran heterogeneidad en los resultados, ya que mientras en las aguas, este ión se encontró en mayor cantidad en el sector Frente Puntilla el León, en sedimentos se observó que hay grandes diferencias, en Sector Desagüe se registraron valores muy altos de este catión en comparación con el Sector Casa de Bombas.
  - **Potasio:** Al igual que el Magnesio, este catión se encontró en la columna de agua en concentraciones similares en las tres estaciones, siendo estas cercanas a  $2 \text{ mgL}^{-1}$ , mientras que en los sedimentos superficiales de la Laguna se registraron concentraciones menores a las encontradas en las aguas, las que alcanzaron incluso los  $0,3 \text{ mgL}^{-1}$  en Sector Desagüe. En Frente Puntilla el

León, la concentración medida fue muy similar a la del agua próxima. En tanto en Casa de Bombas se encontró  $1,8 \text{ mgL}^{-1}$  de  $\text{K}^+$  en sedimento, valor menor a los  $2,5 \text{ mgL}^{-1}$  encontrado homogéneamente en el agua superior.

- **Cloruro:** Las concentraciones de este anión se presentaron de forma muy regular en toda la laguna; en el agua, las concentraciones estuvieron en torno a los  $8 \text{ mgL}^{-1}$  de  $\text{Cl}^-$ , mientras que en sedimento, fueron cercanas a los  $7,5 \text{ mgL}^{-1}$ , a excepción del Sector Casa de Bombas donde se encontró  $2,6 \text{ mgL}^{-1}$ . La concentración más alta en el agua se registró en Casa de Bombas, y la concentración más alta en el sedimento, se encontró en Sector Desagüe.
- **Sulfato:** La concentración de este anión se presentó en altas concentraciones en sedimento, observándose la mayor concentración en Frente Puntilla el León, y la menor concentración en Casa de Bombas, mientras que en la columna de agua, tanto en superficie como en profundidad, la concentración de sulfato se presentó sin gran variación.
- Cabe destacar que el Oxígeno Disuelto no fue medido en sedimento, por lo que no se consideró en esta relación, sin embargo para esta campaña de monitoreo (Primavera 2008), el Oxígeno Disuelto presentó valores en profundidad variados, dependiendo del sector, en Sector Desagüe  $6,73 \text{ (mgL}^{-1}\text{)}$ , en Frente Puntilla de León,  $4,97 \text{ (mgL}^{-1}\text{)}$  y en Casa de Bombas,  $7,11 \text{ (mgL}^{-1}\text{)}$ .

#### IV. DISCUSIÓN GENERAL

Con respecto al cumplimiento de la Norma NCh 1333 “Estándares Nacionales de Calidad Ambiental según el uso dado al recurso”, y la aptitud del agua para los diferentes usos identificados en la laguna, se puede decir:

- Uso del agua en riego:

Según esta Norma, los parámetros indicados para ser estándares en ese uso del agua, son pH, CE, Sólidos Disueltos, Coliformes Fecales, Macroelementos (Sodio, Sulfatos), Metales pesados. Sin embargo sólo se tuvo información de pH y CE en registros continuos. Con relación al pH, se observa que hasta el año 2000 aproximadamente, el agua no era apta para dichos usos, ya que esta variable era superado (figura 8), mientras que en los últimos años, la calidad del agua en este parámetro ha mejorado, debido a que el pH se encuentra bajo el límite permitido, en este caso pH 9. En general el pH en la Laguna resultó alcalino en todo el periodo muestreado (1988-2008), lo que puede ser atribuido por la gran actividad algal existente, típico de un cuerpo de agua eutrofizado (Sancha, 1977).

En relación a la Conductividad eléctrica (figura 11), se puede decir que este cuerpo de agua presenta una conductividad moderada y el aumento notorio observado el año 1998 hasta la fecha puede relacionarse con el aumento de la población ya que según los censos de población y vivienda, este muestra un aumento intercensal (1992-2002) de 33,3% en la población, ya que de 37.529 habitantes para el censo de 1992 en el sector de Paine, la población llegó a 50.028 habitantes en el año 2002 (INE, 1992 y 2002). Por lo tanto, este incremento, incide directamente en el aumento de las actividades económicas y al crecimiento poblacional que presenta la laguna este último tiempo.

De acuerdo a la Norma Chilena Oficial 1333, y a los parámetros analizados, la laguna este último tiempo es apta para el uso del agua en riego, sin embargo, para que esté uso se encuentre aceptado, se requiere del resto de las variables consideradas en esta categoría como Sólidos Disueltos, Coliformes Fecales, Macroelementos (Sodio, Sulfatos), Metales pesados.

- Uso del agua en recreación con contacto directo:

De acuerdo a esta Norma, los parámetros indicados para ser estándares en ese uso del agua, son Aceites y grasas, Claridad, Coliformes fecales, color, pH, Sólidos flotantes, temperatura y turbiedad. De estos sólo se analizaron por tener registros continuos, el pH, Claridad y Temperatura.

En cuanto a la claridad (figura 9), la Laguna no cumple con la norma para este uso, ya que se requiere de una claridad del agua (medida por profundidad del disco Secchi) mayor a 1,2 m, lo que claramente no se ha cumplido, aunque la tendencia, en promedios acumulados, indican que los últimos valores de la claridad han aumentado. Además, se observa que la estación de monitoreo Sector Puntilla de León, que también presenta la mayor profundidad máxima, es la que posee más claridad de sus aguas, llegando a valores cercanos a la norma, pero aun así, las transparencias son muy bajas. Las otras dos estaciones (Sector Desagüe y Casa de Bombas) poseen un comportamiento muy similar en la claridad de sus aguas, aunque no superan el metro de transparencia.

En cambio para la variable Temperatura (figura 10), en todo el periodo muestreado (1988-2008), se ha cumplido con la Norma 1333 para este uso, en promedio se encuentra en 20 °C para todo el cuerpo lacustre, sin embargo lo que muestra la tabla 7, indica que la Laguna soporta un proceso de enfriamiento y calentamiento cíclico desde

el verano hacia el invierno (Merino, 1987), ya que sus temperaturas son mayores en las estaciones de verano, primavera, mientras son mas frías en Invierno y otoño, lo que ocurre sin diferencias entre las estaciones muestreadas.

Con relación al pH, la Laguna presenta valores mayores a 8,3 unidades (que es lo que indica la Norma 1333 para este uso) en todo el periodo muestreado, por lo que las aguas no son aptas para dicho uso.

De acuerdo con los resultados, la Laguna de Aculeo, no es apta para el uso del agua con contacto directo, aunque los parámetros analizados no son todos los que corresponden. Es necesario además del monitoreo de coliformes fecales y Aceites y grasas.

- Aguas destinadas a vida acuática:

Los parámetros indicados para ser estándares en este uso del agua, son pH, Alcalinidad total, Oxígeno disuelto, color, Sólidos sedimentables. De estos sólo se tienen registro de pH y Oxígeno disuelto.

De acuerdo al Oxígeno disuelto, la figura 12, muestra un valor casi constante en el tiempo. En cuanto a la comparación con la Norma 1333, los valores encontrados, son aceptados en todo el periodo muestreado para que exista la vida acuática, en superficie.

Para el pH, se observa que al igual que para el uso del agua para regadío, esta variable este último tiempo si cumple, por lo que esta agua se puede destinar a vida acuática.

Para los usos de agua de recreación sin contacto directo y de uso de agua en estética, con los datos analizados, no es posible indicar si esta Laguna cumple o no con la Norma, pues las variables necesarias para ser evaluadas no son muestreadas.

Cabe destacar que en este trabajo no se han considerado en la calidad del agua, los metales pesados, ya que según lo investigado, estos se encuentran por debajo del límite indicado en la Norma 1333, por lo tanto la Laguna de Aculeo no presentaría problemas en cuanto a los metales pesados. En el Anexo II (Tablas 40, 41 y 42) se encuentra el monitoreo registrado el año 2008 y donde han sido determinados los metales pesados.

De acuerdo al comportamiento de las variables en el perfil de profundidad, podemos decir que en general para las tres estaciones de muestreo, los valores de pH (figuras 13, 14 y 15) en profundidad son más bajos que los encontrados en superficie, atribuible al efecto de procesos degradativos con formación de  $\text{CO}_2$  que están ocurriendo en el fondo (Merino, 1987).

Con respecto a la conductividad eléctrica, mostradas en las figuras 16, 17 y 18, se tiene que las conductividades encontradas son similares, tanto entre estaciones como en la columna de agua, lo que da a entender que hay homogeneidad de concentración de sales en las aguas de la Laguna. En relación al comportamiento de la Temperatura en el perfil (figuras 19, 20 y 21), se observa que presenta cambios estacionales, observando temperaturas en el siguiente orden, de mayor a menor: verano, primavera, otoño, invierno, presentado en toda la masa de agua.

En relación con el cambio en profundidad, se observa que siendo la laguna un lago somero, no existe estratificación, y la masa de agua tiende a estar completamente mezclada como consecuencia del efecto del viento.

Según lo encontrado en el perfil de profundidad para el Oxígeno disuelto, mostrado en las figuras 22, 23 y 24, hay presencia de una zona óxica en todo el perfil

de profundidad, a excepción de las mediciones en el sector más profundo donde se registran valores un poco más bajos, estas diferencias resultan menores en las zonas más someras, como Sector Desagüe y Casa de Bombas. En general las aguas más profundas, resultaron más pobres en Oxígeno Disuelto que las superficiales, debido a que el Oxígeno es el principal aceptor de electrones en el metabolismo aeróbico. Además, este parámetro responde de la forma esperada para una laguna eutrofizada, ya que el oxígeno disuelto va disminuyendo a medida que aumenta la profundidad, producto que en la superficie se desarrolla con mayor intensidad la fotosíntesis, que genera gran cantidad de materia orgánica que sedimenta en las profundidades de la laguna, descomponiéndose, lo que genera un consumo alto de oxígeno en profundidad (Wetzel, 1983).

En tanto, para el ion Nitrato, mostrado en las figuras 26, 26 y 27, donde este anión presenta un comportamiento en el tiempo al aumento, de forma similar en toda la columna de agua, observando una mayor concentración de este parámetro en las estaciones Frente Puntilla el León y Casa de Bombas perfil, sectores donde hay una mayor actividad turística y agrícola, relacionada directamente con la cantidad de nitrato que puede ser descargado en las aguas de la Laguna.

En relación con el Fosfato, observado en las figuras 28, 29 y 30, se presenta de forma irregular en el periodo de tiempo analizado, no hay una tendencia general, sin embargo, en las 3 estaciones de muestreo, Sector Desagüe, Frente Puntilla León, y Casa de Bombas, se pueden asociar, encontrándose un aumento notorio de las concentraciones de fosfato en el año 1998, donde luego se presenta una disminución del fosfato constante en el tiempo, para las mediciones en superficie y en profundidad media. Mientras que las concentraciones de fosfato para las dos primeras estaciones, las mediciones en profundidad, la tendencia ha permanecido sin variación en el tiempo,

encontrándose concentraciones inferiores a las registradas a una menor profundidad, sin embargo, al analizar los últimos 3 años, se observa que la concentración de fosfato aumenta con la profundidad, y puede ser explicado, debido a que el fosfato tiende a sedimentar y formar parte del sedimento de la laguna.

La DQO (figuras 31, 32 y 33) en general se muestra variable tanto en el tiempo como espacialmente entre las estaciones, aunque de cierta forma similar en todo el perfil, ya que el sector menos profundo de la Laguna (Casa de Bombas), las concentraciones de DQO en superficie son muy similares a las profundas, mientras que las otras dos estaciones presentan una mayor variabilidad en el perfil. Por lo tanto, se puede decir que Casa de Bombas presenta una mayor cantidad de material orgánico.

De acuerdo a la variación anual de los diferentes parámetros, (tablas 8, 9 y 10), se observa que los nutrientes como Nitrato y Fosfato, aumentan notoriamente en la estación de primavera, (en las tres estaciones por igual), lo que puede ser atribuido a que en época de deshielos, aumenta el caudal de las aguas, generando que los pozos negros (pertenecientes a los propietarios de las riberas de la laguna), se permean de agua, permitiendo que se arrastren nutrientes hasta la laguna. (SAG, 2006)

Considerando que la Laguna de Aculeo es un cuerpo de agua eutroficado, lo que se confirma con los registros de Andaur (2008), y observando la tabla 1, podemos decir que aunque los parámetros como nitrato y fosfato no se encuentren en la Norma 1333, es posible relacionarlos con calidad del agua, así entonces las aguas de la Laguna, pueden aún con esta condición trófica ser aptos para aguas destinadas a riego, deportes náuticos (sin contacto directo).

De acuerdo al muestreo realizado en Primavera del 2008 en la Laguna de Aculeo, en la caracterización de los sedimentos, es observable una variabilidad espacial de éstos en la Laguna, como un sistema estable que lo ocurrido en las aguas, es decir, cuando se comparó las aguas de la Laguna, en general se observó que las tres estaciones responde de forma muy similar en cuanto a calidad del agua y comportamientos en el perfil. Se obtiene que la Materia Orgánica fácilmente oxidable es mayor en Casa de Bombas y menor en Sector Desagüe, con valor medio para Frente Puntilla León, cantidades atribuibles a las actividades económicas que han deteriorado a la Laguna. Con respecto al pH y CE, se puede obtener una relación, ya que a un mayor contenido de iones o sales, el pH tenderá a ser neutro (pH 7), observable en la tabla 11, ya que la estación que posee el pH más cercano a la neutralidad, posee la mayor cantidad de iones, así la estación Frente Puntilla el León, presenta un alto valor de CE y un pH mas cercano al neutro, valor esperado considerando que esta zona presenta la mayor profundidad. Las concentraciones detectadas de ion Bicarbonato, superan ampliamente las registradas de los otros iones.

En cuanto a los cationes solubles (figura 35), se observa que el catión Magnesio, aumenta en sectores donde existe un mayor desarrollo de la actividad antropogénica (actividad agrícola, turística, etc.) como en la estación Casa de Bombas y Frente Puntilla el León y es menor en el sector Desagüe, que es donde se encuentran principalmente parcelas y actividad agrícola.

En los aniones solubles (figura 36), el ion nitrato, que en las aguas posee altas concentraciones, en los sedimentos, en cambio, es el nutriente que se encuentra para dos estaciones en las menores cantidades. Estas estaciones son sector Desagüe y frente puntilla león (entre 0,9 y 1,5 mgKg<sup>-1</sup>). En relación con los carbonatos

encontrados son introducidos por las actividades antrópicas producidas en las zonas aledañas a la Laguna ya que de acuerdo a la geología de la laguna, esta es ausente de carbonatos de origen litogénico. El ion Cloruro es el que presentó en menor concentración en toda la laguna y el ion Sulfato el de mayor concentración en las tres estaciones, lo que indicaría que los sedimentos poseen cierta cantidad de oxígeno, ya que en sedimentos anóxicos no hay presencia de sulfato sino de sulfuros.

Con respecto al fosfato, (tabla 13), se puede decir que las concentraciones de Fósforo disponible es mayor en los sitios que tienen una mayor influencia antrópica, debido a que el fosfato es descargado a la laguna desde las aguas de desagüe y por escurrimiento de las aguas de regadío de los cultivos. Se puede relacionar el pH con el fósforo disponible, ya que a pH relativamente ácido, el fósforo adsorbido por las partículas de sedimento, es liberado. Bajo estas condiciones, se tiene que efectivamente en las estaciones de muestreo que poseen pH más ácido, se encuentran el mayor contenido de Fósforo disponible. Por ende en la estación sector desagüe que registra un pH más básico, se tienen concentraciones de fósforo disponible muy bajas (comparadas con las otras estaciones). Por lo tanto, es en esta estación donde se pueden decir dos cosas, si el pH es mas básico, existirá una mayor cantidad de fósforo adsorbido, que es peligroso , ya que al producirse un cambio en el pH del agua, que influya a su vez en el pH del sedimento, y lo cambie a pH más ácidos, esta estación se transformará en un potencial fuente de fosfato; pero por otro lado, este lugar es el que presenta menos contaminación, ya que la influencia antrópica que produce descargas de fosfato a las aguas es menor, por lo que, de acuerdo a esto, es esperable obtener cantidades menores de fosfato en el sedimento que en las otras dos estaciones donde hay una marcada actividad antrópica.

En cuanto a la relación entre el agua y el sedimento, hay que destacar que sólo se midió sedimentos en la estación de primavera del año 2008, por lo que la relación entre estas dos sectores, será discutida en base a estos resultados.

Es posible observar que hay un factor que es principal para que haya una mayor relación entre el sedimento y el agua, este es el viento, ya que, la dirección y velocidad del viento tanto en la cuenca como en la misma masa de agua puede ejercer una acción en el reciclamiento de nutrientes al provocar la mezcla de la columna de agua y favorecer el intercambio de compuestos entre el agua y el sedimento, esto se acentúa especialmente en cuerpos de agua de poca profundidad como Laguna de Aculeo (profundidad de 3,5 m en promedio). Si bien el viento cumple una función oxigenadora en las masas de agua, toma un papel muy importante en el deterioro de la masa de agua al mezclar los sedimentos con nutrientes. (Leyton y Parra, 2007).

En relación con los nutrientes, de la tabla 14, es posible observar que el Fosfato en sedimentos es de mayor magnitud a la del agua (Wetzel, 1983) y de acuerdo a lo expuesto anteriormente, donde se observa que la laguna posee buena oxigenación para primavera 2008, se puede decir que bajo condiciones aeróbicas es evidente que los equilibrios de intercambio son principalmente unidireccionales, hacia el sedimento (Wetzel, 1983), por lo tanto, el sedimento está acumulando Fosfato, actuando como sumidero, pero una vez que las condiciones de oxigenación cambien en profundidad, puede producirse liberación de Fosfato hacia las aguas, siendo ahora el sedimento fuente de éste. De forma similar ocurre con los sulfatos, cuando éste se encuentre en condiciones anóxicas, y entre en contacto con un ambiente reductor, se transformará en sulfuro, produciendo malos olores y muertes de peces, se producirá esta anoxia en las aguas, cuando la Laguna disminuya su profundidad máxima en la columna de

agua, como ocurre en la época estival, o cuando el viento no sople, ya que se generará quietud de las aguas, provocando así anoxia en las aguas y en sedimentos.

Para el anión Nitrato, que se encuentra más en las aguas que en el sedimento, se puede decir que bajo condiciones de poca turbulencia y concentraciones bajas de OD puede almacenarse en los sedimentos, mientras que puede estar liberándose en periodos de mezcla de agua, o que estas presenten buena oxigenación.

Partiendo de la base que la laguna esta eutroficada, existen dos posibles situaciones en cuanto a la mezcla de las aguas: así es mejor por una lado una mezcla del agua, ya que produce que sólo se libere como nutriente el nitrato desde los sedimentos, que no es el nutriente limitante, como lo es el fósforo, que en este caso, en sistemas oxigenados, estará almacenándose en los sedimentos, mientras que por el otro lado, cuando se cambien las condiciones encontradas en Primavera 2008, a condiciones anóxicas y poco movimiento de agua, podría ocurrir una liberación importante de fosfato y sulfato (como sulfuros) desde los sedimentos hacia la columna de agua, provocando que la eutrofización se intensifique por ese periodo de tiempo y que se puedan producir malos olores y posibles muertes de peces, lo que provocaría que la calidad del agua empeore en la laguna y por ende los usos dados en sus aguas.

## V. CONCLUSIONES

- Los objetivos, tanto general como específicos se han cumplido, ya que se ha podido determinar que la calidad del agua de la Laguna de Aculeo en general cumple con los usos del agua entregados en la Norma Chilena 1333, las aguas son aptas para Riego y vida acuática, aún siendo un cuerpo de agua eutroficado, que contiene altas cantidades de nutrientes como nitratos y fosfatos. Sin embargo, con los registros obtenidos, las aguas de la laguna no son aptas para recreación con contacto directo. Es importante considerar en los futuros monitoreos, que incluyan las variables como Coliformes fecales, aceites y grasas y sólidos, ya que así se podría dar una mayor aptitud al cuerpo de agua.
- De acuerdo a los resultados, se observa que en general para todo el periodo estudiado, las aguas de la Laguna se comportan como un sólo sistema a muestrear, ya que espacialmente son muy similares los comportamientos de las principales variables analizadas. Sin embargo, para los nutrientes como Nitrato y Fosfato es posible ver una leve diferencia de concentraciones entre estaciones producto de la influencia antrópicas que posee cada estación. Así, la zona Oeste de la Laguna es la que presenta una mayor concentración de estos nutrientes.
- Es importante que la Laguna no presente periodos de anoxia en sus aguas o en sedimentos, ya que el sulfato encontrado generará sulfuros en aguas pobres en oxígeno, situación que puede producir graves impactos en la vida acuática presente en la Laguna, y en la calidad de las aguas de Aculeo.
- Según los resultados, en el parámetro temperatura, se puede considerar a la Laguna de Aculeo un cuerpo de agua somero, por lo que no presenta estratificación en la columna de agua, esto favorece que desde los sedimentos se libere el nitrato

acumulado por periodos de poca turbulencia de las aguas, mientras que el fosfato se encuentra almacenado en los sedimentos y no se libera en periodos de circulación de las aguas.

- En cuanto a los sedimentos, se pudo ver una diferencia notoria entre las estaciones muestreadas, para las variables de Nitrato, Fosfato y Materia Orgánica, estos se presentaron en mayores cantidades en la zona Oeste y central de la Laguna, coincidiendo con el uso dado a las riberas circundantes de la Laguna, ya que en estas zonas se desarrollan mayormente actividad turística, y agrícola, mientras que en el sector Este, (Sector Desagüe) solo tiene algunas zonas agrícolas.
- De acuerdo al muestreo de sedimentos realizado, se puede observar una relación entre la calidad de las aguas y los sedimentos de la Laguna cumpliendo por lo tanto con la hipótesis planteada; así, cuando se produzca quietud de sus aguas, debido a que se liberarían desde los sedimentos fosfatos, (en este sistema es el nutriente limitante), provocaría que la eutrofización se intensifique por ese periodo de tiempo, y por ende la calidad del agua se reduciría y los usos dados en esta laguna estarían limitados. Mientras que cuando las aguas se encuentren oxigenadas.
- A modo de recomendación, se debería realizar por lo menos otro muestreo de sedimentos y sugerentemente en las cuatro estaciones del año, para así poder comparar en que época se produce la mayor liberación o el mayor almacenamiento de compuestos desde o hacia los sedimentos respectivamente.

## VI. REFERENCIAS

- Andaur, V., "Dinámica Química de la Laguna de Aculeo y caracterización del fitoplancton", Tesis Química Ambiental, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, 2008.
- Avnimelech, Y.; Lecher, M.; Raven, A. & Zur, O. "A method for the evaluation of condition in a fish pond sediment", *Aquaculture* 23: 361-365. 1981.
- Barzi, J., "Manual de la cuenca del Lago Puelo", Capítulo VII: Alternativas recomendables para el desarrollo. Gestión Interfase Hombre-Agua. Disponible en página web: [www.geocities.com/cuencapuelo3/InterfaseHRecurso.pdf](http://www.geocities.com/cuencapuelo3/InterfaseHRecurso.pdf). 2003.
- Bonetto, C., A. "Producción primaria del fitoplancton, concentraciones del pigmento, materia orgánica y nutrientes, en la caracterización limnológica de los cuerpos de agua regionales del noreste argentino" Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exac. Nat, UBA. 185 p. 1982.
- Boyd, C., E.; Musig, Y. y Tucker, L. "Orthophosphate uptake by phytoplankton and sediment" *Aquacultura* 22:165-173. 1981.
- Calmano, W.; Ahlf, W.; Förstner, U. "Sediment quality assessment: chemical and biological approaches. En Calmano, W.; Ahlf, W.; Förstner, U.(eds) "Sediments and toxics substances" Springer-Verlag. Germany. pp 17-35. 1996.
- Centro Eula. "Establecimiento de un ordenamiento territorial orientado a la protección y uso sustentable del área del cordón Cantillana. Universidad de Concepción. 2004.
- Centro de Estudios para el desarrollo (CED), "Diseño y ejecución de un programa de gestión Ambiental participativo para la cuenca de Aculeo, Región metropolitana de Santiago", Informe final. 2008.
- Colin Baird, Raymond B. Seymour, Charles E. Carraher, "Química Ambiental", Editorial Reverté, 2001, pag. 441.

- Coler, R., A., & Rockwood, J., P., "Water pollution biology a laboratory/field handbook. Ed. Technomic USA 107 p. 1989.
- CONAMA. "Norma Chilena oficial N° 1333". 1978.
- CONAMA RM., "Plan de gestión ambiental para la laguna de Aculeo, Comuna de Paine: Diagnostico ambiental, consecuencias y propuestas para su restauración ecosistémica". 2007.
- Davison, W., "Conceptual models for transport at a redox boundary". In: Strumm, W; Willey Interscience: Chemical Processes in lakes. pp 31-53, chapter 2. 1998.
- Dirección general de aguas (DGA), MOP, Banco Nacional de Aguas, 2008.
- Dirección general de aguas (DGA), MOP, Informe gestión 2002.
- FDEP (Florida Department Environmental Protection), Approach to the assessment of sediment quality in Florida coastal waters. Office of water policy. Sitio web: <http://www.dep.state.fl.us/Water/monitoring/docs/Seds/Vol1/Volume1.pdf>. 1994. (visitada última vez: 03/03/2009).
- García, M. & Masa, J., "Origen y propiedades de los sedimentos". Serie del Instituto de Ingeniería UNAM, México, 110p. 1998.
- González, M. "Distribución especial de la concentración de metales en sedimentos superficiales de la laguna Carén". Tesis Ingeniería en ejecución en ambiente, Facultad de Ingeniería, Universidad Santiago de Chile. pp 9-11. 2002.
- Golterman, H., Sly, P. & Thomas, R.. "Study of the relationship between water quality and sediment transport". UNESCO, Francia, pp 1-123. 1983.
- Hakanson, L. & Jansson, M. "Principles of Lake Sedimentology. Springer-Verlag" Germany, 314 pp. 1983.
- Hutchinson, G. E, "Eutrophication. The scientific background of a contemporary practical problem" Amer Sci, Rev 61: 269-279. 1973.

- Ingeniería Ambiental y Medio Ambiente, disponible página web:  
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/agua.html> (visitada última vez: 02-03-2009). 2000.
- Jeppesen, et al. "Top-down control in freshwater lakes: role of nutrient state, submerge macrophytes and water depth" *Hidrobiología* 342/343, 151-164. 1997.
- Laguna de Aculeo, página web:  
<http://www.lagunadeaculeo.com/pages/introduccion.html> (última visita 10/09/2008).
- Leiva, M. y M. López. Monitoreo de la calidad de recursos hídricos y aseguramiento y control de la calidad en laboratorios de ensayo medio ambientales. CENMA. 16 pp. 2006.
- Levine, S., N. & Shindler, D., W., "Phosphorus, nitrogen and carbon dynamics of experimental lake 303 during recovery from eutrophication can J Fisch. 1989.
- Leyton, H. y Parra, A., "Proposición de un plan de gestión ambiental para minimizar el proceso de eutrofización en la cuenca de la laguna de Aculeo, región metropolitana, Chile". Tesis, Universidad de Santiago de Chile, Fac. de Ingeniería, 2007.
- LS Clesceri, A. E. Greenberg, A. D. Eaton, "Standard Methods for examination of water and wastewater". 20th Edition. APHA-AWWA-WPCF. 1998.
- Margalef, R., "Limnología" Ed Omega, España. 1010p. 1983.
- Merino, B., Raúl, "Estudio limnológico de la Laguna de Aculeo, Región Metropolitana / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias Ecológicas, 1987. pp.98.

- Moss, B., McGowan, S. y Carvahlo, L. "Determination of phytoplankton crops by top-down and bottom-up mechanisms in a group of English lakes, the West midland meres". *Limnology and Oceanography* 39: 1020-1029. 1994.
- Musalem, M., "Minuta 041, Informe sobre la calidad de aguas históricas de la Laguna de Aculeo", DGA, 2006.
- OECD (Organization for economic cooperation and development). "Eutrophication of waters... monitoring, assessment and control. Final report. OECD cooperative programme on monitoring of inland Waters (Eutrophication control) Environment Directorate, OECD, Paris, 154 pp. 1982.
- Parra, O., "La eutroficación de la laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: un caso de estudio". *Amb y Des*, Vol 1, 117-136. 1989.
- Rodhe, W., "Cristallization of eutrophication concepts in northern Europe. In eutrophication: causes, consequences and connective". *Natl. Acad. Sci/Natl. Res. Council. Publ N° 1700*, pp 50-64. 1969.
- Roldán, G. "Fundamentos de limnología Neotropical". Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 1992.
- Sadzawka, A., "Métodos de análisis de suelos". Instituto de investigaciones agropecuarias INIA, Chile. 1990.
- Salazar y Soto, "Caracterización y monitoreo de sistemas lacustres", DGA, 1999.
- Samamé, P. "Propuesta de Parámetros para la norma de sedimentos" Seminario de Título Químico Ambiental, Universidad de Chile, 2002. pag 4-7 y 13-18.
- Sancha, A., Castillo, G. y Thiers, R., "Estudio limnológico de la laguna de Aculeo, factibilidad de uso del agua en riego y recreación" Universidad de Chile. Fac. Ciencias Físicas y Matemáticas. 1977.

- Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), "Ord. N° 651, Informe de diagnóstico ambiental de la Laguna de Aculeo". 2006.
- SEREMI Salud. "Minuta: Laguna de Aculeo, comuna de Paine. Evento Mortandad de peces, 03 Mayo 2006. Sub-departamento de entorno saludable. Unidad de vigilancia de aguas. 2006.
- Stepheson, G., "Guidance document on collection and preparation of sediment for physicochemical characterization and biological testing". Environmental Protection series, Report EPS1/RM/19. Canada. pp 20-59. 1994.
- UNESCO, "Embalses, fotosíntesis y productividad primaria: campo de acción no. 5: efectos ecológicos de las actividades humanas sobre el valor y los recursos de los lagos, pantanos, ríos, deltas, estuarios y zonas costeras". 1984.
- Vila, I., "Los sistemas acuáticos continentales. su ontogenia natural acelerada por efecto antrópico: la eutrofización y la salinización" 2003. Disponible en pagina web: [http://www.produccion-animal.com.ar/agua\\_cono\\_sur\\_de\\_america/08-sistemas\\_acuaticos\\_efecto\\_antropico.htm](http://www.produccion-animal.com.ar/agua_cono_sur_de_america/08-sistemas_acuaticos_efecto_antropico.htm) (visita última vez: 03-03-2009).
- Vollenweider, R.A., "Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication" OECD report DAF/CFI/6827, Paris, France. 1968,
- Wetzel, R., G., "Primary production Blackwell" scientific publ, Oxford, pp 230-247. 1975.
- Wetzel, R., G., "Limnology", Saunders College Publishing. pp 157-178 y 223-297. 1983.
- Wetzel, R., G "Limnology: lake and river ecosystems" Academic Press, 1006 pp. 2001.

**VII. ANEXOS**

## ANEXO I. EJEMPLOS DE CÁLCULO

### ANÁLISIS AGUAS

#### 1. Análisis calidad del agua: Cálculo del Promedio Acumulado

Las figuras mostradas en los resultados 3.1 (calidad del agua), fueron realizadas usando la técnica del promedio acumulado, el cual origina una tendencia de la curva que entregan los valores medidos experimentalmente, para ello, se debe contar con una gran cantidad de datos, y en lo posible datos continuos temporalmente. Un ejemplo de cálculo se muestra a continuación:

- pH superficial, Estación Sector Desagüe: Los datos tomados son los 10 primeros que muestra la figura (anexo datos bruto, pH superficial sector desagüe), desde la fecha 13/12/1988 hasta 10/10/1990. La siguiente tabla muestra los datos:

**Tabla 15.** Explicación de cálculo de promedios acumulados

Posición	Fecha	pH	Promedio acumulado
1	13/12/1988	9,15	9,15
2	29/12/1988	9,15	9,15
3	25/05/1989	8,30	8,87
4	07/07/1989	8,42	8,76
5	02/11/1989	8,85	8,77
6	04/01/1990	9,50	8,90
7	09/05/1990	9,51	8,98
8	12/07/1990	9,08	9,00
9	22/08/1990	8,50	8,94
10	10/10/1990	8,83	8,93

La metodología para obtener el promedio acumulado es sacar el promedio del primer valor, luego para la posición 2, es obtener el promedio del primer y segundo valor; para la tercera posición, se obtiene el promedio del primer, segundo y tercer valor de pH, y así sucesivamente, como por ejemplo:

$$\text{Prom. Acumulado (posición 1)} = 9,15 = 9,15$$

$$\text{Prom. Acumulado (posición 2)} = \frac{9,15 + 9,15}{2} = 9,15$$

$$\text{Prom. Acumulado (posición 3)} = \frac{9,15 + 9,15 + 8,30}{3} = 8,87$$

$$\text{Prom. Acumulado (posición 4)} = \frac{9,15 + 9,15 + 8,30 + 8,42}{4} = 8,76$$

## ANALISIS SEDIMENTOS

### 2.1 Granulometría:

Para obtener los porcentajes de sedimento de acuerdo a su tamaño, mostrados en la tabla 17, se debe realizar la razón entre la masa total usada y la masa encontrada en determinada luz de malla (tamaño), como el ejemplo siguiente:

- Sector Desagüe, con luz de malla 1 mm.

$$\frac{\text{masa total (g)}}{\text{masa encontrada en tamiz (g)}} = \frac{100\%}{X}$$

$$\frac{219,21 \text{ g}}{5,11} = \frac{100\%}{X}$$

$$X = 2,33 \%$$

Este procedimiento se repite con todos los datos de las masas de la tabla 17, obteniendo así los porcentajes vistos en la misma tabla y en la figura 34.

### 2.2 Factor de humedad (fh):

Se determina, ocupando la Ec./1/, Las masas de suelo seco al aire (a) y suelo seco a la estufa (105°C) (b) con los vasos, se resumen en la tabla 18. Entonces ocupando las masas de sedimento de la estación Frente Puntilla el León, se tiene

- Frente puntilla el León:

$$fh = \frac{9,2755(g) - 8,9393(g)}{9,2693(g) - 8,9393(g)} = \frac{0,3362(g)}{0,33(g)} = 1,0187$$

Se realiza el mismo procedimiento para las otras dos estaciones de muestreo.

### 2.3 Materia Orgánica:

Para determinar el contenido de materia orgánica en los sedimentos mediante titulación potenciométrica, se debe primero estandarizar el Sulfato Ferroso usado ( $\text{FeSO}_4$ ), por lo que se tiene que el volumen gastado de  $\text{FeSO}_4$ , en el blanco fue de 13,5 mL de  $\text{FeSO}_4$ . (Tabla 20)

Así, la concentración de  $\text{FeSO}_4$ , se ocupa la concentración y el volumen de dicromato de potasio ocupado, y el volumen gastado de sulfato de hierro en la titulación del blanco.

Se tiene:

$$\begin{aligned} [FeSO_4] * V_{FeSO_4(blanco)} &= 6 * [K_2Cr_2O_7] * V_{K_2Cr_2O_7} \\ [FeSO_4] * 13,5mL &= 6 * 0,1667M * 10mL \\ [FeSO_4] &= 0,74M \end{aligned}$$

Cabe destacar que en el cálculo anterior se multiplica por 6 la concentración de dicromato de potasio, porque según la reacción de titulación, por un mol de dicromato de potasio, se necesita de 6 moles de sulfato de hierro.

Con los datos de las tablas 19 y 20 y ocupando las Ec./3/ y Ec./4/, se tiene como ejemplo de cálculo, la estación de muestreo Casa de Bombas:

- Casa de Bombas (muestra M1):

$$C(\%) = \frac{13,5(mL) - 7(mL)}{0,2543(g)} * 0,74(M) * 0,39 * 1,0237 = 7,55\%$$

$$MO(\%) = 1,724 * 7,55 \% = 13,016\%$$

Una vez obtenidos los resultados de MO(%) y C(%) con este procedimiento, para las 3 muestras por cada sitio, se obtiene un promedio que se resume en la tabla 11.

## 2.4 Fósforo:

De los resultados de la tabla 22, se realiza una curva de calibración de Absorbancia corregida versus la concentración de los estándares de Fósforo. De su regresión lineal, se tiene:

$$\begin{aligned} Y &= 0,3962X + 0,0123 \\ R^2 &= 0,9963 \end{aligned}$$

Siendo Y= absorbancia medida  
X= concentración (mg/L)

Ahora, para determinar las concentraciones en mg/L de las muestras de la tabla 23, se debe ocupar la ecuación de regresión, como por ejemplo para la muestra M1 Sector Desagüe:

$$0,336 = 0,3962X + 0,0123$$

$$X = \frac{0,336 - 0,0123}{0,3962} = 0,817 \left( \frac{mg}{L} \right)$$

Realizando este procedimiento para todas las muestras, M1, M2 y M3 de las tres estaciones, se tienen los resultados mostrados en la tabla 24.

Para obtener los resultados de sedimentos en unidades de masa ( $\text{mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$ ), como lo muestra la tabla 25, se debe ocupar la Ec./5/, además de los factores de humedad obtenidos en la sección 2.2 de este anexo, y los resultados de fósforo como ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), tabla 24 y la concentración del blanco como el intercepto de la curva de calibración.

Como ejemplo de cálculo, se ocupará la muestra M1 de la estación Sector Desagüe

$$P (\text{mg} \cdot \text{Kg}^{-1}) = \left( 0,817 \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) - 0,0123 \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \right) * 20 * 1,012$$

$$P (\text{mg} \cdot \text{Kg}^{-1}) = 16,287$$

Para las muestras restantes, se procede de la misma forma.

## 2.5 Porcentaje de Saturación (PS)

Con las masas de la tabla 26 y la Ec./2/, se determina el PS, como por ejemplo, para la estación Puntilla el León, se tiene:

$$PS(\%) = \frac{10,1122 (\text{g}) - 9,5022 (\text{g})}{9,5022 (\text{g}) - 8,7977 (\text{g})} * 100$$

$$PS = 86,59 \%$$

De la misma manera, se obtienen los PS entregados en la tabla 27.

## 2.6 Bicarbonato

Para obtener los resultados de la tabla 12, se debe seguir los siguientes pasos. Primero se debe saber la concentración en  $\text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$  de Bicarbonato que se encuentra en la muestra titulada, ocupando la Ec./6/, y los datos de la tabla 28. Así, para la muestra M1 de la estación Casa de Bombas, se tiene:

$$[\text{HCO}_3^-] \left( \frac{\text{meq}}{\text{L}} \right) = \frac{1,08 (\text{mL}) * 0,1 \left( \frac{\text{meq}}{\text{L}} \right) * 1000}{10 (\text{mL})}$$

$$[\text{HCO}_3^-] = 10,8 \left( \frac{\text{meq}}{\text{L}} \right)$$

Realizando de la misma forma el cálculo para los restantes volúmenes, se obtienen las *concentraciones mostradas en la tabla 29.*

Luego para transformar la concentración de (meq\*L<sup>-1</sup>) a (mg\*L<sup>-1</sup>), se usa la relación:

$$[HCO_3^-] \left(\frac{mg}{L}\right) = [HCO_3^-] \left(\frac{meq}{L}\right) * 61,01 \left(\frac{mg}{meq}\right)$$

$$[HCO_3^-] \left(\frac{mg}{L}\right) = 10,8 \left(\frac{meq}{L}\right) * 61,01 \left(\frac{mg}{meq}\right)$$

Para la estación Casa de Bombas:

$$[HCO_3^-] = 658,91 \left(\frac{mg}{L}\right)$$

Así, se obtienen las concentraciones de bicarbonato expuestas en la tabla 30.

Para mostrar las concentraciones en unidades de sedimento, se ocupa la Ec.171; las concentraciones de la tabla 30 y los porcentajes de saturación mostrados en la tabla 27. Como por ejemplo para la estación de muestreo Casa de Bombas:

$$[HCO_3^-] = \frac{658,91 \left(\frac{mg}{L}\right) * 86,59}{100}$$

$$[HCO_3^-] = 570,47 \left(\frac{mg}{Kg}\right)$$

De la misma manera, se obtienen las concentraciones mostradas en la tabla 31.

## 2.7 Sales solubles

### 2.7.1 Cationes solubles:

Para obtener las concentraciones de los diferentes cationes en el extracto de saturación de los sedimentos, se procedió primero construyendo la curva de calibración de los estándares, con las áreas entregadas por el equipo de HPLC con detector de conductividad, como lo muestra la tabla 32, lo que al hacer la regresión lineal de los puntos, se obtuvo lo siguiente:

- Na<sup>+</sup>                     $Y = 27900X + 201507$  ,  $R^2 = 0,9963$
- K<sup>+</sup>                         $Y = 23764X + 69015$  ,  $R^2 = 0,9955$
- Ca<sup>+2</sup>                     $Y = 32913X + 598020$  ,  $R^2 = 0,9948$

$$- \text{Mg}^{+2} \quad Y = 95184X + 112926, \quad R^2 = 0,9902$$

Donde Y= área entregada por el equipo, X= concentración del catión.  
Luego, las áreas entregadas por el equipo para las muestras de sedimentos (extractos de saturación), se encuentran en la tabla 33.

Posteriormente, con la tabla anterior y las ecuaciones de regresión de los cationes, se obtienen las concentraciones de dichas muestras, en mg/L (tabla 34), siguiendo el ejemplo, de la muestra M1 del Sector Desagüe.

$$- \text{Área Na}^+ = 5874809, \\ 5874809 = 27900X + 201507, \quad X = 203,344 \left( \frac{mg}{L} \right)$$

$$- \text{Área K}^+ = 9202, \quad 9202 = 23764X + 69015, \quad X = 0,433 \left( \frac{mg}{L} \right)$$

$$- \text{Área Ca}^{+2} = 2237926, \quad 2237926 = 32913X + 598020, \quad X = 49,825 \left( \frac{mg}{L} \right)$$

$$- \text{Área Mg}^{+2} = 1777319, \\ 1777319 = 95184X + 112926, \quad X = 19,859 \left( \frac{mg}{L} \right),$$

Ahora, para obtener las concentraciones en unidades de sedimento ( $mg \cdot Kg^{-1}$ ), como lo muestra la tabla 35, se debe seguir la siguiente metodología, usando las concentraciones de la tabla 34, la tabla 27 y la Ec/7/ así para la muestra M1 del Sector Desagüe:

- Na<sup>+</sup> :

$$[Na^+] = \frac{203,344 \left( \frac{mg}{L} \right) * 65,44}{100}$$

$$[Na^+] = 133,068 \left( \frac{mg}{Kg} \right)$$

- K<sup>+</sup> :

$$[K^+] = \frac{0,433 \left( \frac{mg}{L} \right) * 65,44}{100}$$

$$[K^+] = 0,283 \left( \frac{mg}{Kg} \right)$$

- Ca<sup>+2</sup> :

$$[Ca^{+2}] = \frac{49,825 \left( \frac{mg}{L} \right) * 65,44}{100}$$

$$[Ca^{+2}] = 32,606 \left( \frac{mg}{Kg} \right)$$

-  $Mg^{+2}$ :

$$[Mg^{+2}] = \frac{19,859 \left( \frac{mg}{L} \right) * 65,44}{100}$$

$$[Mg^{+2}] = 12,996 \left( \frac{mg}{Kg} \right)$$

Se sigue el mismo procedimiento para las muestras restantes. Así, se obtienen las concentraciones de la tabla 35 y al sacar los promedios de las muestras M1, M2 y M3 por cada estación de muestreo, se obtienen las concentraciones mostradas en la figura 35.

#### 2.7.2 Aniones Solubles:

Para obtener las concentraciones de los aniones en las muestras de sedimentos, se realiza el mismo procedimiento que el usado en los cationes solubles, se realiza la curva de calibración, a partir del área de los estándares de la tabla 36, luego las regresiones lineales dan:

- $CO_3^{-2}$        $Y = 6313,4X + 222,84$  ,  $R^2 = 0,9986$
- $Cl^-$            $Y = 5989,8X + 3759,2$  ,  $R^2 = 0,9952$
- $NO_3^-$          $Y = 6113,1X + 3166,3$  ,  $R^2 = 0,9964$
- $SO_4^{-2}$          $Y = 5431,7X + 9929$  ,  $R^2 = 0,9989$

Donde Y= área entregada por el equipo, X= concentración del anión. Luego, las áreas de las muestras (tabla 37) con las regresiones lineales, se convierten en las concentraciones que muestra la tabla 36, luego del mismo modo que en los cationes, es la transformación de unidades de concentración, (de  $mg \cdot L^{-1}$  a  $mg \cdot Kg^{-1}$ ), ocupando los PS de la tabla 27, así se obtienen las concentraciones de la tabla 39.

## ANEXO II. TABLAS

**Tabla 16.** Clasificación de suelos según pH (USDA)

pH	Evaluación
<4,5	Extremadamente ácido
4,5-5,0	Muy fuertemente ácido
5,1-5,5	Fuertemente ácido
5,6-6,0	Medianamente ácido
6,1-6,5	Ligeramente ácido
6,6-7,3	Neutro
7,4-7,8	Medianamente básico
7,9-8,4	Básico
8,5-9,0	Ligeramente alcalino
9,1-10,0	Alcalino
<10,0	Fuertemente alcalino

Fuente:

[http://www.educarm.es/templates/portal/images/ficheros/websDinamicas/133/secciones/991/contenidos/5724/suelos\\_tema\\_3..pdf](http://www.educarm.es/templates/portal/images/ficheros/websDinamicas/133/secciones/991/contenidos/5724/suelos_tema_3..pdf)

**Tabla 17.** Granulometría. Porcentajes y Masas obtenidas en tamizado.

Tamiz (luz de malla)	Estación de muestreo					
	Desagüe		Puntilla León		Casa Bombas	
	Masa (g)	%	Masa (g)	%	Masa (g)	%
1 mm	5,11	2,33	1,70	1,14	37,02	30,16
0,85 mm	7,39	3,37	6,90	4,62	8,38	6,83
0,5 mm	36,89	16,83	20,69	13,86	19,15	15,6
0,355 mm	28,01	12,78	11,75	7,87	9,75	7,94
0,212 mm	31,70	14,46	15,71	10,52	11,78	9,6
0,106 mm	34,81	15,88	35,10	23,51	13,75	11,2
0,063 mm	22,71	10,36	33,40	22,37	8,54	6,96
< 0,063 mm	52,59	23,99	24,05	16,11	14,37	11,71
Total	219,21	100	149,3	100	122,74	100

**Tabla 18.** Masas registradas para la obtención del Factor de Humedad.

Muestra	a (g)	b (g)	c (g)
Desagüe	9,0742	9,0706	8,7726
Puntilla el León	9,2755	9,2693	8,9393
Casa de bombas	8,86	8,853	8,5443

**Tabla 19.** Masas de sedimento usado para la determinación de materia orgánica.

Estación Muestreo	Masas		
	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)
Desagüe	0,5081	0,5075	0,5078
Puntilla El León	0,5034	0,5049	0,5055
Casa de Bombas	0,2543	0,2513	0,2534

**Tabla 20.** Volumen de FeSO<sub>4</sub> (mL) gastados y potencial (mV) registrados para las muestras. (Obtenidos de la primera derivada de la curva de titulación). Determinación de materia orgánica.

Estación Muestreo	Volumen FeSO <sub>4</sub> gastados(mL)		
	M1	M2	M3
Desagüe	11	11,5	10,5
Puntilla El León	7,5	7,5	8,0
Casa de Bombas	7,0	6,5	7,0

Volumen gastado en el Blanco =13,5 mL.

**Tabla 21.** Clasificación según materia orgánica (MO).

Porcentaje de MO	Porcentaje de Carbono orgánico	Interpretación
Menor que 2	menor que 1,2	Muy bajos
2 a 5	1,2 a 2,9	Bajos
5 a 8	2,9 a 4,6	Medios
8 a 15	4,6 a 8,7	Altos
>15	> 8,7	Muy altos

**Tabla 22.** Absorbancias obtenidas en la curva de calibración con estándares de Fósforo.

Concentración estándar (mgL <sup>-1</sup> )	Absorbancia medida	Absorbancia corregida
0,0	0,014	0,000
0,4	0,186	0,172
0,8	0,361	0,347
1,2	0,491	0,477
1,6	0,685	0,671
2,0	0,798	0,784

**Tabla 23.** Absorbancias obtenidas en muestras. Determinación de Fósforo.

Estación Muestreo	Absorbancia		
	M1	M2	M3
Sector Desagüe	0,336	0,338	0,339
Puntilla el León	0,388	0,386	0,386
Casa de Bombas	0,428	0,428	0,428
Blanco	0,025	0,025	0,028

**Tabla 24.** Concentración de Fósforo (mgL<sup>-1</sup>) para cada muestra en el extracto.

Estación Muestreo	Concentración en el extracto (mgL <sup>-1</sup> )		
	M1	M2	M3
Sector Desagüe	0.817	0.822	0.825
Puntilla el León	0.948	0.943	0.943
Casa de Bombas	1.049	1.049	1.049

**Tabla 1.** Concentración de fósforo ( $\text{mgKg}^{-1}$ ) para cada muestra en el extracto.

Estación Muestreo	Concentración en el extracto ( $\text{mgKg}^{-1}$ )		
	M1	M2	M3
Sector Desagüe	16,287	16,390	16,441
Puntilla el León	57,726	57,668	57,668
Casa de Bombas	64,149	64,401	64,401

**Tabla 26.** Masas obtenidas en las muestras. Determinación del Porcentaje de Saturación.

Estación Muestreo	Masas (g)		
	a	b	C
Sector Desagüe	10,4183	9,7481	8,7239
Puntilla el León	10,1122	9,5022	8,7977
Casa de Bombas	10,1136	9,3031	8,8080

**Tabla 27.** Porcentaje de saturación obtenidos en las muestras de sedimentos.

Estación Muestreo	Porcentaje de Saturación
Sector Desagüe	65,44 %
Puntilla el León	86,59 %
Casa de Bombas	163,7 %

**Tabla 28.** Volumen (mL) de HCl 0,1 N gastados en la titulación del extracto de saturación en las muestras de sedimento. Determinación de Bicarbonato.

Estación Muestreo	Volumen de HCl 0,1 N gastados (mL)		
	M1	M2	M3
Sector Desagüe	0,56	0,57	0,55
Puntilla el León	0,16	0,14	0,17
Casa de Bombas	1,08	1,09	1,08

**Tabla 29.** Concentración de  $\text{HCO}_3^-$  (meq/L) en muestras por cada estación.

Estación Muestreo	Concentración ( $\text{meqL}^{-1}$ )		
	M1	M2	M3
Sector Desagüe	5,6	5,7	5,5
Puntilla el León	1,6	1,4	1,7
Casa de Bombas	10,8	10,9	10,8

**Tabla 30.** Concentración de  $\text{HCO}_3^-$  ( $\text{mg/L}$ ) en las muestras de cada estación

Estación Muestreo	Concentración ( $\text{mgL}^{-1}$ )		
	M1	M2	M3
Sector Desagüe	341,66	347,76	335,56
Puntilla el León	97,62	85,41	103,72
Casa de Bombas	658,91	665,01	658,91

**Tabla 31.** Concentración de  $\text{HCO}_3^-$  ( $\text{mgKg}^{-1}$ ) en las muestras de cada estación.

Estación Muestreo	Concentración ( $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ )		
	M1	M2	M3
Sector Desagüe	223,57	227,56	219,58
Puntilla el León	159,80	139,83	169,79
Casa de Bombas	570,52	575,81	570,52

**Tabla 32.** Áreas registradas de estándares en cationes solubles

Concentración Estándar ( $\text{mgL}^{-1}$ )	Área			
	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{+2}$
2	266177	101944,7	644803	237294,7
4	294346	181878	751848	580789
6	----	----	801470,5	----
8	436424		----	----
10	----	302357	----	1083968
15	----	429666,3	1072597	1461090
20	757696	541216,5	1266303	2055886

**Tabla 33.** Cationes Solubles. Área de las bandas cromatográficas (HPLC), obtenidas en las muestras (extractos de saturación).

Estación Muestreo	Cation	Área		
		M1	M2	M3
Sector Desagüe	$\text{Na}^+$	5874809	7589268	6033590
	$\text{K}^+$	9302	13889	35312
	$\text{Ca}^{+2}$	2237926	2549338	2186735
	$\text{Mg}^{+2}$	1777319	2234874	1802049
Puntilla el León	$\text{Na}^+$	758249	1080104	1027332
	$\text{K}^+$	86559	116796	164016
	$\text{Ca}^{+2}$	4817423	3707317	5785139
	$\text{Mg}^{+2}$	1909301	2339887	2197354
Casa de Bombas	$\text{Na}^+$	241991	217219	213455
	$\text{K}^+$	91229	121305	124227
	$\text{Ca}^{+2}$	4817423	3707317	5785139
	$\text{Mg}^{+2}$	1354351	1862412	1650835

**Tabla 34.** Concentraciones de cationes solubles ( $\text{mgL}^{-1}$ ), para cada muestra.

Estación Muestreo	Cation	Concentración		
		M1	M2	M3
Sector Desagüe	$\text{Na}^+$	203,344	264,794	209,035
	$\text{K}^+$	0,433	0,205	0,265
	$\text{Ca}^{+2}$	49,825	59,287	48,270
	$\text{Mg}^{+2}$	19,859	24,666	20,119
Puntilla el León	$\text{Na}^+$	19,955	31,491	29,599
	$\text{K}^+$	0,738	2,011	3,998
	$\text{Ca}^{+2}$	128,199	94,470	157,601
	$\text{Mg}^{+2}$	21,245	25,769	24,272
Casa de Bombas	$\text{Na}^+$	1,451	0,563	0,428
	$\text{K}^+$	0,935	2,200	2,323
	$\text{Ca}^{+2}$	53,653	59,155	52,087
	$\text{Mg}^{+2}$	15,415	20,753	18,530

**Tabla 35.** Concentraciones de cationes solubles ( $\text{mgKg}^{-1}$ ), para cada muestra.

Estación Muestreo	Cación	Concentración		
		M1	M2	M3
Sector Desagüe	$\text{Na}^+$	133,068	173,281	136,793
	$\text{K}^+$	0,283	0,134	0,173
	$\text{Ca}^{+2}$	32,606	38,798	31,558
	$\text{Mg}^{+2}$	12,996	16,141	13,166
Puntilla el León	$\text{Na}^+$	17,279	27,268	25,017
	$\text{K}^+$	0,639	1,741	3,462
	$\text{Ca}^{+2}$	111,007	81,802	136,467
	$\text{Mg}^{+2}$	18,396	22,314	21,017
Casa de Bombas	$\text{Na}^+$	2,375	0,922	0,701
	$\text{K}^+$	1,530	3,602	3,803
	$\text{Ca}^{+2}$	87,830	96,836	85,267
	$\text{Mg}^{+2}$	25,235	33,972	30,334

**Tabla 36.** Áreas registradas de estándares en aniones solubles

Concentración Estándar ( $\text{mgL}^{-1}$ )	Área			
	$\text{CO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{-2}$
1	6009,7	5808,7	6829,3	14398,7
2	13300,7	14779,7	13384,3	20482,7
4	27207,3	26948,0	28245,0	31717,0
6	42329,7	43224,0	41402,3	44897,3
8	55387,0	54453,0	55472,0	54036,7
10	66760,3	65258,3	66853,3	62801,7
15	97865,3	94764,0	91766,7	90636,7
20	136007,7	120166,3	124844,3	118951,7

**Tabla 37.** Aniones Solubles. Área de las bandas cromatográficas (HPLC), obtenidas en las muestras (extractos de saturación).

Estación Muestreo	Anión	Área		
		M1	M2	M3
Sector Desagüe	$\text{CO}_3^-$	15734	14812	15447
	$\text{Cl}^-$	42266	53246	48796
	$\text{NO}_3^-$	12568	11477	11023
	$\text{SO}_4^{-2}$	644232	610941	637445
Puntilla el León	$\text{CO}_3^-$	9923	14428	11288
	$\text{Cl}^-$	44023	39917	42662
	$\text{NO}_3^-$	14730	14278	13843
	$\text{SO}_4^{-2}$	1108024	991516	1047725
Casa de Bombas	$\text{CO}_3^-$	15305	13664	14287
	$\text{Cl}^-$	13913	25710	18478
	$\text{NO}_3^-$	16335	14145	15588
	$\text{SO}_4^{-2}$	408416	581881	485678

**Tabla 38.** Concentraciones de Aniones solubles ( $\text{mgL}^{-1}$ ), para cada muestra.

Estación Muestreo	Anión	Concentración		
		M1	M2	M3
Sector Desagüe	$\text{CO}_3^-$	2,310	2,173	2,268
	$\text{Cl}^-$	6,429	8,262	7,519
	$\text{NO}_3^-$	1,538	1,359	1,285
	$\text{SO}_4^{-2}$	116,778	110,649	115,528
Puntilla el León	$\text{CO}_3^-$	1,445	2,116	1,648
	$\text{Cl}^-$	6,722	6,037	6,495
	$\text{NO}_3^-$	1,892	1,818	1,747
	$\text{SO}_4^{-2}$	202,164	180,715	191,063
Casa de Bombas	$\text{CO}_3^-$	2,247	2,002	2,095
	$\text{Cl}^-$	1,695	3,665	2,457
	$\text{NO}_3^-$	2,154	1,796	2,032
	$\text{SO}_4^{-2}$	73,363	105,299	87,587

**Tabla 39.** Concentraciones de Aniones solubles ( $\text{mgKg}^{-1}$ ), para cada muestra.

Estación Muestreo	Anión	Concentración		
		M1	M2	M3
Sector Desagüe	$\text{CO}_3^-$	1,512	1,422	1,484
	$\text{Cl}^-$	4,207	5,407	4,920
	$\text{NO}_3^-$	1,006	0,890	0,841
	$\text{SO}_4^{-2}$	76,420	72,409	75,602
Puntilla el León	$\text{CO}_3^-$	1,251	1,832	1,427
	$\text{Cl}^-$	5,820	5,226	5,623
	$\text{NO}_3^-$	1,638	1,574	1,512
	$\text{SO}_4^{-2}$	175,034	156,463	165,422
Casa de Bombas	$\text{CO}_3^-$	3,678	3,278	3,429
	$\text{Cl}^-$	2,775	5,999	4,023
	$\text{NO}_3^-$	3,526	2,940	3,326
	$\text{SO}_4^{-2}$	120,096	172,374	143,381

**Tabla 40.** Comparación de concentraciones de Metales pesados encontrados en Campaña de Monitoreo DGA, verano 2008 en las tres estaciones de la Laguna de Aculeo, con la concentración permitida por la Norma Chilena 1.333/78, Uso del agua en riego.

Parámetro	Norma chilena 1.333 (mg/L)	Verano 2008		
		Sector Desagüe (mg/L)	Puntilla el León (mg/L)	Casa de Bombas (mg/L)
PLATA	0,2	0,010	0,010	0,010
ALUMINIO	5	0,600	0,500	0,800
ARSENICO	0,1	0,002	0,002	0,002
BORO	0,75	1,000	1,000	1,000
CADMIO	0,01	0,010	0,010	0,010
COBALTO	0,05	0,010	0,010	0,010
CROMO	0,1	0,010	0,010	0,010
COBRE	0,2	0,010	0,010	0,010
HIERRO	5	0,720	0,360	0,370
MERCURIO	0,001	0,001	0,001	0,001
MANGANESO	0,2	0,210	0,210	0,190
MOLIBDENO	0,01	0,050	0,050	0,050
NIQUEL	0,2	0,020	0,020	0,020
PLOMO	5	0,050	0,050	0,050
SELENIO	0,02	0,001	0,001	0,001
ZINC	2	0,020	0,010	0,020

**Tabla 41.** Comparación de concentraciones de Metales pesados encontrados en Campaña de Monitoreo DGA, otoño 2008 en las tres estaciones de la Laguna de Aculeo, con la concentración permitida por la Norma Chilena 1.333/78, Uso del agua en riego.

Parámetro	Norma chilena 1.333 (mg/L)	Otoño 2008		
		Sector Desagüe (mg/L)	Puntilla el León (mg/L)	Casa de Bombas (mg/L)
PLATA	0,2	0,010	0,010	0,010
ALUMINIO	5	0,300	0,400	0,300
ARSENICO	0,1	0,001	0,001	0,001
BORO	0,75	1,000	1,000	1,000
CADMIO	0,01	0,010	0,010	0,010
COBALTO	0,05	0,010	0,010	0,010
CROMO	0,1	0,010	0,010	0,010
COBRE	0,2	0,010	0,010	0,010
HIERRO	5	0,140	0,280	0,260
MERCURIO	0,001	0,001	0,001	0,001
MANGANESO	0,2	0,070	0,070	0,070
MOLIBDENO	0,01	0,050	0,050	0,050
NIQUEL	0,2	0,020	0,020	0,020
PLOMO	5	0,050	0,050	0,050
SELENIO	0,02	0,001	0,001	0,001
ZINC	2	0,020	0,020	0,020

**Tabla 42.** Comparación de concentraciones de Metales pesados encontrados en Campaña de Monitoreo DGA, invierno 2008 en las tres estaciones de la Laguna de Aculeo, con la concentración permitida por la Norma Chilena 1.333/78, Uso del agua en riego.

Parámetro	Norma chilena 1.333 (mg/L)	Invierno 2008		
		Sector Desagüe (mg/L)	Puntilla el León (mg/L)	Casa de Bombas (mg/L)
PLATA	0,2	0,010	0,010	0,010
ALUMINIO	5	0,400	0,030	0,300
ARSENICO	0,1	0,001	0,001	0,001
BORO	0,75	1,000	1,000	1,000
CADMIO	0,01	0,010	0,010	0,010
COBALTO	0,05	0,010	0,010	0,010
CROMO	0,1	0,010	0,010	0,010
COBRE	0,2	0,010	0,010	0,010
HIERRO	5	0,130	0,120	0,220
MERCURIO	0,001	0,001	0,001	0,001
MANGANESO	0,2	0,030	0,040	0,060
MOLIBDENO	0,01	0,050	0,050	0,050
NIQUEL	0,2	0,020	0,020	0,020
PLOMO	5	0,050	0,050	0,050
SELENIO	0,02	0,001	0,001	0,001
ZINC	2	0,030	0,050	0,060

**Tabla 43.** Comparación de concentraciones de Metales pesados encontrados en Campaña de Monitoreo DGA, primavera 2008 en las tres estaciones de la Laguna de Aculeo, con la concentración permitida por la Norma Chilena 1.333/78, Uso del agua en riego.

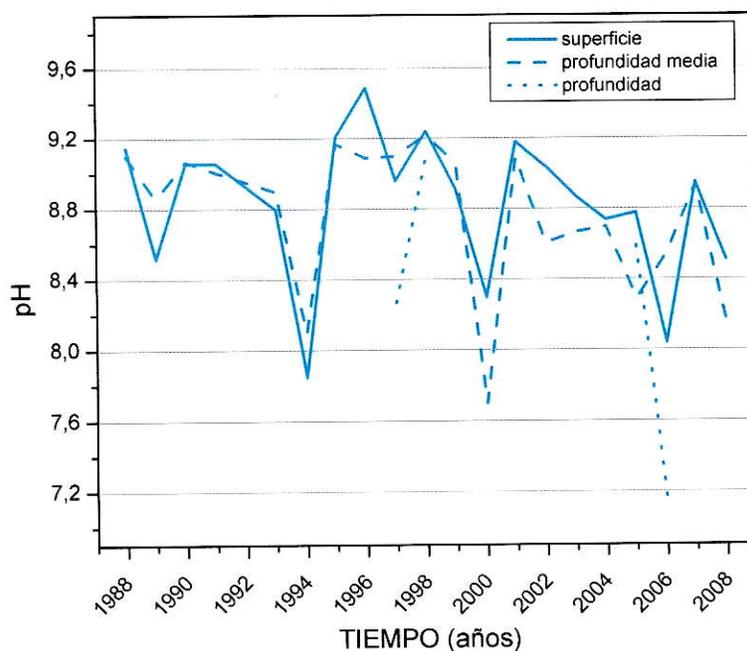
Parámetro	Norma chilena 1.333 (mg/L)	Primavera 2008		
		Sector Desagüe (mg/L)	Puntilla el León (mg/L)	Casa de Bombas (mg/L)
PLATA	0,2	0,050	0,050	0,050
ALUMINIO	5	0,050	0,170	0,040
ARSENICO	0,1	0,006	0,006	0,006
BORO	0,75	0,030	0,020	0,010
CADMIO	0,01	0,002	0,002	0,002
COBALTO	0,05	0,001	0,001	0,001
CROMO	0,1	0,002	0,002	0,002
COBRE	0,2	0,001	0,001	0,001
HIERRO	5	0,230	0,340	0,260
MERCURIO	0,001	0,001	0,001	0,001
MANGANESO	0,2	0,050	0,080	0,05
MOLIBDENO	0,01	0,017	0,017	0,017
NIQUEL	0,2	0,003	0,003	0,003
PLOMO	5	0,040	0,040	0,040
SELENIO	0,02	0,004	0,004	0,004
ZINC	2	0,05	0,02	0,03

### ANEXO III. GRÁFICOS

Este anexo considera los gráficos de las figuras (13, 15, 24, 25 y 27 pertenecientes al punto 3.2 del capítulo III. Resultados, "Comportamiento de variables en perfil de profundidad", donde no fue considerado en el análisis del perfil más profundo, debido a la poca cantidad de datos existentes, por lo que la tendencia presentada, podía no corresponder con lo verdaderamente ocurrido. Sin embargo, en este anexo se incluye en las figuras la curva de la profundidad, para efectos de consulta.

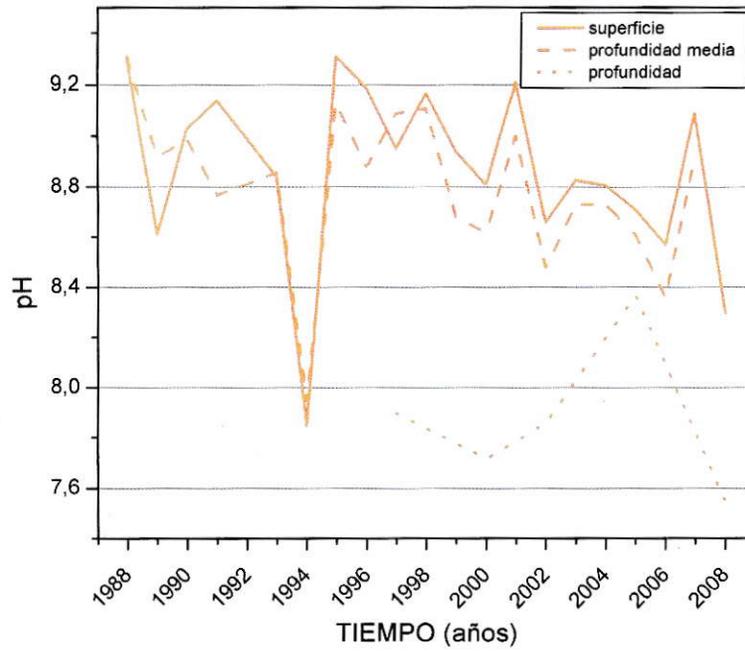
#### 1. pH

##### a) Sector Desagüe:



**Figura 37.** Perfil para profundidad de pH en el tiempo, Sector Desagüe. Incluido el perfil más profundo.

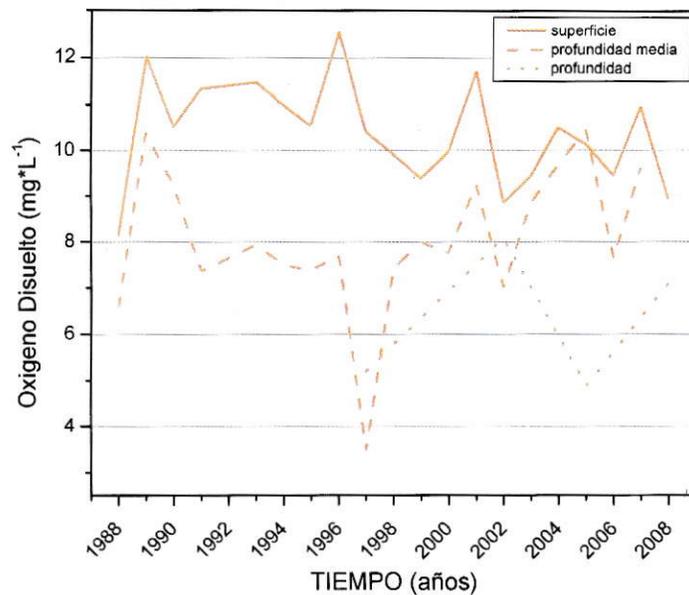
b) Casa de Bombas:



**Figura 38.** Perfil para profundidad de pH en el tiempo, en Casa de Bombas. Incluido el perfil más profundo.

## 2. Oxígeno disuelto

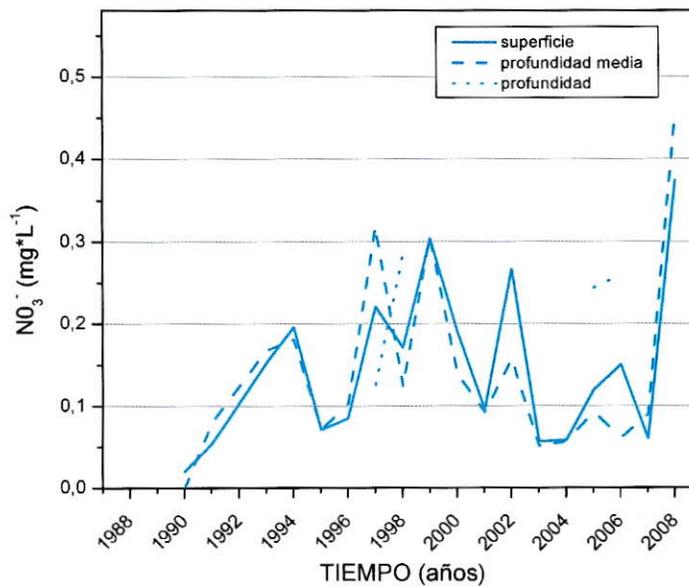
### a) Casa de bombas:



**Figura 39.** Perfil para profundidad de Oxígeno Disuelto en el tiempo, en Casa de Bombas. Includo el perfil más profundo.

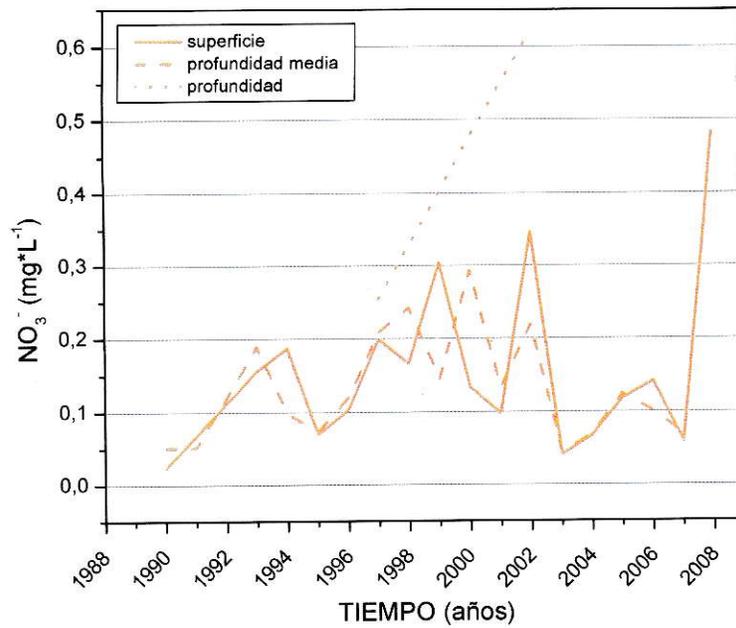
## 3. Nitrato

### a) Sector desagüe:



**Figura 40.** Perfil para profundidad de Nitrato en el tiempo, Sector Desagüe. Includo el perfil más profundo.

b) Casa de bombas:



**Figura 41.** Perfil para profundidad de Nitrato en el tiempo, en Casa de Bombas. Incluido el perfil más profundo.