



# Universidad Austral de Chile

---

Facultad de Ciencias  
Escuela de Biología Marina

PROFESOR PATROCINANTE: DR. SANDOR ILSOW  
INSTITUTO: CIENCIAS MARINAS Y LIMNOLÓGICAS  
FACULTAD: CIENCIAS

PROFESOR COPATROCINANTE: DR. EDUARDO VALENZUELA V.  
INSTITUTO: BIOQUÍMICA Y MICROBIOLOGÍA  
FACULTAD: CIENCIAS

PROFESOR INFORMANTE: DR. OSCAR MARTINEZ V.  
INSTITUTO: BIOQUÍMICA Y MICROBIOLOGÍA  
FACULTAD: CIENCIAS

## COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA PARA SEDIMENTOS Y SUELO EN CANAL DE DRENAJE DE UN HUMEDAL EN EL CAMPUS ISLA TEJA DE LA UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE.

Tesis de Grado presentada como parte de  
los requisitos para optar al grado de  
*Licenciado en Biología Marina* y al  
*Título de Biólogo Marino*.

EDISON ALONSO GARCÈS SANTANA

VALDIVIA – CHILE  
2012

*Dedicado a mi Familia y a ti Blanquita*

*Los quiero infinito, infinito ida y vuelta.*

## AGRADECIMIENTOS

En esta etapa de formación que se termina, agradezco el apoyo incondicional de mis padres, Ana y Luis a quienes les debo gran parte de este logro apoyándome en todo momento, principalmente en los más difíciles. Te agradezco a ti, Blanquita por ser mi protectora que sé, está guiando mis pasos día a día como siempre lo hiciste. Agradezco a mi tía consuelo que siempre estuvo bajo el alero para guiarme cuando lo necesitaba. A mi segunda familia, Tía Janet, Tío Eduardo, Felipe, Jaime y Carol, quienes me acogieron como un integrante más en su núcleo familiar. También agradezco el apoyo de mis amigos, los de siempre y los que se sumaron en el sendero universitario formando un importante complemento en este proceso.

Agradezco la formación de por mis profesores, donde las conversaciones y correcciones fueron una dura batalla que hoy se ve superada. Quiero agradecer de manera especial el apoyo del Dr. Julio Lamilla, por sus consejos, humor, paciencia y amistad brindados en este largo camino.

Finalmente agradezco a todos los que de una u otra manera estuvieron presentes mi formación, demostrándome que la verdadera profesión no es la que se estudia sino la que se vive.

## INDICE

<b>RESUMEN</b>	1
<b>ABSTRACT</b>	2
<b>INTRODUCCIÓN</b>	3
<b>Suelo y sedimento</b>	4
<b>Área de estudio</b>	7
<b>HIPOTESIS DE TREABAJO</b>	9
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	9
<b>OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	9
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	10
<b>Análisis químico de suelo</b>	12
<b>Susceptibilidad magnética Suelo</b>	14
<b>Susceptibilidad magnética Sedimentos</b>	14
<b>Análisis estadístico</b>	16
<b>Estimación de microorganismos y fauna acompañante</b>	16
<b>Microscopía electrónica de barrido SEM</b>	16
<b>RESULTADOS</b>	18
<b>Análisis químico del suelo</b>	18
<b>Susceptibilidad magnética de suelo</b>	29
<b>Susceptibilidad magnética de sedimentos</b>	31
<b>Estimación de microorganismos y fauna acompañante</b>	33
<b>Microscopía electrónica de barrido (SEM)</b>	33
<b>DISCUSIÓN</b>	37

<b>Análisis de suelo</b>	37
<b>Susceptibilidad magnética de suelo y sedimento</b>	40
<b>Estimación de microorganismos</b>	43
<b>Relación entre suelos y sedimento</b>	44
<b>CONCLUSIONES</b>	45
<b>REFERENCIAS</b>	46
<b>ANEXO</b>	52

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>página</b>
<b>Fig.1</b>	Área geográfica donde se encuentra situado el canal de drenaje elegido para el estudio.	<b>10</b>
<b>Fig. 2</b>	Esquema del muestreo realizado para el sector en estudio ubicado en las dependencias de la Universidad Austral de Chile.	<b>11</b>
<b>Fig. 3</b>	Canal de drenaje con presencia de óxidos férricos y coloides en el sector de la Universidad Austral de Chile.	<b>11</b>
<b>Fig. 4</b>	Esquema del método utilizado en los cortes de los testigos de suelo y sedimento para los perfiles de susceptibilidad magnética y análisis químico (modificado de Bravo, 2007).	<b>13</b>
<b>Fig. 5</b>	Modificación del protocolo digestión de sedimentos (Loring & Rantala 1992), en la obtención de Fe, para las muestras de suelo provenientes del sector en estudio.	<b>15</b>
<b>Fig.6</b>	Histogramas de la concentración de metales analizados para el testigo A de suelo en función de la profundidad. Las concentraciones están clasificadas según las zonas descritas para cada testigo (Superficial-media-profundidad).	<b>21</b>
<b>Fig.7</b>	Histogramas de la concentración de metales analizados para el testigo B de suelo en función de la profundidad. Las concentraciones están clasificadas según las zonas descritas para cada testigo (Superficial-media-profundidad).	<b>23</b>

- Fig.8** Histogramas de la concentración de metales analizados para el testigo C de suelo en función de la profundidad. Las concentraciones están clasificadas según las zonas descritas para cada testigo (Superficial-media-profundidad). **25**
- Fig.9** Histogramas de la concentración de metales analizados para el testigo D de suelo en función de la profundidad. Las concentraciones están clasificadas según las zonas descritas para cada testigo (Superficial-media-profundidad). **27**
- Fig. 10** Perfiles de Susceptibilidad Magnética X ( $\text{cgs } 10^{-6} \text{ g}^{-1}$ ) de suelos por estación y estrato. Las barras en sentido vertical muestran los niveles de estratos muestreados, mientras que las orientadas en sentido horizontal muestran el error. El tramo destacado, muestra los sectores de cantidad y calidad de suelos similares en los testigos, reflejado en la susceptibilidad magnética. **30**
- Fig. 11** Perfiles de Susceptibilidad Magnética X ( $\text{cgs } 10^{-6} \text{ g}^{-1}$ ) de sedimentos por estación y estrato. Las barras en sentido vertical muestran los niveles de estratos muestreados, mientras que las orientadas en sentido horizontal muestran el error. El sector destacado muestra los cambios de calidad del sedimento reflejados en la susceptibilidad magnética. **32**
- Fig.12** Microorganismos filamentosos observados en microscopía óptica (30x, 40x, 100x). La figura A se observa microorganismos a resolución de 30X con depósitos de óxidos férricos sobre los filamentos. La figura B se observa microorganismos a 40X. Las figuras C y D están con un aumento de 100X, donde se observan filamentos quebradizos con depósitos de hierro. **34**

- Fig.13** Representantes de los organismos observados en el canal pertenecientes al humedal. Larva de mosquito (A1 y A2) pertenecientes al género *Culex sp.*, (B1 Y B2) ciliados del género *Holophrya sp.* y (C1 Y C2) diatomeas del género *Pinularia sp.* **35**
- Fig.14** Microscopía electrónica de barrido. La imagen A, muestra una estructura circular a modo de espora liberada a través de la vaina. La imagen B se aprecia al aglomerado de estructuras filamentosas que componen la masa mucilaginosa. **36**



## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla</i>		<i>página</i>
<b>Tabla 1</b>	ANOVA de susceptibilidad magnética de sedimentos, los valores observados indican que no hay diferencias significativas con un $P \geq 0.05$ .	<b>33</b>
<b>Tabla 2</b>	Matriz de correlaciones para suelo de los elementos del testigo A en función de la profundidad.	<b>52</b>
<b>Tabla 3</b>	Matriz de correlaciones para suelo de los elementos del testigo B en función de la profundidad.	<b>53</b>
<b>Tabla 4</b>	Matriz de correlaciones para suelo de los elementos del testigo C en función de la profundidad.	<b>54</b>
<b>Tabla 5</b>	Matriz de correlaciones para suelo de los elementos del testigo D en función de la profundidad.	<b>55</b>
<b>Tabla 6</b>	Valores promedios de la susceptibilidad magnética registrada en los sedimentos del canal y el error de propagación calculado en los instrumentos utilizados durante la medición.	<b>56</b>
<b>Tabla 7</b>	Valores promedios de la susceptibilidad magnética registrada para los sedimentos del canal y el error de propagación calculado en los instrumentos utilizados durante la medición.	<b>57</b>
<b>Tabla 8</b>	Valores de la concentración de los elementos analizados mediante ICP-MS para los testigos de suelo en función de la profundidad.	<b>58</b>

## RESUMEN

En este estudio se evaluaron las características del suelo y sedimento de un humedal, en la localidad de Valdivia, utilizando metodologías químicas elementales y físicas, para establecer relaciones entre ellas.

Se colectaron cuatro testigos de suelo (adyacentes) y cinco testigos de sedimento (al interior) de un canal de drenaje perteneciente al humedal. Los testigos fueron seccionados a profundidades definidas (superficial-media-baja). Las concentraciones de metales se midieron utilizando ICP-MS. Las muestras solidas fueron digeridas por el método de microondas en bombas de teflón. En una fracción de cada sección obtenida (suelos y sedimentos), se determinó susceptibilidad magnética total. También se colecto coloides con óxidos férricos al interior del canal, lo cual permitió tomar muestras para realizar una estimación de los microorganismos presentes.

Los resultados obtenidos muestran en general un medio heterogéneo con estrecha relación entre ambas metodologías en función de la profundidad. Fe y Mn fueron los analitos con más alta concentración y presentaron correlaciones positivas con algunos de los otros componentes metálicos de las muestras.

Las muestras de coloides estaban dominadas por la presencia de microorganismo con características filamentosas los cuales mantenían cristales de oxide férrico asociados a sus filamentos.

## ABSTRACT

In this study, using elementary chemical and physical methodologies, the characteristics of the soil and sediment of a wetland in one locality of Valdivia were evaluated to establish relationships between them.

Four cores were collected from adjacent soil and five of sediment (internal) from a drainage channel belonging to the wetland. These cores were selected at defined depths (surface-medial-low). The metal concentrations were measured using ICP-MS. The solid samples were digested by the microwave method in teflon pumps. In a fraction of each section (soil and sediment), total magnetic susceptibility was also determined. Colloids with ferric oxide also were collected inner the channel, wich allow to take samples to perform estimations about the presence of microorganisms.

The results showed in general a heterogeneous medium with close relationship between both methodologies in function of the depth. Iron and Manganesum were the analytes with the highest concentration, showing a positive correlation with other metallic compounds of the samples.

The colloid samples weremostly with microorganisms of filamentous aspect with ferric oxide associated to such filaments.

## INTRODUCCIÓN

Los humedales representan uno de los ecosistemas más valiosos y a la vez frágiles de nuestro planeta y, a pesar de que cubren tan solo un 1.5 % de la superficie terrestre, se ha estimado que contribuyen al 40% de los servicios ecosistémicos renovables a nivel planetario (Costanza *et al.*, 1997).

Las distribuciones y características de los humedales costeros dependen, entre otros factores, de la dinámica marina, la evolución geológica y el clima. Estos factores son los principales responsables de las diferencias que se encuentran entre los tipos de humedales alrededor del mundo. En líneas generales, los humedales están relacionados a la influencia mareal en los estuarios, limitándose el ámbito estuarino a su parte más interna (Evans & Prego, 2003).

Los sistemas estuarinos, transicionales entre el medio terrestre y el marino, poseen una elevada variabilidad y diversidad al presentar rasgos de cada uno de los medios que en ellos convergen, además de características propias e irrepetibles.

Debido a la dinámica que posee este tipo de ambientes, hace que el grado de inundación mareal sobre el humedal, la influencia fluvial y la desigual distribución del sedimento den lugar a múltiples y muy diversos ambientes afectando las condiciones químicas y físicas de los suelos y sedimentos que lo rodean.

## **Suelo y sedimento**

El suelo se define como aquella entidad natural presente en la superficie terrestre que ocupa un espacio y está compuesta por una fase sólida (minerales y materia orgánica), otra líquida y una tercera gaseosa (Soil Survey Staff, 1999).

El suelo se caracteriza por estar dividido en estratos diferenciados del material original como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones durante su proceso de formación.

Cuando se estudian ambientes transicionales entre sistemas acuáticos y terrestres como las marismas existen diferentes acepciones de suelos y sedimentos (Ferreira *et al.*, 2007) si se atiende a la propia definición de suelo, las marismas corresponden al límite inferior de la distribución del suelo en la superficie terrestre.

Al estudiar este tipo de superficies se pueden encontrar elevados valores ambientales en humedales que contrastan con su fragilidad, ya que son sistemas particularmente sensibles a usos inadecuados o excesivos.

Debido a que los humedales están sujetos a la alteración del régimen de inundación y el drenaje del terreno, la formación de un ambiente aeróbico puede producir la oxidación de los sulfuros de hierro, generalmente pirita. Esta oxidación trae como consecuencia una fuerte disminución del pH del suelo, pudiendo llegar a generar suelos sulfatoácidos (Van Breemen, 1982). La acidificación de los suelos conlleva además la solubilización de Fe (II), Mn (II) y metales traza. El aumento de la biodisponibilidad del Fe (II) y Mn (II) puede suponer un problema de toxicidad en algunos ambientes acuáticos (Otero & Macías, 2003).

Estudios acerca de la biodisponibilidad de elementos trazas o metales pesados presente en los suelos hacen referencia a la presencia de factores geológicos o antropológicos. Los primeros dependen, en gran medida, de la denominada geodisponibilidad definida como una porción de un elemento o compuesto químico que puede liberarse a la superficie o cerca de ella, por procesos mecánicos, químicos o biológicos (Plumlee, 1994). Pero la geodisponibilidad de los elementos de las rocas y su aportación al suelo es insignificante en comparación con las derivadas de las acciones antropogénicas (Galan & Romero, 2008).

Si se toma en cuenta la acción antropogénica en ambientes de humedales en conjunto a la erosión hídrica y eólica (Moreno *et al.*, 2009), hacen que estos sistemas provoquen la liberación y dispersión de metales pesados y elementos traza al ambiente. Situación que, al no tener ninguna actuación de remediación (microorganismos), podría durar cientos de años (Gundersen *et al.*, 2001).

Se ha demostrado que este tipo de ambientes contienen importantes cantidades de metales pesados como plomo, zinc, cobre y cadmio con una elevada movilidad incluso en los sedimentos que drenan parte de los humedales (Conesa *et al.*, 2006).

Para evaluar estos problemas de toxicidad por metales pesados en ambientes de humedales, los sedimentos constituyen un material fundamental para conocer el grado de composición de una determinada zona. Los sedimentos debido a sus características de formación actúan como portadores y posibles fuentes de contaminación, comportándose como un reservorio.

El estudio de “Análisis de la composición físico química de los sedimentos fluviales y su relación con la disponibilidad de metales en agua”, menciona que bajo determinadas

condiciones físicas y químicas los sedimentos pueden tener efectos adversos sobre la biota la cual serviría de bioindicadora, además de estar transfiriendo compuestos tóxicos a lo largo de la cadena trófica por bioacumulación (Chile, Centro Nacional del medio Ambiente, 2010). Este tipo de proceso se ve reflejado en la sedimentación del material particulado permitiendo almacenar diferentes componentes químicos, tanto metales como de otros tipos de contaminantes, influyendo en la composición del agua superficial.

Una de las técnicas utilizadas para conocer el grado de composición de los sedimentos es la susceptibilidad magnética. Esta técnica, propias del magnetismo ambiental y del paleomagnetismo, se basan en la medición de la susceptibilidad magnética y de otros parámetros asociados, a través de los que se determina su remanencia y el tipo de respuesta de los minerales cuando se exponen a un campo magnético. La utilidad de este tipo de medidas reside en que son relativamente baratas, rápidas y en que aportan información acerca de la composición, concentración y tamaño de grano de los minerales magnéticos presentes en el sedimento (Thompson & Oldfield, 1986; Verosub y Roberts, 1995; Dekkers, 1997; Maher, 1999).

En el sur de África, se ha utilizado esta técnica en humedales basados en la morfología del suelo, la vegetación y la posición del paisaje. Con este procedimiento se ha logrado diferenciar los suelos de los humedales y los que no pertenecían a humedales, siendo una forma rápida y alternativa para este tipo de estudios (Williams & Cooper, 1990).

De esta forma, el estudio de los minerales magnéticos presentes en sedimentos acuáticos permite hacer consideraciones acerca de la dinámica sedimentaria de ciertas áreas, al ser posible determinar el origen de los minerales magnéticos del sedimento y

establecer así su procedencia. También permite extraer información acerca de la evolución postsedimentaria del sedimento, a partir de las transformaciones diagenéticas que afectan a los minerales magnéticos durante la sedimentación.

### **Área de estudio**

En la ciudad de Valdivia se encuentran precisamente humedales con características de influencia estuarina, los cuales presentan una dinámica particular en composición de los suelos y sedimentos. Estudios hacen referencia a las características de los suelos presentes en el sector, destacando los Trumaos (clasificados en la categoría internacional “Typic Dystrandeps”) (86% de la superficie total de suelos, IREN-UACH, 1978) y Rojos Arcillosos (clasificados como “Haplumbrepts”, IREN–UACH, 1978).

Los suelos Trumaos derivan de cenizas volcánicas de tipo andesítico-basáltico, a la vez que los suelos Rojos Arcillosos provienen de materiales del complejo metamórfico de la costa, o de cenizas volcánicas pleistocénicas depositadas sobre materiales metamórficos. Básicamente, se diferencian de los anteriores en su antigüedad, pues se les considera de edad pre-Llanquihue (IREN-UACH, 1978).

Debido a sus características de formación, los suelos tipo Trumaos, pueden presentar procesos naturales y antrópicos de acidificación (uso de fertilizantes con alto contenido amoniacales). Los niveles de materia orgánica total y minerales oxidables son muy altos los cuales disminuyen bruscamente con la profundidad.

En el campus de la UACH, sector Isla Teja, se encuentra un humedal que manifiesta uno de los ambientes que reflejan esta condición, en los cuales se observa, a priori,



depósitos de hierro. Por la proximidad a los laboratorios de la Universidad, hacen de este tipo de micro hábitat un área muy particular para realizar estudios biogeoquímicos.

El micro-hábitat mencionado anteriormente se encuentra a la salida de un humedal el cual presenta una serie de canales que drenan hacia el río. En este humedal se ha observado que durante periodos de mareas vivas y/o lluvias intensas, el canal de drenaje inunda la pradera de pasto que lo delimita. Es justamente en estos canales donde la presencia de depósitos de óxidos de hierro establecería una posible asociación a microorganismos observados en el lugar.

El presente estudio se efectuó en uno de los canales de drenaje de la UACH, donde se analizó la composición química de los sedimentos (canal) y suelos adyacentes en función de las características de los tipos de suelo Valdivianos. Además se estimó la presencia de microorganismos que podrían vivir asociados a óxidos de hierro presentes en el lugar.

## HIPOTESIS DE TRABAJO

**H0:** Los sedimentos y suelos adyacentes al canal de drenaje en el campus de la Universidad Austral de Chile, presentan relación entre la concentración de metales y la susceptibilidad magnética.

**H1:** Los sedimentos y suelos adyacentes al canal de drenaje en el campus de la Universidad Austral de Chile, no presentan relación entre la concentración de metales y la susceptibilidad magnética.

## OBJETIVO GENERAL

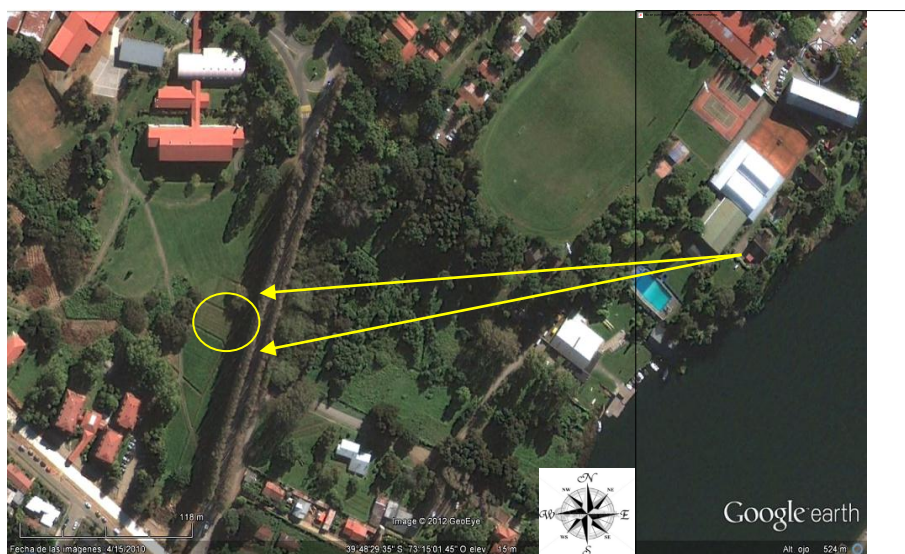
Evaluar la composición química y física (magnética) de los suelos y sedimentos adyacentes al canal de drenaje del humedal, localizado en el campus de la Universidad Austral de Chile.

## OBJETIVOS ESPECIFICOS

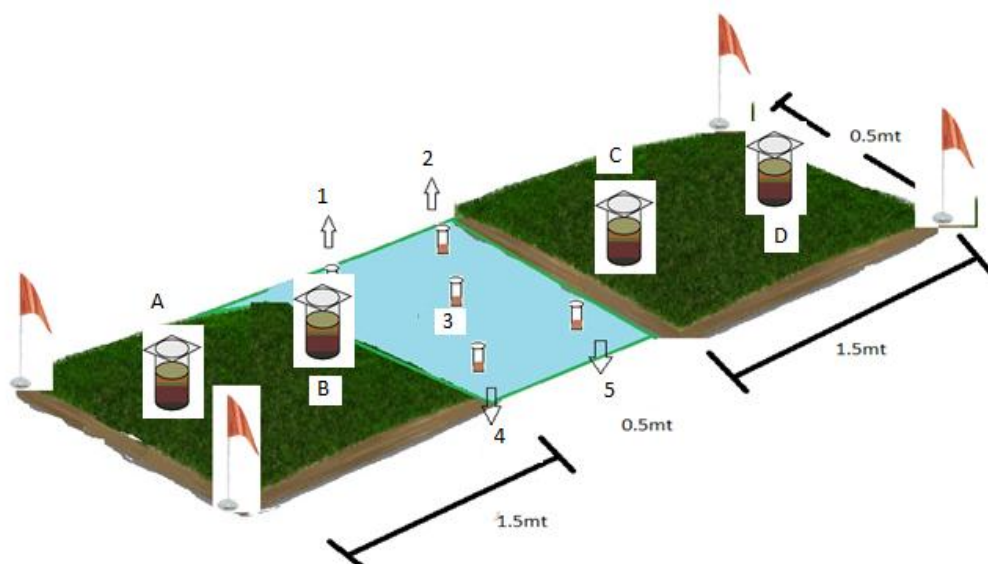
1. Analizar las características químicas del suelo adyacente al canal de drenaje del humedal.
2. Evaluar la susceptibilidad magnética del suelo y sedimentos adyacentes al canal de drenaje del humedal
3. Estimar cualitativamente los microorganismos que habitan en los depósitos de óxidos de hierro presentes en las aguas del canal de drenaje del humedal.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se encuentra ubicada en la Isla Teja (39°48'32" L.S y 73°15'26" L.O), al lado de la entrada principal (alameda) de la Universidad Austral de Chile (Figura 1). Para trabajar de mejor manera se delimito un área 1.75 m<sup>2</sup>, la cual comprendía ambos sectores del canal (Figura 2 y 3).



**Figura 1.-** Área geográfica donde se encuentra situado el canal de drenaje elegido para el estudio.



**Figura 2.** Esquema del muestreo realizado para el sector en estudio ubicado en las dependencias de la Universidad Austral de Chile.



**Figura 3.** Canal de drenaje con presencia de óxidos férricos y coloides en el sector de la Universidad Austral de Chile.

### **Análisis químico de suelo**

El análisis químico del suelo se realizó colectando cuatro muestras alrededor del canal mediante testigos de 50 cm de longitud y 15 cm de diámetro. Los testigos de suelo fueron seccionados con ayuda de un sediment- slicer a 0-5 cm, 5-10 cm 10-15 cm (Figura 4). De cada testigo se obtuvieron tres cortes de suelo (12 secciones en total). Cada sección del testigo se dividió en dos mitades, una mitad destinada al análisis elemental y la otra mitad para la medición de susceptibilidad magnética. La subdivisión de la sección destinada al análisis elemental se subdividió nuevamente con motivo de obtener una réplica para el tratamiento de digestión de metales, las cuales fueron guardadas individualmente en placas Petri para transportarlas al laboratorio de Geobenthos-UACH.

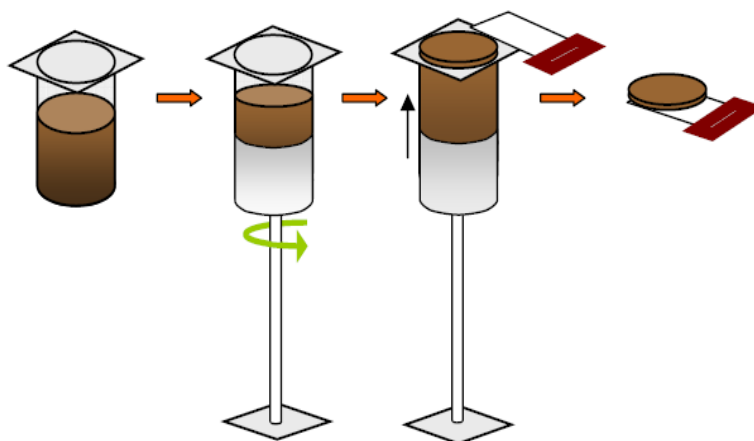
Las muestras obtenidas (24 destinadas al análisis elemental y 12 a susceptibilidad magnética) de los testigos de suelo fueron liofilizadas. Posteriormente se sometieron a una digestión de sedimentos según el protocolo utilizado (Figura 5), el cual es una modificación de la digestión de metales pesados (Loring & Rantala 1989). Para este procedimiento se tomó una muestra y su réplica de cada sección de los testigos de suelo pesando 0.5 gr de cada una sobre bombas de teflón. Posteriormente se pesó una muestra de 0.5 gr de sedimento provenientes del mar Báltico como referencia (Baltic Sea Sediment-IAEA). Además, se analizó un blanco químico (solo reactivos no sedimento) para identificar la pureza de los reactivos y la limpieza del análisis.

El protocolo utilizado en la digestión, básicamente consiste en digerir los sedimentos en bombas de teflón, las cuales son sometidas a microondas y luego a una evaporación

constante sobre una plancha caliente, donde el anión  $\text{Cl}^-$  es llevado a una concentración de 0,5 N.

Para el análisis de las muestras obtenidas de la digestión se tomó una alícuota de 1,5 mL de cada muestra digerida (24) y se almacenaron en microtubos a  $4^\circ\text{C}$ . Las muestras fueron enviadas a un laboratorio de ICP-MS (Universite of Lyon, France). En el análisis se utilizó In (indio) en cada medición como trazador de la eficiencia del ICP-MS, el cual midió una suite de ocho elementos que se mencionan a continuación: Li, Fe, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As.

Para los análisis de los elementos mediante ICP-MS, se realizaron gráficas (Histogramas) en base a In y correlaciones (Bivariadas), con la finalidad de observar su distribución y relación en función de la profundidad.



**Figura 4.-** Esquema del método utilizado en los cortes de los testigos de suelo y sedimento para los perfiles de susceptibilidad magnética y análisis químico (modificado de Bravo, 2007).

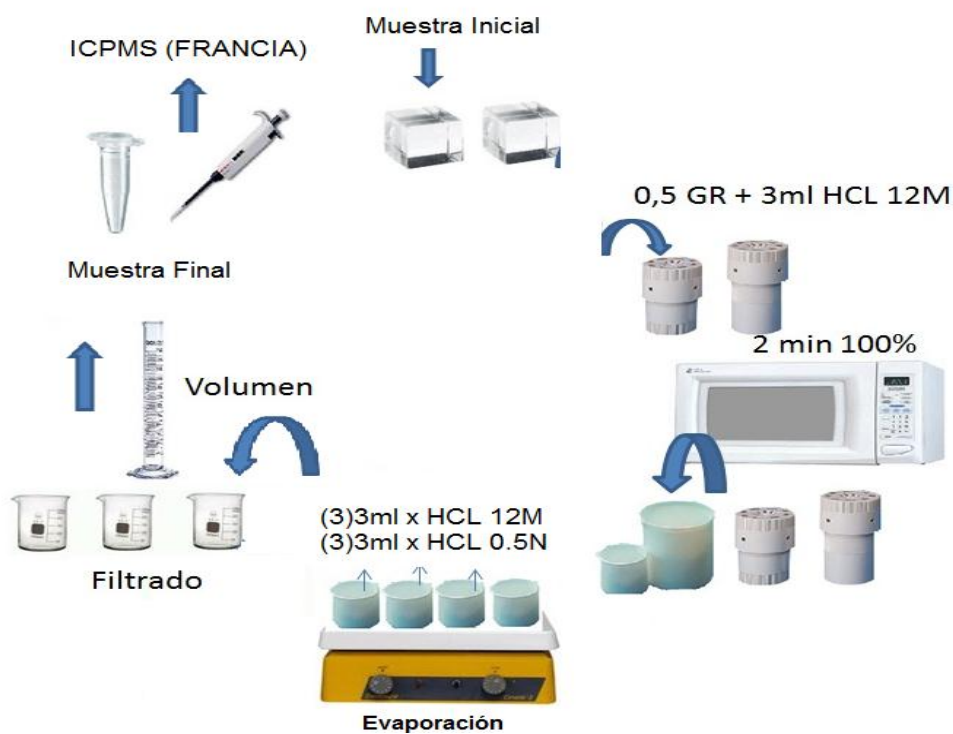
### **Susceptibilidad magnética Suelo**

La susceptibilidad magnética se registró mediante una de las partes de las secciones (12) de los testigos de suelo previamente liofilizados. Estas fueron puestas en cubos estándares de  $1 \text{ cm}^3$  mediante la técnica de cuarteo (Chui *et al.*, 2009) para determinar la presencia de minerales ferromagnéticos en función de la profundidad. La susceptibilidad magnética se midió con un susceptómetro MS2 Bartington y los datos fueron estandarizados a 1 gr. El susceptómetro fue constantemente calibrado con una referencia de  $51 \times 10^{-6}$  cgs la cual tiene una geometría similar a las muestras analizadas.

### **Susceptibilidad magnética Sedimentos**

La susceptibilidad magnética se realizó en las muestras de sedimentos obtenidos al interior del canal. Para obtener las muestras, se tomaron cinco testigos de 20 cm de longitud y 5 cm de diámetro. Estos fueron retirados y seccionados desde la superficie a intervalos de 5 mm, ayudados por un sediment-slicer hasta completar los 10 mm del testigo (Figura 4). Los siguientes cortes se realizaron cada 1 cm hasta completar el testigo. La totalidad de los cortes (12 por cada testigo), fueron guardados en placas petri, las cuales fueron transportadas al laboratorio de Gebentos-UACH.

El total de cortes (60) fueron liofilizados y puestos en cubos estándares de  $1 \text{ cm}^3$  mediante la técnica de cuarteo (Chui *et al.*, 2009) para determinar la presencia de minerales ferromagnéticos en función de la profundidad. Para esta medición se utilizó un susceptómetro MS2 Bartington y los datos fueron estandarizados a 1 gr. El susceptómetro fue constantemente calibrado con una referencia de  $51 \times 10^{-6}$  cgs con una geometría similar a las muestras analizadas.



**Figura 5.** Modificación del protocolo digestión de sedimentos (Loring & Rantala 1992), en la obtención de Fe, para las muestras de suelo provenientes del sector en estudio.



### **Análisis estadístico**

El análisis estadístico consistió en realizar una ANOVA para los registros de susceptibilidad magnética, estableciendo relaciones de causalidad y/o diferencias entre las estaciones de sedimentos muestreadas.

Para los análisis elementales (ICP-MS) se realizó una matriz de correlación bibariada, para observar el comportamiento de los metales en función de la profundidad.

### **Estimación de microorganismos y fauna acompañante**

Debido a la presencia de secreciones orgánicas de color marrón, en los depósitos de óxidos de hierro presentes en el agua del canal, se tomaron muestras para estimar los microorganismos que posiblemente habitan asociados a este mineral.

Las muestras fueron tomadas mediante una jeringa de 50 mL, la cual se introdujo en la interface agua- sedimento, con presencia de material coloidal. El volumen extraído fue de 40 mL, el cual se guardó en un tubo centrifuga estéril de 50 mL. Este fue cerrado y llevado al laboratorio de Geobentos UACH para su observación. A su vez se midieron in-situ los parámetros ambientales con un multiparametrico.

La muestra obtenida fue montada en fresco y observada en un microscopio óptico con aumentos de 30x, 40x y 100x. Posteriormente se realizó una tinción de Gram.

### **Microscopía electrónica de barrido SEM**

Para realizar una observación más detallada de los microorganismos presentes en la masa coloidal, se preparó una muestra en fresco según protocolo para microscopia electrónica de barrido.

La preparación de las muestras se realizó mediante el siguiente protocolo:

1. Fijar con 2% glutaraldehído en tampón Cacodilato 0.1 M a pH=7.4, 1 h a T<sup>a</sup> ambiente (25 °C).
2. Lavar con Tampón Cacodilato + Sacarosa isosmolar con el fijador
3. Post-fijar con 1% OsO<sub>4</sub> en Cacodilato, 1 h en oscuridad a 4 °C.
4. Lavar con Cacodilato, 10 min
5. Deshidratar en serie creciente de EtOH (30%, 50%, 70%, 90%, 96%, 100%, dos veces 100% absoluto, 10 min en cada muestra).
6. Desecado al punto crítico. Como alternativa, se puede lavar en hexamethyldisilazane 10 min y dejar secar (25°C).
7. Colocar las muestras sobre soportes de microscopio electrónico de barrido utilizando cemento conductor.
8. Recubrimiento metálico con oro en atmósfera de Argon.
9. Visualizar y fotografiar en un microscopio electrónico de barrido.

## RESULTADOS

### Análisis químico del suelo

Los resultado del análisis mediante ICP-MS, se correlacionaron y graficaron con la finalidad de observar su distribución y relación en función de la profundidad. Para esto se describieron tres zonas para cada testigo analizado. La zona superficial (0 cm – 5 cm), la zona media (5 cm – 10 cm) y la zona de profundidad (10 cm - 15 cm).

El testigo A (Figura 6) muestra en general a los elementos Cd, Li, Cr, Mn, Ni, Zn, As y Cu correlacionados positivamente (Anexo; Tabla 2). Las mayores concentraciones de estos elementos con respecto a la profundidad se observan en la zona media del testigo. Los elementos que presentaron las concentraciones más altas en relación a los estratos analizados fueron el Zn con  $37,72 \mu\text{gKg}^{-1}$  (ln 3,63) en la zona superficial y el Mn con una concentración de  $70,07 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 4,25) para la zona media y  $201,9 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 5,319) para la zona de profundidad (Anexo; Tabla 2).

Los elementos Se y Fe en este testigo se encuentran correlacionados positivamente en función de la profundidad. De estos dos elementos el que predomino en concentración fue el Fe con  $114,4 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 4,74) en la zona superficial,  $266,28 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 5,58) en la zona media y  $520 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 6,25) en la zona de profundidad (Anexo; Tabla 3). El elemento que presentó los valores más elevados en relación a la totalidad de los elementos medidos para este testigo fue el Fe.

El testigo B (Figura 7) muestra a los elementos Li, Mn, Cd y Zn correlacionados positivamente en función de la profundidad. Entre los elementos que destacan en concentración se encuentra el Mn con  $30,67 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 3,42) en la zona superficial,

42,45  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 3,75) en la zona media y 58,53  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 4,07) en la zona de profundidad.

El elemento Fe presento una correlación negativa respecto a los elementos analizados. Los valores observados para la zona superficial fueron de 529,2  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 6,27), 297,52  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 5,7) en la zona media y 181,96  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 5,20) para la zona de profundidad. Este elemento presentó los valores más altos en relación a la totalidad de los elementos analizados para este testigo.

Para los elementos Cr, Se, Ni, As y Cu del testigo B, se mostraron correlacionados de manera positiva en relación a la profundidad. Los valores más altos en general se observan en la zona media del testigo. Entre los elementos observados que destacan en concentración se encuentra el Cu con 5,962  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 1,79) para la zona superficial, 9,919  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 2,29) para la zona media y 5,497  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 1,70) para la zona de profundidad respectivamente.

El testigo C (Figura 8) muestra a los elementos Li, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As y Cd correlacionados positivamente en relación a la profundidad (Anexo; Tabla 6). De estos elementos los que presentan mayor concentración entre los estratos muestreados destaca el Mn con una concentración de 74,38  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 4,31) para la zona superficial, 42,45  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 3,75) para la zona media y 100,8  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 4,61) para la zona de profundidad.

En este testigo el Fe presenta una correlación negativa con respecto a la profundidad. Los valores más altos registrados entre los estratos fueron 145,48  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 4,98) en la zona superficial, 146,24  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 4,99) para la zona media y 139,68  $\mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 4,94) para la zona de profundidad. El Se, a su vez también presento una correlación negativa

a la mayoría de los elementos en función de la profundidad, sin embargo su mayor concentración fue observada en el estrato medio con  $0,137 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln -1,99).

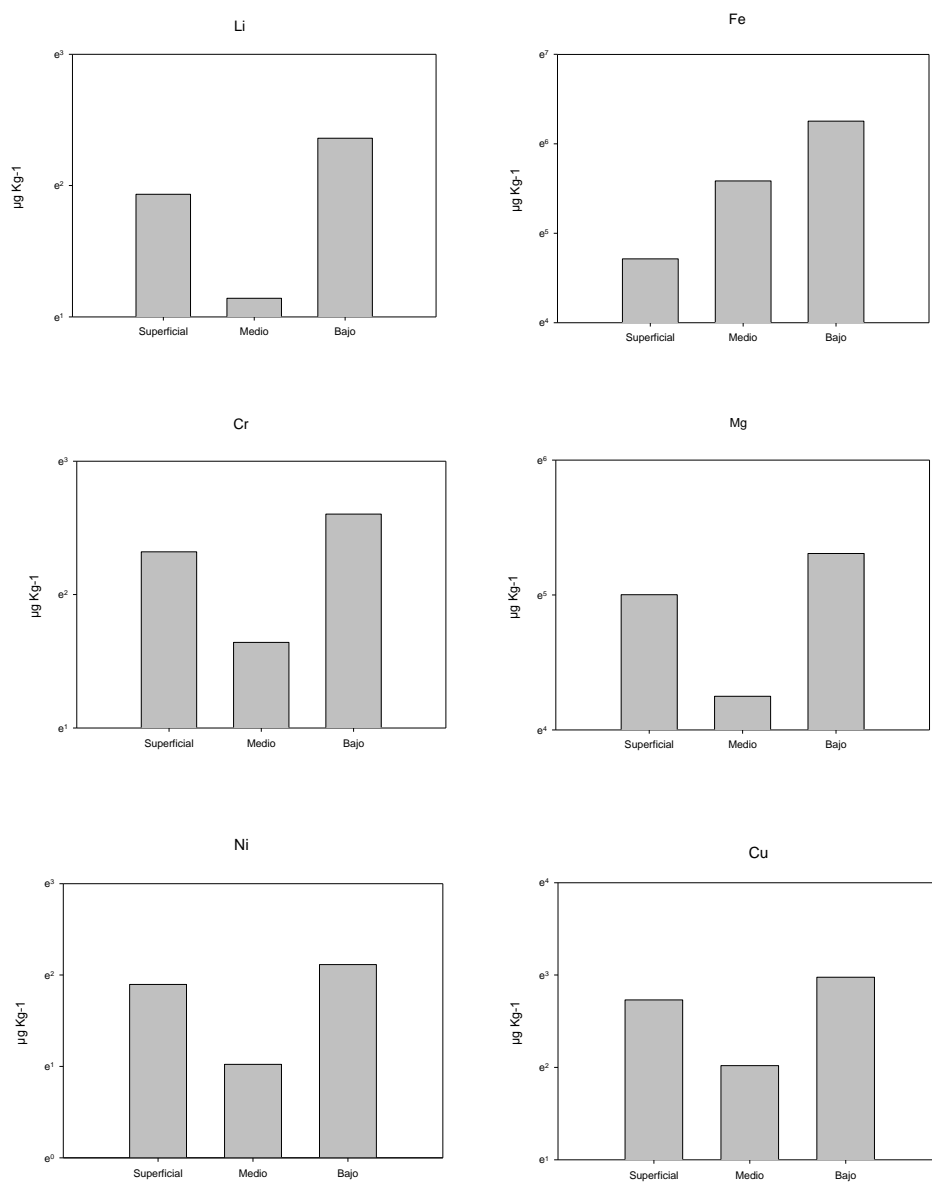
El elemento que presento las mayores concentraciones con relación a la totalidad de los elementos analizados en este testigo fue el Fe.

El testigo D (Figura 9) muestra a los elementos Li, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Se y Cd correlacionados positivamente en función de la profundidad. Las mayores concentraciones para estos elementos se observan en la zona media. A su vez entre los elementos que destacan en los estratos analizados se encuentra el Mn con una concentración de  $66,57 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 4,20) en la zona superficial,  $130 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 4,87) para la zona media y  $38,83 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 3,66) para la zona de profundidad.

El Fe presenta una correlación negativa en relación a los demás elementos analizados en función de la profundidad. Los valores observados para la zona superficial es de  $594,8 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 6,39),  $280,28 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 5,64) para la zona media y  $807,6 \mu\text{g Kg}^{-1}$  (ln 6,69) para la zona de profundidad. Este elemento presento los valores de concentración más altos de este testigo para cada zona descrita en relación a la totalidad de los demás elementos analizados (Anexo; Tabla 2).

## Elementos

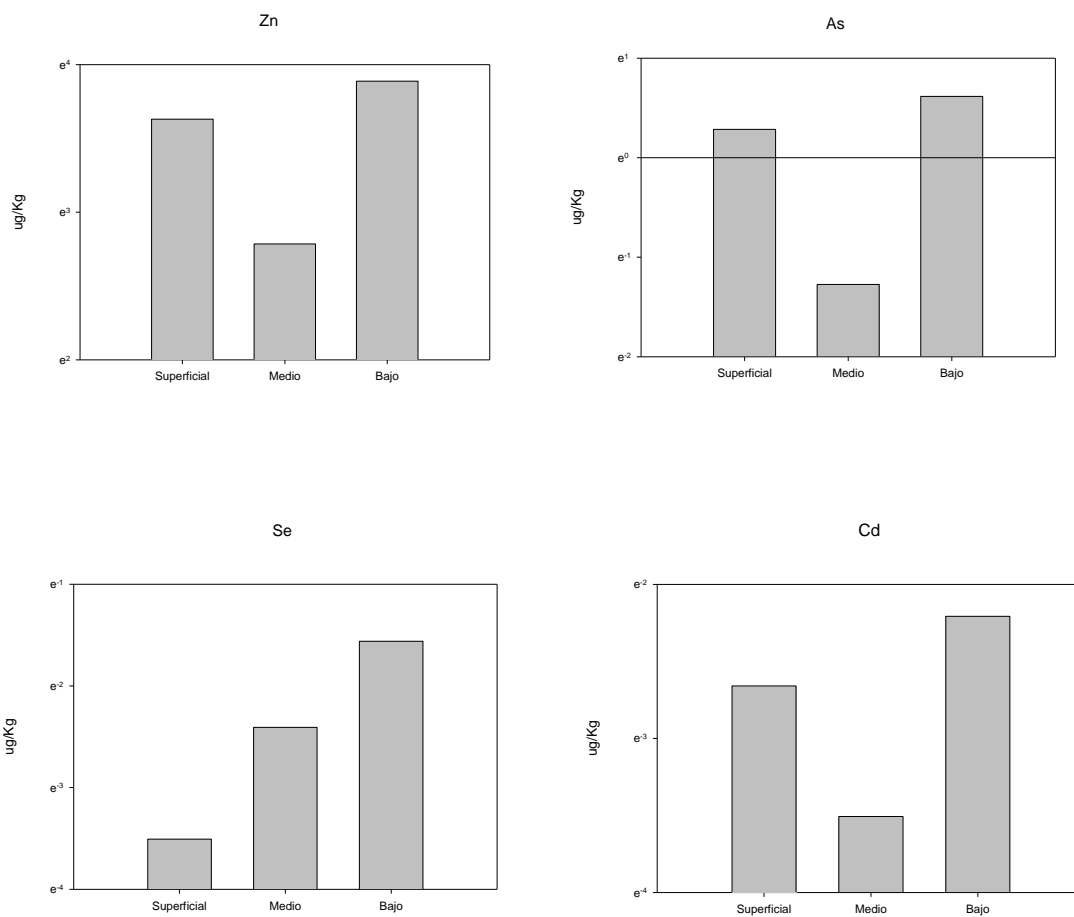
Ln Concentración de metales (ICP-MS)



**Figura 6.** Histogramas de la concentración de metales analizados para el testigo A de suelo en función de la profundidad. Las concentraciones están clasificadas según las zonas descritas para cada testigo (Superficial-media-profundidad).

## Elementos

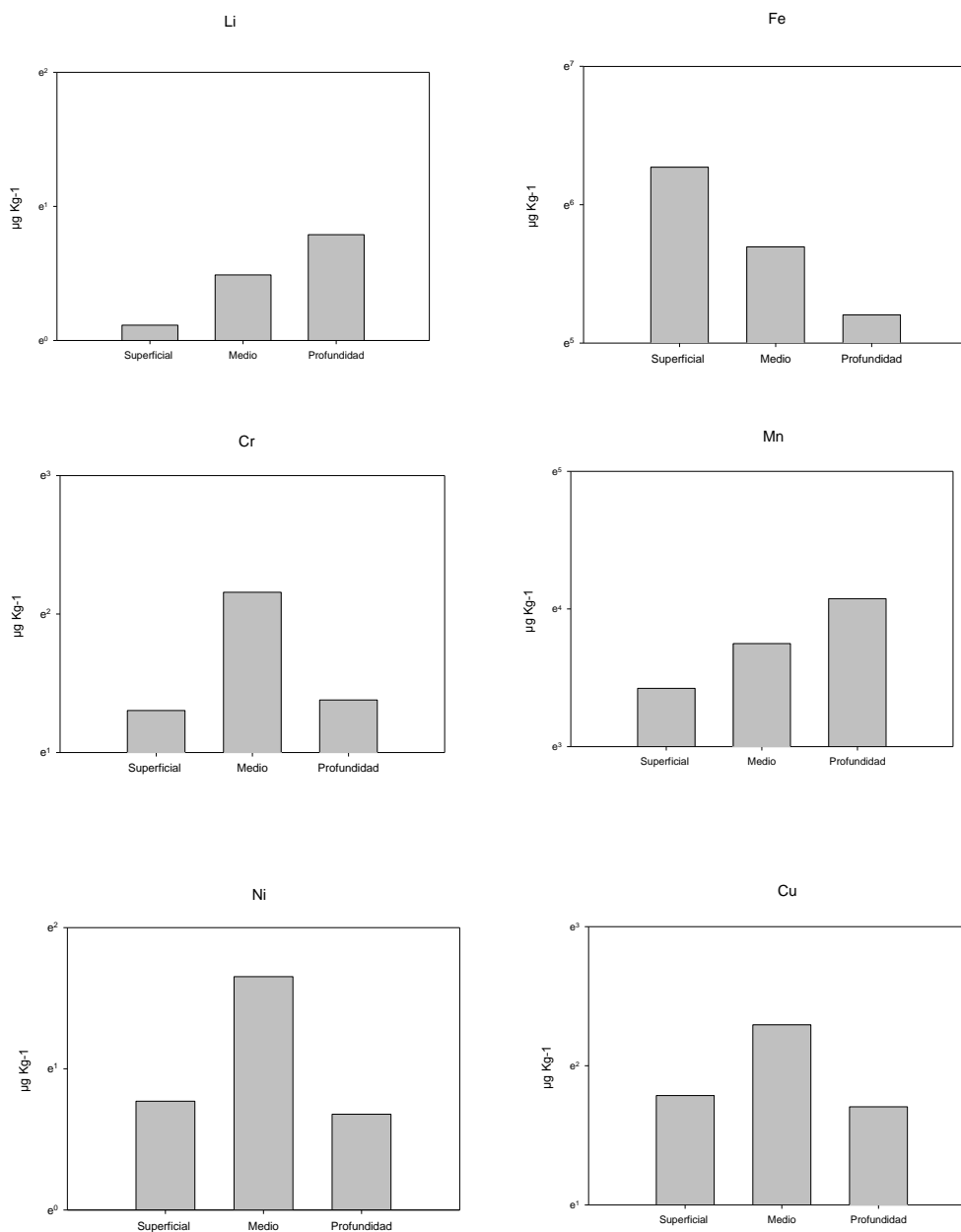
Ln Concentración de metales (ICP-MS)



**Continuación Figura 6.** Histogramas de la concentración de metales analizados para el testigo A de suelo en función de la profundidad. Las concentraciones están clasificadas según las zonas descritas para cada testigo (Superficial-media-profundidad).

## Elementos

## Ln Concentración de metales (ICP-MS)

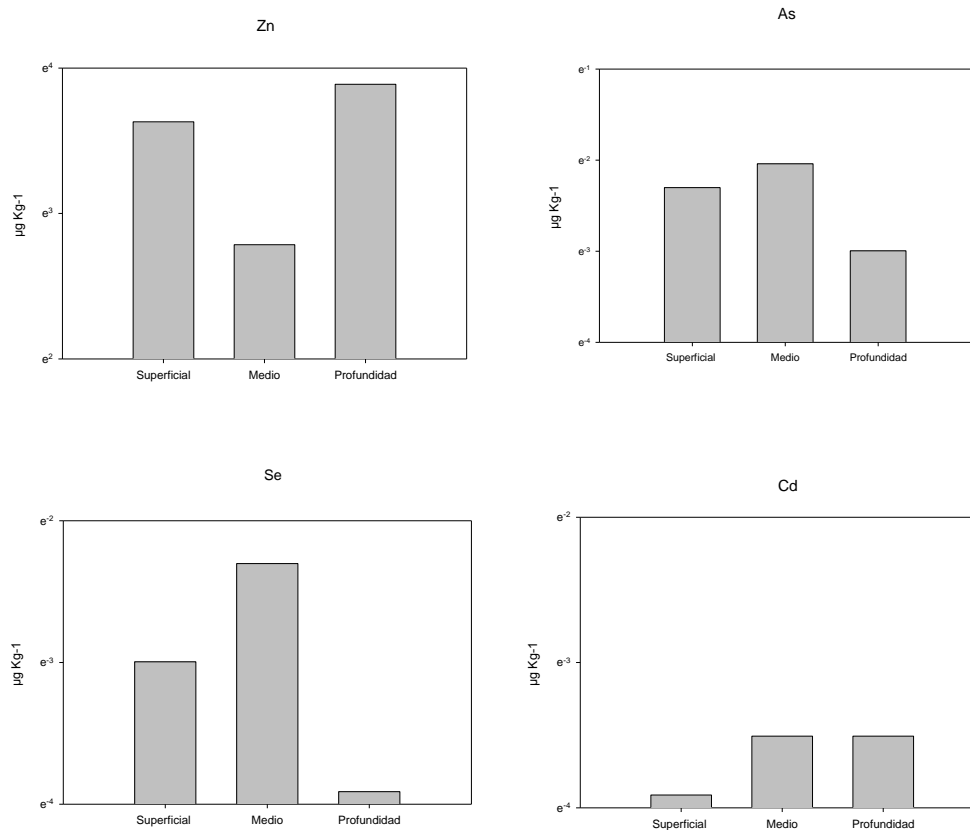


**Figura 7.** Histogramas de la concentración de metales analizados para el testigo B de suelo en función de la profundidad. Las concentraciones están clasificadas según las zonas descritas para cada testigo (Superficial-media-profundidad).



## Elementos

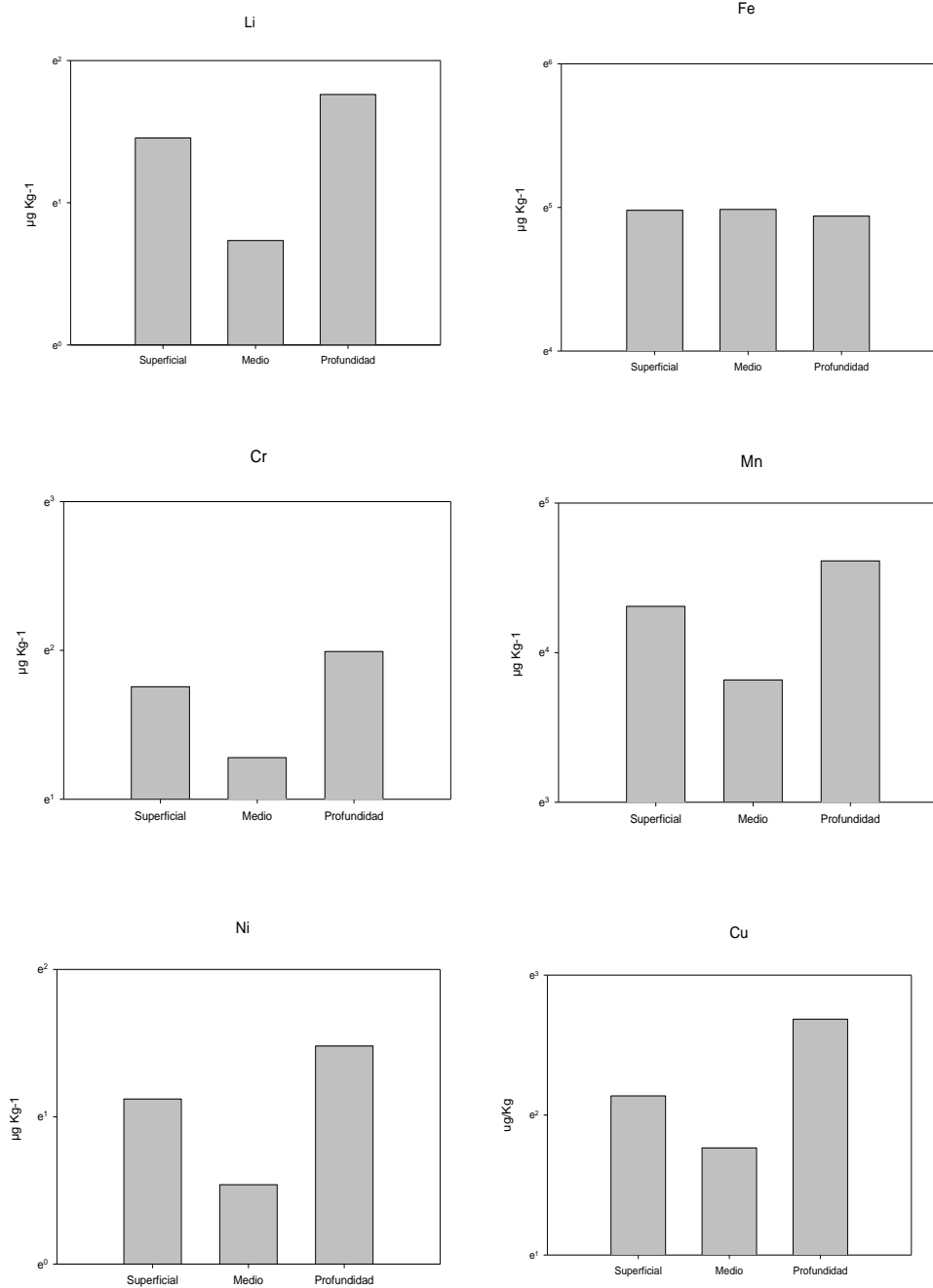
## Ln Concentración de metales (ICP-MS)



**Continuación Figura 7.** Histogramas de la concentración de metales analizados para el testigo B de suelo en función de la profundidad. Las concentraciones están clasificadas según las zonas descritas para cada testigo (Superficial-media-profundidad).

## Ln Concentración de metales (ICP-MS)

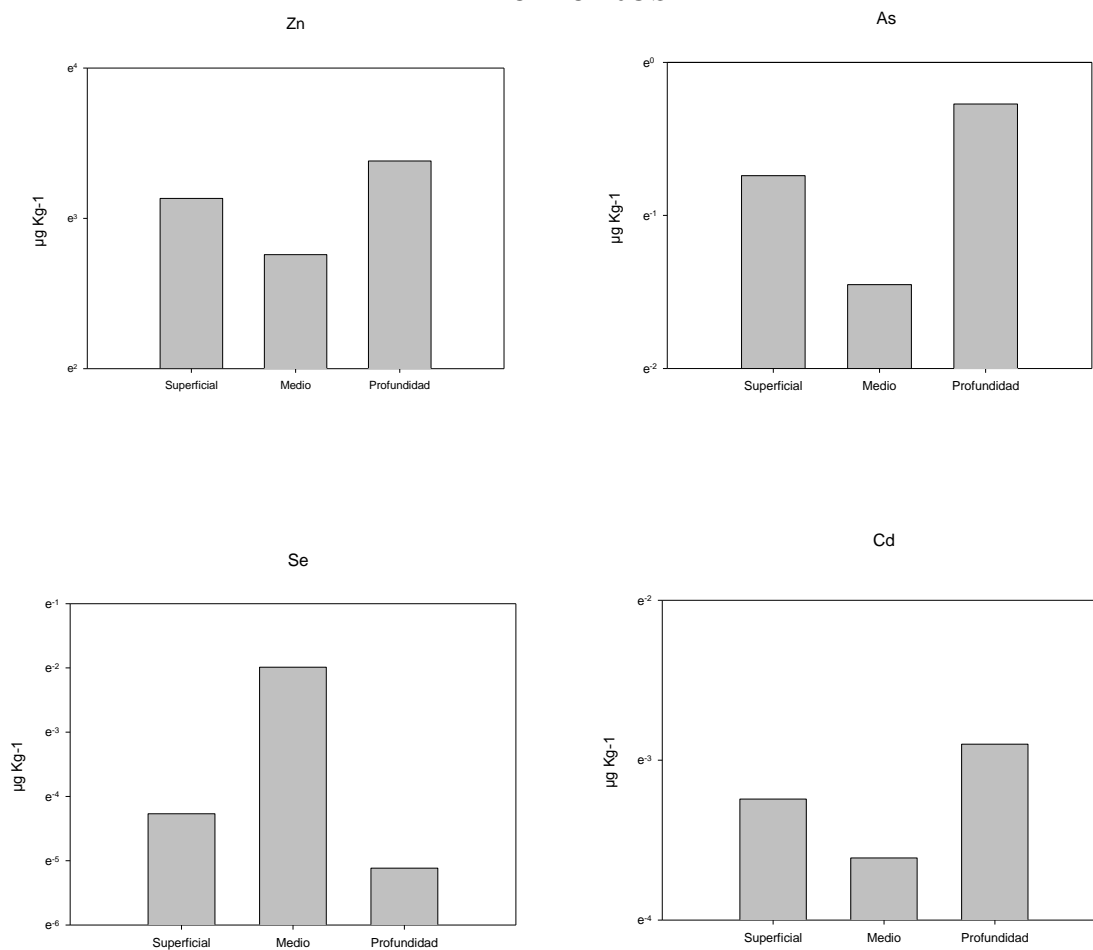
## Elementos



**Figura 8.** Histogramas de la concentración de metales analizados para el testigo C de suelo en función de la profundidad. Las concentraciones están clasificadas según las zonas descritas para cada testigo (Superficial-media-profundidad).

## Ln Concentración de metales (ICP-MS)

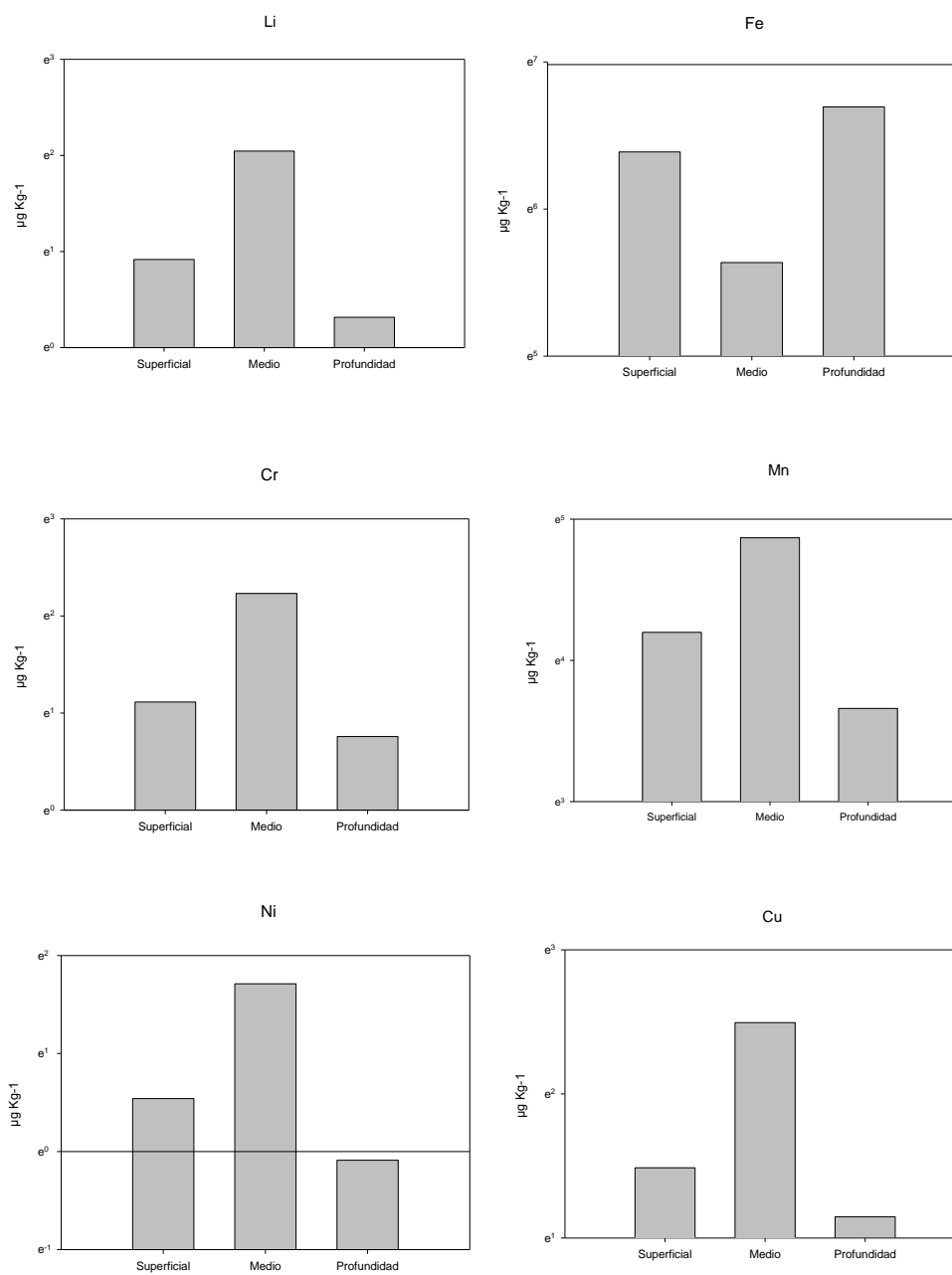
## Elementos



**Continuación Figura 8.** Histogramas de la concentración de metales analizados para el testigo C de suelo en función de la profundidad. Las concentraciones están clasificadas según las zonas descritas para cada testigo (Superficial-media-profundidad).

## Elementos

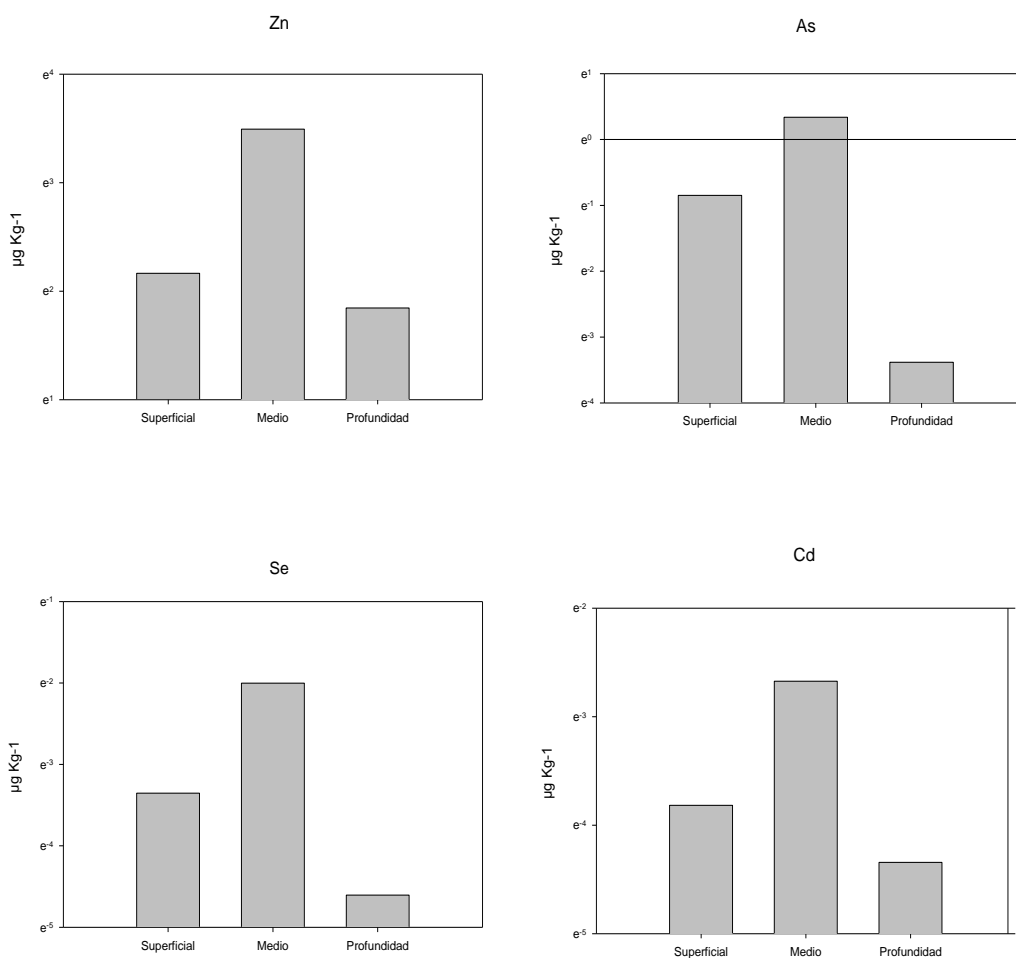
## Ln Concentración de metales (ICP-MS)



**Figura 9.** Histogramas de la concentración de metales analizados para el testigo D de suelo en función de la profundidad. Las concentraciones están clasificadas según las zonas descritas para cada testigo (Superficial-media-profundidad).

## Elementos

Ln Concentración de metales (ICP-MS)



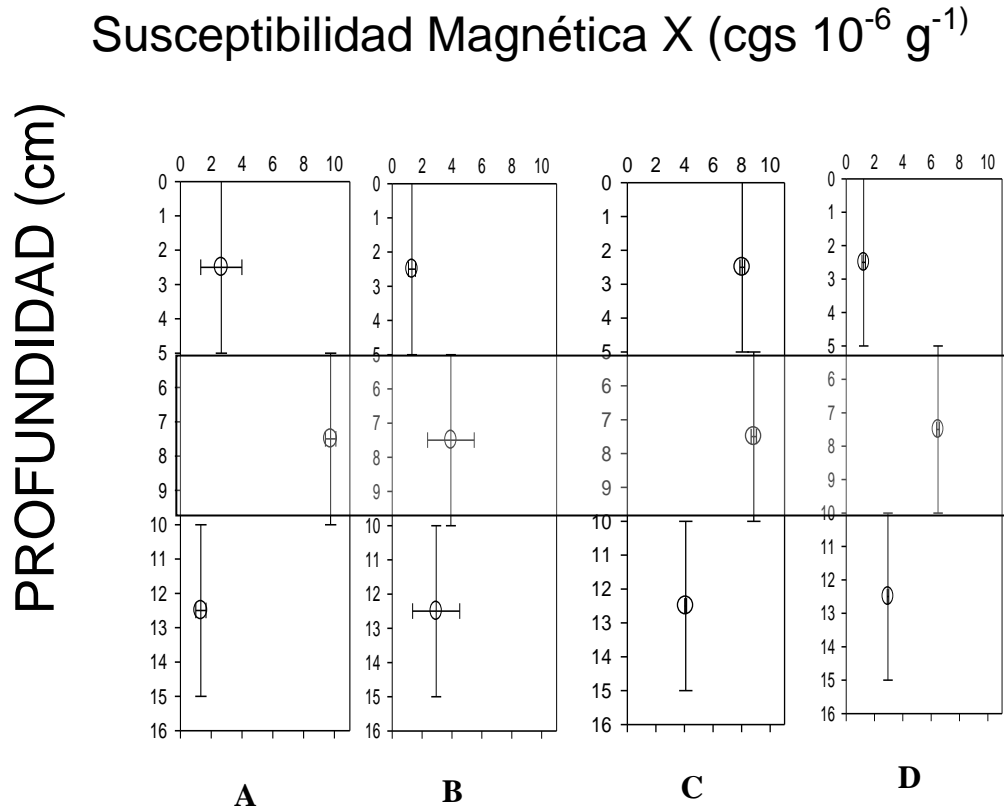
**Continuación Figura 9.** Histogramas de la concentración de metales analizados para el testigo D de suelo en función de la profundidad. Las concentraciones están clasificadas según las zonas descritas para cada testigo (Superficial-media-profundidad).

### **Susceptibilidad magnética de suelo**

Los perfiles de susceptibilidad magnética se midieron con el fin de determinar los elementos ferromagnéticos en las capas de suelo superficial. Para ello fueron descritos cinco perfiles que varían en profundidades de 0 cm a 15 cm, identificando tres zonas superficial (0 cm a 5 cm), media (5 cm a 10 cm) y de profundidad (10 cm a 15 cm) (Figura 4).

Las muestras en general muestran una susceptibilidad baja y estable en la zona superficial. La zona media aumenta considerablemente registrando los valores más altos de susceptibilidad magnética (Anexo; Tabla 8). La denominada zona de profundidad se observó un decaimiento en la susceptibilidad conforme aumenta en profundidad.

Los valores graficados de susceptibilidad magnética (Figura 10) muestran un patrón en la concentración de elementos fácilmente magnetizables, los cuales se presentan en la zona media del testigo. Este tramo destacado, muestra los sectores de cantidad y calidad de suelos similares en los testigos, reflejados en la susceptibilidad magnética observada.



**Figura 10.** Perfiles de Susceptibilidad Magnética X (cgs  $10^{-6} \text{ g}^{-1}$ ) de suelos por estación y estrato. Las barras en sentido vertical muestran los niveles de estratos muestreados, mientras que las orientadas en sentido horizontal muestran el error. El tramo destacado, muestra los sectores de cantidad y calidad de suelos similares en los testigos, reflejado en la susceptibilidad magnética.

### **Susceptibilidad magnética de sedimentos**

Los perfiles de susceptibilidad magnética (Figura 11) fueron medidos para los testigos de sedimentos con el fin de determinar la presencia de elementos ferromagnéticos.

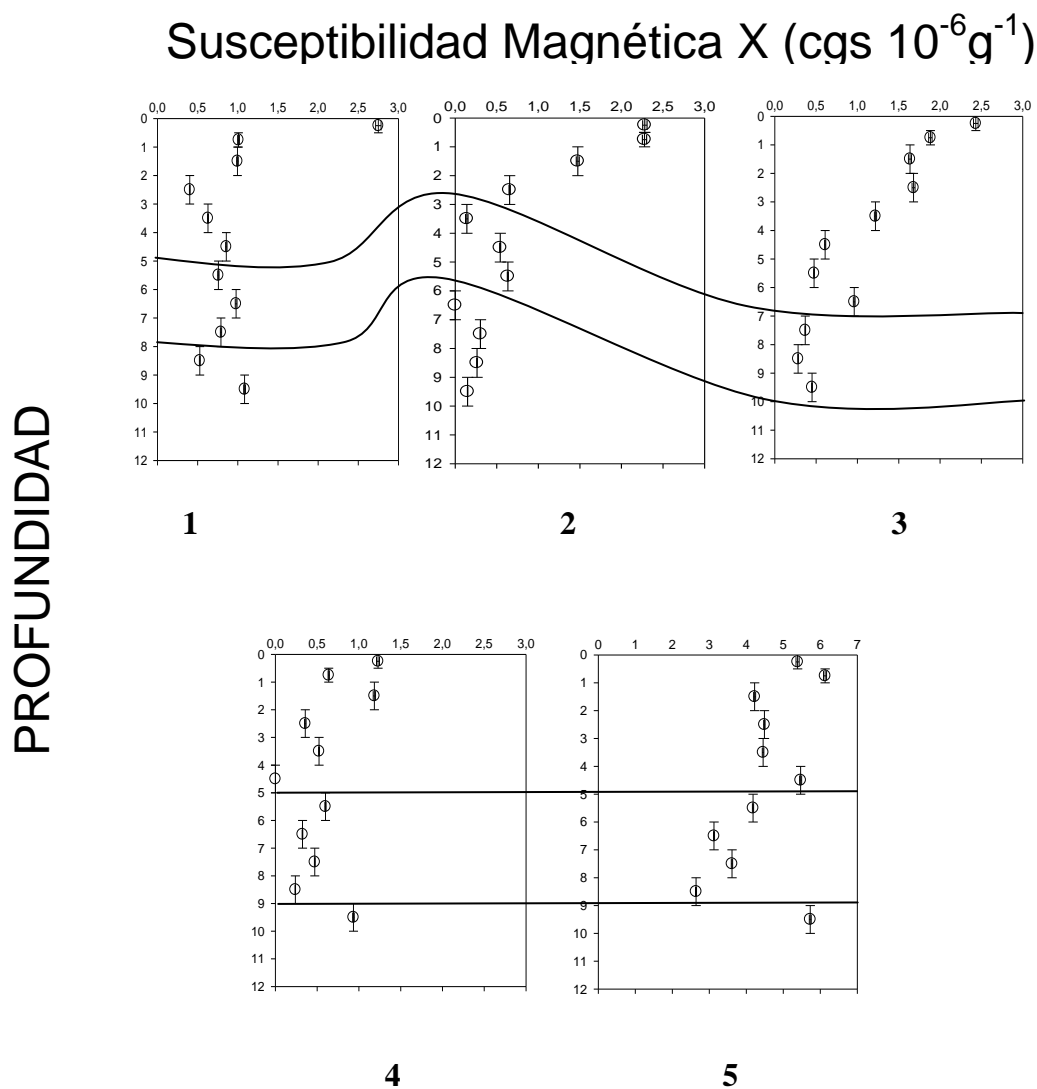
Para ello fueron descritos cinco perfiles que varían en profundidades de 0.5 cm hasta los 10 cm, dividiéndose según protocolo “corte de sedimento”. En cada perfil, se destacan tres estratos; superficial (0.5 cm – 3 cm), medio (4 cm - 6 cm) y de profundidad (7 cm – 10 cm), indicando las relaciones observadas entre cada perfil. A su vez de les aplico una prueba de ANOVA con el fin de observar las diferencias entre las estaciones muestreadas.

Los perfiles en su mayoría, muestran una susceptibilidad alta en los primeros centímetros, la cual disminuye conforme aumenta en profundidad.

El perfil 1, se observa con una susceptibilidad oscilante a través del testigo, registrando un valor promedio de  $0,98 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$ . Los perfiles 2,3 y 4 se observan similares entre sí, con una marcada curva de decaimientos a medida que se avanza en profundidad. Sin embargo, el perfil 3 destaca en la zona superficial por presentar una susceptibilidad promedio de  $1,67 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$ , siendo notablemente mayor a las registradas en los perfiles 1,2 y 4. El perfil 5 muestra una distribución un poco más homogénea de elementos ferromagnéticos en relación a la profundidad. En este perfil se observa la susceptibilidad más alta con respecto a los demás perfiles, con un promedio  $4,49 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$ . Los valores de susceptibilidad promedio para la totalidad de los perfiles descritos se encuentran en la tabla C.

Los resultados para la ANOVA, indican que no hay diferencia significativa entre susceptibilidad magnética de los testigos de sedimentos obtenidos del canal (Tabla 1)





**Figura 11.-** Perfiles de Susceptibilidad Magnética X (cgs  $10^{-6} \text{g}^{-1}$ ) de sedimentos por estación y estrato. Las barras en sentido vertical muestran los niveles de estratos muestreados, mientras que las orientadas en sentido horizontal muestran el error. El sector destacado muestra los cambios de calidad del sedimento reflejados en la susceptibilidad magnética.

**Tabla 1.** ANOVA de susceptibilidad magnética de sedimentos, los valores observados indican que no hay diferencias significativas con un  $P \geq 0.05$ .

<b>ANOVA</b>					
Susceptibilidad Magnética X (cgs $10^{-6} \text{ g}^{-1}$ )					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	23,713	3	7,904	1,082	0,410

### **Estimación de microorganismos y fauna acompañante**

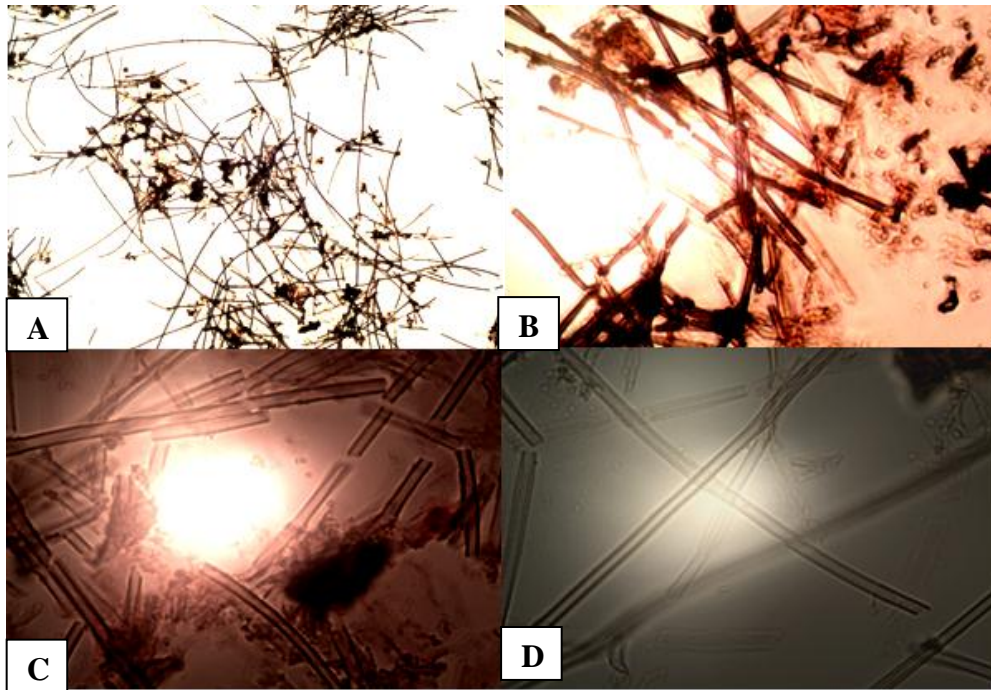
Las muestras montadas para microscopía óptica consistieron en gran parte a microorganismos filamentosos. En la mayoría de los filamentos, se observó una vaina que carecía de estructuras adicionales en la superficie, formando septos irregulares que varían en longitud. Se observó además, una aglomeración de carácter polimérica en el campo óptico (40x) con presencia de cristales de hidróxido de hierro (Figura 12).

Los microorganismos se sometieron a tinción de Gram, presentaron una reacción de carácter negativa. Además otros microorganismos se encontraron presentes en la muestra, los cuales fueron identificados como larvas de mosquito pertenecientes al género *Culex* sp., diatomeas del género *Pinularia* sp y ciliados del género *Holophrya* sp. (Figura 13).

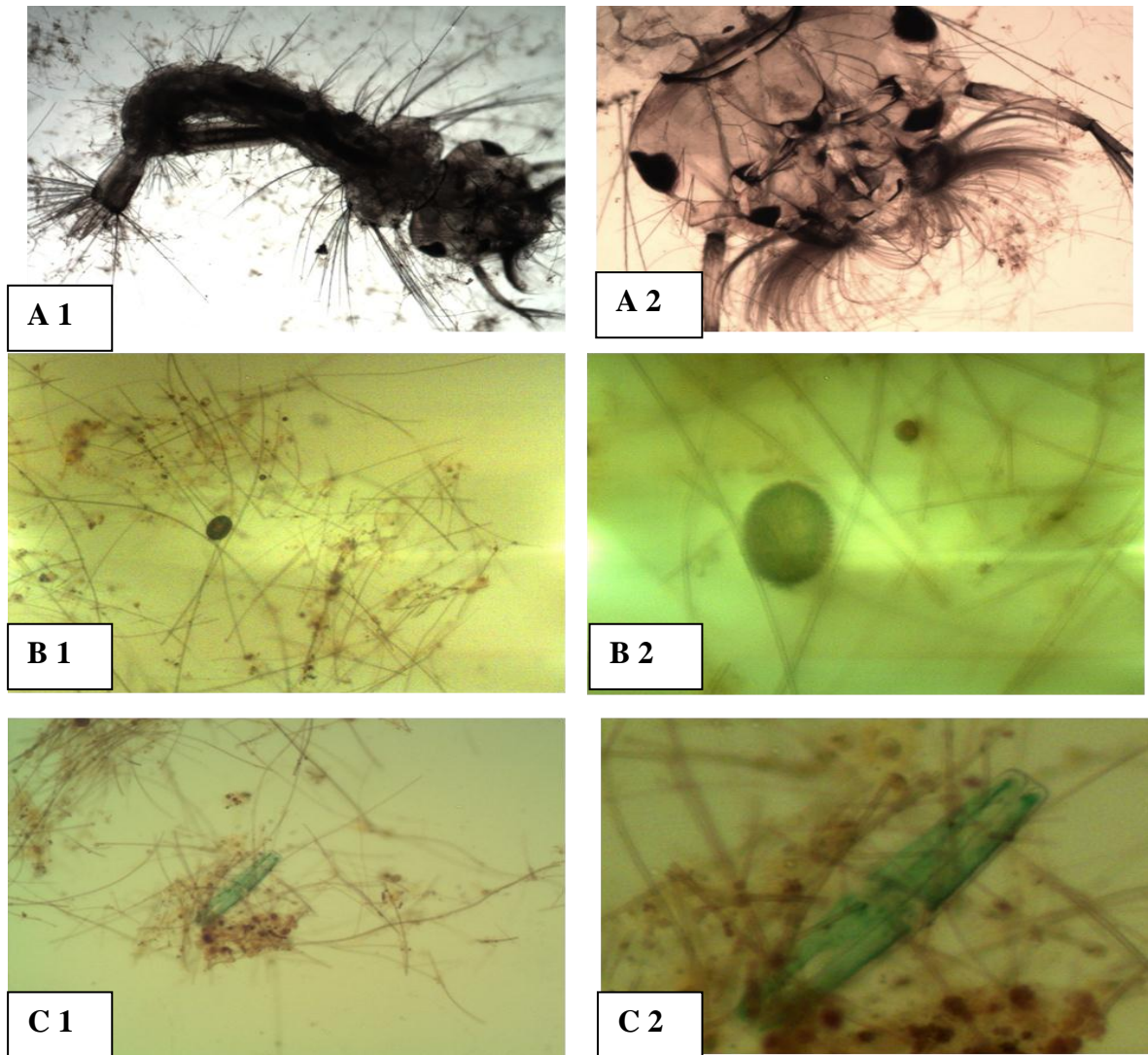
### **Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

La muestra en microscopía electrónica (Figura 14) de barrido (SEM), mostró grandes filamentos huecos con forma de bastones a una resolución de  $1 \mu\text{m}$  (Figura 13 A). En

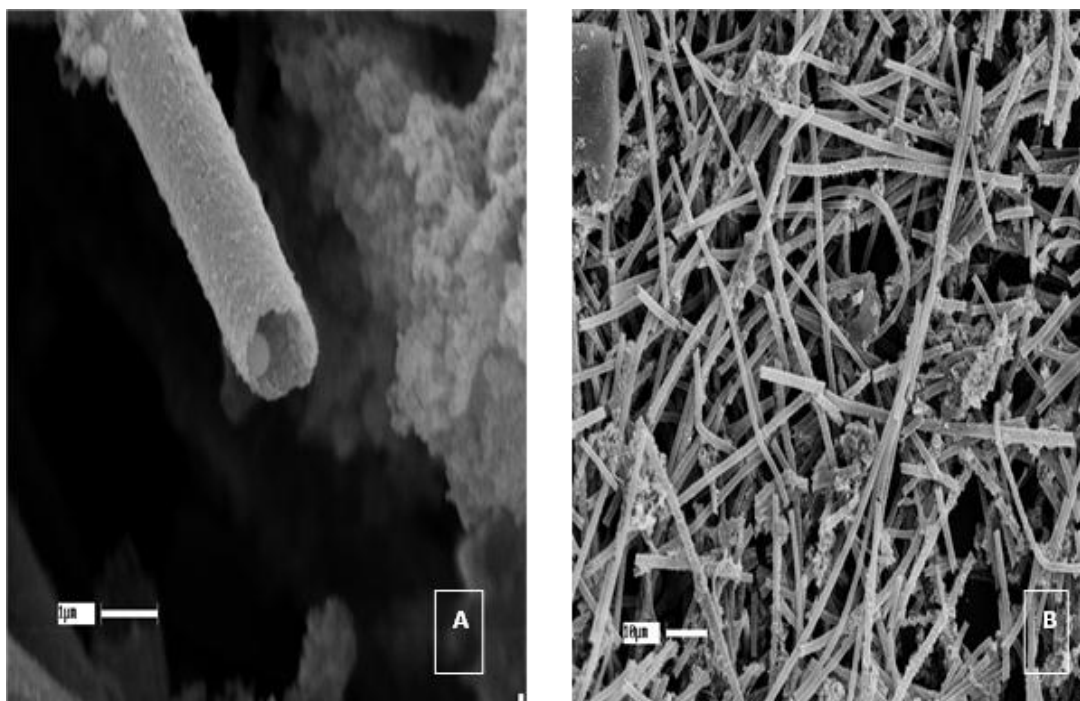
su interior presentaban estructuras circulares que se desprendían a medida que los filamentos se quebraban. Además se observó (10  $\mu\text{m}$ ) una capa mucilaginosa de alta densidad, aglomerada y circundante a los filamentos (Figura 13 B).



**Figura 12.** Microorganismos filamentosos observados en microscopía óptica (30x, 40x, 100x). La figura A se observa microorganismos a resolución de 30X con depósitos de óxidos férricos sobre los filamentos. La figura B se observa microorganismos a 40X. Las figuras C y D están con un aumento de 100X, donde se observan filamentos quebradizos con depósitos de hierro.



**Figura 13.** Representantes de los organismos observados en el canal pertenecientes al humedal. En la imagen (A1 y A2) se observa una larva de mosquito pertenecientes al género *Culex sp.*, (B1 Y B2) ciliados del género *Holophrya sp.*, diatomeas (C1 Y C2) del género *Pinularia sp.*



**Figura 14.** Microscopía electrónica de barrido. La imagen A, muestra una estructura circular a modo de espora liberada a través de la vaina. La imagen B se aprecia al aglomerado de estructuras filamentosas que componen la masa mucilaginosa.

## DISCUSIÓN

### **Análisis de suelo**

Los suelos derivados de cenizas volcánicas han sido estudiados debido a que poseen propiedades particulares que los hacen ser considerados diferentes a otros materiales. Estas propiedades se originan debido a la presencia dominante de un conjunto de minerales no cristalinos y paracristalinos que condicionan su comportamiento y utilización (Sanhueza *et al.*, 2011).

En los trabajos de (Wesley, 1998) en los cuales se ha documentado la presencia de minerales donde las propiedades singulares que caracterizan el comportamiento de estos suelos están dadas cuando están cubiertos de agua. Estos suelos formados por cenizas volcánicas son geotécnicamente suelos alofánicos (Paredes & Verdugo, 2004).

En Chile, los suelos alofánicos cubren una importante superficie de terreno, donde la mayoría corresponde a suelos Trumaos y el resto a Ñadis (Hermosilla & Cárdenas, 2007). Debido al gran porcentaje de suelos de origen volcánico en Chile y la capacidad que poseen de retención de agua, los humedales naturales se reportan como ambientes con cambios en su estructura donde el secado del suelos ayuda a clasificarlos (Paredes & Verdugo, 2004; Hermosilla & Cárdenas, 2007).

Es por esta razón que la caracterización de los suelos pertenecientes a la localidad de Valdivia la podemos caracterizar como Trumao debido al comportamiento observado a través de los resultados, donde la principal característica está dada por la composición de elementos encontrados. A su vez se ha documentado la predominancia de arcillas

no cristalinas o paracristalinas, es así como el suelo del humedal es de color café amarillento y su clasificación corresponde a limo de alta compresibilidad, a pesar de presentar características de arcilla. Se estima su edad entre 500 y 20.000 años correspondientes con el origen glacial de este lugar (IREN CORFO-UACH, 1978).

Todos los suelos volcánicos ubicados en esta zona tienen por origen materiales piroclásticos que incluyen cenizas de carácter basáltico-andesítica, arenas, pómez, o bien, provienen de la retransportación de estos materiales. Estos suelos corresponderían a la edad cuaternaria que para el caso de la zona centro-sur de Chile, están formados por la abundante actividad volcánica, junto a las acciones glaciales del Pleistoceno, con lo que remodeló en gran forma el paisaje de la zona.

Al observar las características de los suelos tipo Trumao, el material orgánico y elementos oxidables son altos, donde la capacidad de intercambio de aluminio y hierro aumentan desde la superficie hacia la profundidad (IREN-CORFO-UACH, 1978).

Los perfiles de concentración de los elementos analizados se correlacionan positiva y negativamente de forma significativa con la profundidad. La excepción se observó en el testigo D, donde presenta un aumento de concentración en el estrato medio (5 cm -10 cm) de profundidad.

Los patrones observados en el perfil de elementos (Figura 7) sugieren que la heterogeneidad espacial y temporal (profundidad) es importante en el área de estudio.

La concentración de Al y Fe, sugieren que el testigo fuera del canal, representan un tipo de suelo denominado Trumao. Esto no es sorpresa puesto que los suelos predominantes en la región de Valdivia son definidos como tales IREN-CORFO-UACH,

1978). Para identificar los tipos de suelo, los parámetros que muestran las características de este se encuentran dentro de los primeros 20 cm de profundidad los cuales pueden calificar un tipo de humedal (Zwanka, *et al.*, 2007).

Los trabajos de (Zwanka, *et al.*, 2007) fueron correspondientes a una identificación de fronteras en suelos de llanuras cercanas a la costa, mediante la susceptibilidad magnética con una cantidad de humedales importantes en el norte de Florida y dos sitios en el sureste de Georgia. Los resultados de este estudio indicaron que la susceptibilidad no tiene una relación significativa con suelos de llanura costera, donde no se puede establecer una delimitación en la identificación de tipo de suelo y se sugiere que solo quede indicado para suelos de tipo ferromagnético interiores, ya que fueron en estos lugares donde se encontró una relación importante (Grimley, 1996).

En el estudio realizado en la presente tesis, los resultados indican que el humedal mantiene una relación significativa entre el hierro y la susceptibilidad magnética en función de la profundidad coincidente con los estudios mencionados. Donde se sugiere que la susceptibilidad magnética puede ser utilizada para eliminar los patrones de cortes por transepto en el análisis de suelo, ayudando a identificar límites en función de la profundidad, como lo realizado en la minería hídrica de suelos (Grimley & Vepraskas, 2000).

Estudios realizados por (Grimley & Bramstedt, 2004) apoyan esta sugerencia, basados en que el principal influyente en la susceptibilidad es el Fe. Esto queda demostrado en los valores de concentración de Mn y Fe los cuales fueron los más altos en relación a los elementos analizados. Estas concentraciones se relacionan a los ambientes



acuáticos, ya que precisamente estos constituyentes, son los más abundantes en estos ecosistemas.

En síntesis, los principales factores que han influido en su formación, han correspondido a la influencia volcánica, la gran cantidad de precipitaciones en la zona; al relieve; al pH, el cual debe estar dentro de un rango comprendido entre 4,6 y 7,6 para que el vidrio volcánico pueda descomponerse en partículas de alofán e imogolita (Parfitt *et al.*, 1989); al grado de percolación; a la topografía; y, a la temperatura, entre otras.

### **Susceptibilidad magnética de suelo y sedimento**

Numerosos trabajos han tratado de establecer las relaciones entre las variaciones ocurridas durante el Cuaternario y la mineralogía magnética de suelos y paleosuelos de diversas localidades en el mundo. Estos estudios han sido particularmente prometedores en las secuencias de los paleosuelos de China (Liu *et al.*, 2007, Lu *et al.*, 2008), Europa (Jordanova *et al.*, 2003), Argentina (Orgeira *et al.*, 2003; Bidegain *et al.*, 2009) y el noroeste de Estados Unidos (Geiss *et al.*, 2008). Algunos reportes han establecido la relación entre la mineralogía magnética de suelos y cambios ambientales (Grimley *et al.*, 2004; Geiss & Zanner, 2006, 2007) y contaminación (Chaparro, 2006; Orgeira *et al.*, 2008). Muchos estudios de este tipo se basan únicamente en la susceptibilidad magnética como indicador de las variaciones en el suelo. Sin embargo, ya que este parámetro depende no sólo de la concentración de partículas ferromagnéticas, sino también de la presencia de un amplio rango de minerales magnéticos y de sus distribuciones de tamaño (Geiss & Zanner, 2006), la interpretación de la susceptibilidad magnética rara vez es única y directa, por lo que las

interpretaciones pueden verse comprometidas si no se han caracterizado adecuadamente los componentes magnéticos. Por ello, los análisis de magnetismo de rocas deben involucrar técnicas que determinen la composición y concentración de los minerales magnéticos para lograr una acertada interpretación. Es este uno de los motivos por los cuales se trabajó con ambas metodologías, representando de mejor manera el tipo de suelo con el cual se trabajó en el humedal estudiado.

Estudios de susceptibilidad magnética (Geiss & Zanner, 2006) nos muestra que la mayoría de las caracterizaciones de suelos del cuaternario se caracterizan por registrar un aumento en susceptibilidad magnética en la parte superficial del suelo. Este aumento se debe mayormente a un incremento de minerales ferromagnéticos (magnetita y/o maghemita) de tamaño ultrafino superparamagnético (Hunt *et al.*, 1995), pero también al incremento de partículas tanto ferromagnéticas como antiferromagnéticas (hematita o goethita) (Geiss *et al.*, 2004). El origen de dicho incremento se ha interpretado de diferentes maneras, entre ellas la ocurrencia de incendios, fermentación, calentamiento, actividad biológica (Thompson & Oldfield, 1986), la contaminación del suelo (Chaparro, 2006) y la transformación de minerales paramagnéticos o antiferromagnéticos a fases ferromagnéticas (Geiss y Zanner, 2007).

Si bien la caracterización de los suelos Valdivianos pertenecientes al humedal muestra perfiles de susceptibilidad magnética de los testigos de un patrón similar en respuesta a los 5 cm – 10 cm de profundidad. Se observa en términos generales perfiles de susceptibilidad donde la concentración elemental, reflejan procesos de acumulación similares. Probablemente de un evento particular en la génesis del área de estudio (natural y/o antrópico). Estos resultados acotan a una tipo de suelo de origen

glacial corroborado por la caída de susceptibilidad a medida que avanza en profundidad en la totalidad de los testigos muestreado. Esto también se podría relacionar con el comportamiento observado en sedimentos del Pleistoceno sometidos a condiciones subacuáticas durante largos períodos del año. Estas condiciones habrían generado la alteración de los minerales presentes -entre ellos, los ferromagnéticos- y la consecuente lixiviación del hierro en su forma reducida, mucho más soluble, seguida de precipitación en forma de compuestos de hierro más oxidados en los niveles infrayacentes ( Bidegain *et al.*, 2009).

Para las metodologías usadas en este estudio se observó que los análisis elementales (Figura 7), correlaciones y la respuesta observada en la susceptibilidad magnética para los testigos (suelo-sedimento) muestran una estrecha relación (Figura 10) en los tratamientos utilizados. Es por este motivo, la susceptibilidad magnética basada en la calidad de los minerales y la estrecha relación con el parámetro de susceptibilidad, sugiere que este parámetro de bajo costo, rápido y sin influencia física, química o biológica sea una buena herramienta para describir columnas de suelo y sedimentos, en particular sus constituyentes ferromagnéticos.

### **Estimación de microorganismos**

Los microorganismos observados en general son característicos de ambientes de agua dulce. Sin embargo los microorganismos filamentosos observados en las muestras de coloide presentan características similares a los estudiados en procesos de biomineralización del hierro. Los estudios realizados en este ámbito sugieren que microorganismos puedan inmovilizar hierro en sectores donde este elemento se

encuentre ya sea abundante o escaso (Ferris, 2005; Fortín & Langley, 2005). Por esta razón, el estudio de este tipo de ambientes relacionados con microorganismos se hace fundamental en entender estos procesos.

En la continuidad de este estudio es importante realizar ensayos donde se incluya en esta metodología la hibridación de ácidos nucleicos, como por ejemplo la hibridación fluorescente *in situ* o FISH (fluorescence in situ hybridization); en este caso se utilizan sondas de ADN de unos 20-28 nucleótidos complementarias de regiones específicas de los ARN ribosómicos 16S y marcadas con fluorocromos (Blasco *et al.*, 2003). Otras técnicas que podrían ayudar en este estudio son las técnicas basadas en el uso de la reacción en cadena de la polimerasa o PCR (Polimerase Chain Reaction), entre ellas están la PCR específica (Bartowsky & Henschke, 1999), PCR multiplex (Mora *et al.*, 2000), RAPD (random amplification of polymorphic DNA)(Guerrini *et al.*, 2003) y la amplificación de secuencias que codifican para los espacios intergénicos 16-23S rARN (ISR o ITS) (Chenoll *et al.*, 2006), las cuales ayudarían a una descripción más detallada de las estructuras de las comunidades microbianas que se encuentran relacionados al hierro. Debido a que la presencia de estos microorganismos observada en el ambiente natural, es casi permanente a lo largo de todas las estaciones del año, la importancia de un seguimiento temporal en material biológico y testigos de sedimento más largos en tiempo (los mencionados en este estudio no tienen más allá de 10 años), podría ayudar a relacionar eventos ecológicos y/o geológicos del lugar con poblaciones bacterianas pasadas.

### **Relación entre suelos y sedimentos**

Finalmente las similitudes entre ambas metodologías utilizadas, con perfiles que muestran una composición rica en metales que tienden a mantener un comportamiento similar con respecto a la profundidad, muestran una relación de suelos y sedimentos reflejando los cambios sufridos en este humedal. Es así como el estudio en conjunto, ayuda a conocer de mejor manera el ambiente y sus características de génesis, estableciendo así que la presencia de óxidos férricos está vinculada a la constitución de los suelos del humedal, donde los procesos mineralógicos posiblemente estén mediados por microorganismos en una constante interacción biogeoquímica.

## CONCLUSIONES

- 1) Los elementos más abundantes en el suelo del humedal son el Fe y Mn.
- 2) Las características de los suelos tipo Trumao se relaciona a las características presentadas en el análisis elemental de los suelos del humedal.
- 3) La susceptibilidad magnética para el suelo y sedimento del humedal se relaciona a los análisis elementales realizados para el suelo del humedal.
- 4) La susceptibilidad magnética mostró ser una herramienta alternativa para la caracterización de suelos y sedimentos.
- 5) Los microorganismos debido a su posible relación al metal podrían estar relacionados con procesos de movilización del hierro.

## REFERENCIAS

- Bartowsky, E. & Henschke, P. A. (1999).** Use of a polymerase chain reaction for specific detection of the malolactic fermentation bacterium *Oenococcus oeni* (formerly *Leuconostoc oenos*) in grape juice and wine samples. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 5, 39-44.
- Bidegain, J., Rico, Y., Bartel A., Chaparro, M.A.E., Jurado, S., (2009).** Magnetic parameters reflecting pedogenesis in Pleistocene loess deposits of Argentina: *Quaternary International*, 209, 175-186.
- Blasco, L., Ferrer, S., & Pardo, I. (2003).** Development of specific fluorescent oligonucleotide probes for in situ identification of wine lactic acid bacteria. *FEMS Microbiology Letters*. 225, 115-123
- Bravo, F. (2007).** Estudio de procesos metabólicos y variables sedimentológicas como proxy para la evaluación del estado de trofia del bentos. Tesis de Pregrado para optar al título de Biólogo Marino, Escuela de Biología Marina, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile. 107pp.
- Chaparro, M. (2006).** Estudio de parámetros magnéticos de distintos ambientes relativamente contaminados en Argentina y Antártida: Cd. de México, Instituto de Geofísica, UNAM, 107 p.
- Chenoll, E., Macián, M. C. y Aznar, R. (2006).** *Lactobacillus tuceti* sp. nov., a new lactic acid bacterium isolated from sausage. *Systematic and Applied Microbiology*. 29, 389- 395.

- Chile, Centro Nacional del Medio Ambiente (2010).** Análisis de la composición físico química de los sedimentos fluviales y su relación con la disponibilidad de metales en agua. Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas Dirección General de Aguas Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. 69 pp.
- Chui, H., Miramira, B., Olivera, P. & Jacay, J. (2009).** Determinación de metales pesados en sedimentos del río chillón mediante la técnica de fluorescencia de rayos x. Rev. Per. Quím. Ing. Quím. Vol. 12 N. ° 2; 9-14 pp.
- Conesa, H., FAZ, A. & Arnaldos, R. (2006):** Heavy metal acumulación and tolerante in plants from mine tailings of the semiarid Cartagena-La Unión mining district (SE Spain). Science of the Total Environment, 366, 1-11.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. & van den Belt, M. (1997).** The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387, 253-260.
- Dekkers, M. (1997).** Environmental Magnetism: An introduction. *Geologie en Minjbouw*, 76: 163-182.
- Evans, G. & Prego, R. (2003).** Rias, estuaries and incised valleys: is a ria an estuary? Marine Geology 196, 171-175.
- Ferreira, T., Vidal-Torrado, P., Otero, X. & Macías, F., (2007).** Are mangrove forest substrates sediments or soils? A case study in southeastern Brazil. Catena 70, 79-91.
- Ferris, F. (2005).** Biogeochemical properties of bacteriogenic iron oxides. Geomicrobiology Journal. 22: 79–85.



- Fortin, D. & Langley, S. (2005).** Formation and occurrence of biogenic iron-rich minerals, *Earth-Sci.Rev.*, 72, 1–19.
- Galán, H. & Romero, B. (2008).** Contaminación de suelos por metales pesados. *Macla*, 10, 48-60.
- Geiss, C.E., Egli, R. Zanner, C.W., (2008).** Direct Estimates of Pedogenic Magnetite as a Tool to Reconstruct Past Climates From Buried Soils: *Journal of Geophysical Research*, 113.
- Geiss, C.E., Zanner C.W., (2006).** How abundant is pedogenic magnetite? Abundance and grain size estimates for loessic soils based on rock magnetic analyses: *Journal of Geophysical Research*, 111.
- Geiss, C.E., Zanner, C.W. (2007)** Sediment magnetic signature of climate in
- Grimley, D. (1996).** Stratigraphy, magnetic susceptibility, and mineralogy of besspaleosol sequences in southwestern Illinois and eastern Missouri. Ph.D. diss.
- Grimley, D., & Vepraskas, M. (2000).** Magnetic susceptibility for use in delineating hydric soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:2174-2180.
- Grimley, D., Arruda, N. & Bramstedt, M. (2004).** Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils
- Grimley, D.A., Arruda, N.K., Bramstedt, M.W., (2004).** Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA: *Catena*, 58, 183-213.

- Guerrini, S., Bastianini, A., Blaiotta, G., Granchi, L., Moschetti, G., Coppola, S., Romano, P. y Vincenzini, M. (2003).** Phenotypic and genotypic characterization of *Oenococcus oeni* strains isolated from Italian wines. *International Journal of Food Microbiology*. 83, 1-14.
- Gundersen, P., Olsvik, P. & Steinnes, E. (2001).** Variations in heavy metal concentration in two mining-polluted streams in central Norway. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 20, 978-984.
- Hermosilla, S., & Cárdenas, R. (2007).** “*Determinación de alofán en suelos derivados de cenizas volcánicas del sur de Chile y análisis general de resultados*”, Universidad de La Frontera.
- Iren-Corfo-Uach, (1978).** Chile, instituto nacional de investigación de recursos naturales, corporación de fomento – Universidad Austral de Chile. suelos de la provincia de Valdivia. Santiago, Chile.178 pp.
- Jordanova, N., Kovacheva, M., Hedley, I., Kostadinova, M., (2003).** On the suitability of baked clay for archaeomagnetic studies as deduced from detailed rock-magnetic studies: *Geophysical Journal International*, 153, 146-158.
- Liu, Q., Deng, Ch., Torrent, J., Zhu, R., (2007).** Review of recent developments in mineral magnetism of the Chinese loess: *Quaternary Science Review*, 26, 368-385.
- Loring, D, & Rantala, R. (1992).** Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. *Earth-Science Reviews* 32: 235-283.

- Lu, S.G., Xue, Q.F., Zhu, L., Yu, J.Y., (2008).** Mineral magnetic properties of a weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China: *Catena*, 73, 23-33.
- Maher, B. (1999).** *Environmental Magnetism*. 390p., Cambridge U. Press. metals bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a modern loessic soils from the Great Plains: *Quaternary International*, 163, 97-110.
- Moreno, B. J., Romero, D. A., Alonso S, F. y Belmonte S. F. (2009).** Wind erosion on mining waste Southeast Spain. *Land Degradation & development* 20, 1-8.
- oligonucleotide probes for in situ identification of wine lactic acid bacteria. *FEMS Microbiology Letters*. 225, 115-123.
- Orgeira, M.J., Pereyra, F.X., Vásquez, C., Castañeda, E, Compagnucci, R. (2008).** Rock magnetism in modern soils, Buenos Aires Province, Argentina: *Journal of South American Earth Sciences*, 26, 217-224.
- Orgeira, M.J., Walther, A.M., Tofalo, R.O., Vásquez, C., Berquo, T., Favier Doboys, C., Bonhel, H., (2003).** Environmental magnetism in fluvial and loessic Holocene sediments and paleosols from the Chacopampean plain (Argentina): *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 259-274.
- Otero, X., & Macías, F. (2003).** Spatial variation in pyritization of trace metals in salt-marsh soils. *Biogeochemistry* 62, 59-86.
- Paredes, P., & Verdugo A. (2004).** “*Génesis y Estructura de los Suelos Alofánicos en Chile*”. V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Universidad de Chile.
- Parfi, R., & Kimble, J. (1989).** “*Structure of some Allophanes from New Zealand*”, Auckland, New Zealand.

- Plumlee, G. (1994):** Environmental geology models of mineral deposits. SEG Newsletter, 16, 5-6.
- Sanhueza, C., Palma, J., Valenzuela, P., Araneda, O., & Calderón, K. (2011).** Revista de la Construcción Volumen 10 No 2.
- Soil Survey Staff, (1999).** Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2ª Ed. United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC. 871 pp.
- Thompson, R., Oldfield F. (1986).** Environmental Magnetism: Londres, Allen & Unwin, 227 p.
- Thompson, R., Oldfield, F. (1986).** Environmental magnetism. Allen y Unwin. London. 227p.
- Van Breemen, N. (1982).** Genesis, morphology and classification of acid sulfate soils in coastal plains. In Acid sulfate weathering. J.A. Kittrick et al. (Eds.) Publicación especial 10. Soil Science Society of America. Madison, WI. pp. 95-108.
- Verosub, & Roberts, A. (1995).** Environmental Magnetism: Past, Present and Future. *Journal of Geophysical Research*, 100, B2: 2175-2192.
- Williams, S., & Cooper, C. (1996).** Pressure Management Indicator. Harrogate, England: RAD.
- Zwanka, W., Hurt, G., Graetz, D., Graham, W., & Clark, M. (2007).** Using Magnetic Susceptibility to Delineate Hydric Soils in Southeastern Coastal Plain Soils. Published in Soil Surv. Horiz. 48:32-38.

## ANEXO

**Tabla 2.** Valores de la concentración de los elementos analizados mediante ICP-MS para los testigos de suelo en función de la profundidad.

<b>Profundidad</b>	<b>In</b>	<b>Li</b>	<b>Fe</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>	<b>Cd</b>
<b>0-5 cm</b>	<b>µg/kg</b>	<b>µg/kg</b>	<b>µg/kg</b>	<b>µg/kg</b>	<b>µg/kg</b>	<b>µg/kg</b>	<b>µg/kg</b>	<b>µg/kg</b>	<b>µg/kg</b>	<b>µg/kg</b>	<b>µg/kg</b>
Testigo A	0,992	6,905	111,4	10,18	148,7	6,657	15,33	37,72	1,331	0	0,072
Testigo B	1,028	1,119	529,2	3,678	30,67	2,161	5,962	8,743	0,099	0	0,023
Testigo C	0,996	4,285	145,48	5,787	74,38	3,065	8,467	22,92	0,477	0,014	0,039
Testigo D	0,512	2,499	594,8	3,045	66,57	1,716	4,424	8,706	0,428	0,035	0,022
<b>Profundidad</b>											
<b>5-10 cm</b>											
Testigo A	0,965	3,134	266,28	5,159	70,07	2,782	7,529	16,2	0,28	0,09	0,032
Testigo B	1,043	1,628	297,52	8,65	42,45	5,222	9,919	14,64	0,134	0	0,029
Testigo C	0,998	2,082	146,24	3,593	45,49	1,714	5,842	15,77	0,234	0,137	0,027
Testigo D	0,54	7,724	280,28	9,312	130	5,535	12,11	32,91	1,402	0,135	0,069
<b>Profundidad</b>											
<b>10-15 cm</b>											
Testigo A	0,996	10,6	520	13,51	201,9	8,281	19,6	48,82	1,845	0,205	0,11
Testigo B	1,011	2,204	181,96	3,973	58,83	1,971	5,497	10,01	0	0	0,027
Testigo C	0,988	5,816	139,68	7,334	100,8	4,391	14,66	29,39	0,762	0,006	0,055
Testigo D	0,526	1,37	807,6	2,134	38,83	0,915	3,147	6,328	0	0	0,013
<b>Referencia</b>	1,745	0,031	8,2654	1,953	6,427	11,52	0	0,027	0,117	1,084	1,702
<b>Blanco</b>	1,01	26,99	1,8916	51,52	43,3	33,59	33,71	60,06	5,425	5,317	2,538

**Tabla 3.** Matriz de correlaciones para suelo de los elementos del testigo A en función de la profundidad.

		Correlaciones										
		Li	Fe	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Profundidad
Li	Correlación de Pearson	1	,610	,994	,994	,975	,987	,984	,982	,555	1,000**	,495
	Sig. (bilateral)		,582	,070	,067	,144	,103	,112	,121	,626	,006	,670
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Fe	Correlación de Pearson	,610	1	,519	,524	,417	,475	,462	,450	,998*	,603	,990
	Sig. (bilateral)	,582		,652	,649	,726	,685	,694	,703	,044	,588	,088
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cr	Correlación de Pearson	,994	,519	1	1,000**	,993	,999*	,998*	,997	,460	,995	,396
	Sig. (bilateral)	,070	,652		,003	,074	,032	,042	,050	,696	,065	,741
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Mn	Correlación de Pearson	,994	,524	1,000**	1	,993	,998*	,997*	,996	,464	,995	,401
	Sig. (bilateral)	,067	,649	,003		,077	,036	,045	,054	,693	,061	,737
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ni	Correlación de Pearson	,975	,417	,993	,993	1	,998*	,999*	,999*	,354	,976	,287
	Sig. (bilateral)	,144	,726	,074	,077		,041	,032	,023	,770	,138	,814
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cu	Correlación de Pearson	,987	,475	,999*	,998*	,998*	1	1,000**	1,000*	,414	,988	,349
	Sig. (bilateral)	,103	,685	,032	,036	,041		,010	,018	,728	,097	,773
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Zn	Correlación de Pearson	,984	,462	,998*	,997*	,999*	1,000**	1	1,000**	,400	,986	,335
	Sig. (bilateral)	,112	,694	,042	,045	,032	,010		,008	,738	,107	,783
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
As	Correlación de Pearson	,982	,450	,997	,996	,999*	1,000*	1,000**	1	,388	,984	,322
	Sig. (bilateral)	,121	,703	,050	,054	,023	,018	,008		,746	,115	,791
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Se	Correlación de Pearson	,555	,998*	,460	,464	,354	,414	,400	,388	1	,547	,998
	Sig. (bilateral)	,626	,044	,696	,693	,770	,728	,738	,746		,631	,045
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cd	Correlación de Pearson	1,000**	,603	,995	,995	,976	,988	,986	,984	,547	1	,487
	Sig. (bilateral)	,006	,588	,065	,061	,138	,097	,107	,115	,631		,676
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Profundidad	Correlación de Pearson	,495	,990	,396	,401	,287	,349	,335	,322	,998*	,487	1
	Sig. (bilateral)	,670	,088	,741	,737	,814	,773	,783	,791	,045	,676	
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* . La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

**Tabla 4.** Matriz de correlaciones para suelo de los elementos del testigo B en función de la

**Correlaciones**

		Li	Fe	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Profundidad
Li	Correlación de Pearson	1	-,974	,017	,998	-,088	-,131	,169	-,737 <sup>a</sup>		,627	,999
	Sig. (bilateral)		,144	,989	,037	,944	,916	,892	,473		,568	,023
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Fe	Correlación de Pearson	-,974	1	-,241	-,960	-,138	-,095	-,386	,566 <sup>a</sup>		-,786	-,982
	Sig. (bilateral)	,144		,845	,181	,912	,940	,748	,617		,424	,121
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cr	Correlación de Pearson	,017	-,241	1	-,041	,994	,989	,988	,663 <sup>a</sup>		,789	,053
	Sig. (bilateral)	,989	,845		,974	,067	,095	,097	,538		,421	,966
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Mn	Correlación de Pearson	,998	-,960	-,041	1	-,146	-,189	,111	-,775 <sup>a</sup>		,581	,996
	Sig. (bilateral)	,037	,181	,974		,907	,879	,929	,436		,605	,060
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ni	Correlación de Pearson	-,088	-,138	,994	-,146	1	,999	,967	,738 <sup>a</sup>		,721	-,052
	Sig. (bilateral)	,944	,912	,067	,907		,028	,164	,471		,488	,967
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cu	Correlación de Pearson	-,131	-,095	,989	-,189	,999	1	,955	,767 <sup>a</sup>		,690	-,096
	Sig. (bilateral)	,916	,940	,095	,879	,028		,192	,444		,515	,939
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Zn	Correlación de Pearson	,169	-,386	,988	,111	,967	,955	1	,542 <sup>a</sup>		,874	,204
	Sig. (bilateral)	,892	,748	,097	,929	,164	,192		,635		,324	,869
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
As	Correlación de Pearson	-,737	,566	,663	-,775	,738	,767	,542	1 <sup>a</sup>		,064	-,712
	Sig. (bilateral)	,473	,617	,538	,436	,471	,444	,635			,959	,495
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Se	Correlación de Pearson	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>
	Sig. (bilateral)	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cd	Correlación de Pearson	,627	-,786	,789	,581	,721	,690	,874	,064 <sup>a</sup>		1	,655
	Sig. (bilateral)	,568	,424	,421	,605	,488	,515	,324	,959			,546
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Profundidad	Correlación de Pearson	,999	-,982	,053	,996	-,052	-,096	,204	-,712 <sup>a</sup>		,655	1
	Sig. (bilateral)	,023	,121	,966	,060	,967	,939	,869	,495		,546	
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

\*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

a. No se puede calcular porque al menos una variable es constante.

**Tabla 5.** Matriz de correlaciones para suelo de los elementos del testigo C en función de la profundidad.

		Correlaciones										
		Li	Fe	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Profundidad
Li	Correlación de Pearson	1	,939	-,947	,999	-,945	,970	1,000**	-,947	-,955	,997	,979
	Sig. (bilateral)		,224	,207	,028	,212	,157	,006	,208	,192	,052	,132
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Fe	Correlación de Pearson	,939	1	-1,000*	,953	-1,000*	,826	,942	-1,000*	-,999*	,907	,847
	Sig. (bilateral)	,224		,017	,197	,013	,382	,218	,016	,033	,276	,356
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cr	Correlación de Pearson	-,947	-1,000*	1	-,960	1,000**	-,840	-,950	1,000**	1,000*	-,918	-,861
	Sig. (bilateral)	,207	,017		,180	,004	,365	,201	,001	,016	,259	,339
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Mn	Correlación de Pearson	,999	,953	-,960	1	-,959	,958	,999	-,960	-,967	,992	,969
	Sig. (bilateral)	,028	,197	,180		,184	,185	,022	,181	,164	,079	,160
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ni	Correlación de Pearson	-,945	-1,000*	1,000**	-,959	1	-,837	-,948	1,000**	1,000*	-,916	-,858
	Sig. (bilateral)	,212	,013	,004	,184		,369	,206	,003	,020	,263	,344
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cu	Correlación de Pearson	,970	,826	-,840	,958	-,837	1	,967	-,840	-,854	,986	,999
	Sig. (bilateral)	,157	,382	,365	,185	,369		,163	,365	,349	,105	,025
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Zn	Correlación de Pearson	1,000**	,942	-,950	,999	-,948	,967	1	-,950	-,958	,996	,977
	Sig. (bilateral)	,006	,218	,201	,022	,206	,163		,202	,186	,058	,138
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
As	Correlación de Pearson	-,947	-1,000*	1,000**	-,960	1,000**	-,840	-,950	1	1,000*	-,918	-,860
	Sig. (bilateral)	,208	,016	,001	,181	,003	,365	,202		,016	,260	,340
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Se	Correlación de Pearson	-,955	-,999*	1,000*	-,967	1,000*	-,854	-,958	1,000*	1	-,928	-,873
	Sig. (bilateral)	,192	,033	,016	,164	,020	,349	,186	,016		,244	,324
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cd	Correlación de Pearson	,997	,907	-,918	,992	-,916	,986	,996	-,918	-,928	1	,992
	Sig. (bilateral)	,052	,276	,259	,079	,263	,105	,058	,260	,244		,080
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Profundidad	Correlación de Pearson	,979	,847	-,861	,969	-,858	,999	,977	-,860	-,873	,992	1
	Sig. (bilateral)	,132	,356	,339	,160	,344	,025	,138	,340	,324	,080	
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

\*. La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

\*\*.. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).



**Tabla 6.** Matriz de correlaciones para suelo de los elementos del testigo D en función de la profundidad

		Correlaciones										
		Li	Fe	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Profundidad
Li	Correlación de Pearson	1	-,970	,999	,991	1,000**	,999	,996	,993	1,000	1,000	-,167
	Sig. (bilateral)		,156	,032	,085	,003	,022	,055	,074	,015	,011	,893
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Fe	Correlación de Pearson	-,970	1	-,957	-,994	-,969	-,961	-,945	-,992	-,975	-,966	,401
	Sig. (bilateral)	,156		,188	,071	,159	,179	,211	,082	,142	,167	,737
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cr	Correlación de Pearson	,999	-,957	1	,983	,999	1,000	,999	,986	,997	,999	-,117
	Sig. (bilateral)	,032	,188		,117	,029	,010	,023	,106	,047	,021	,926
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Mn	Correlación de Pearson	,991	-,994	,983	1	,990	,986	,976	1,000	,994	,989	-,297
	Sig. (bilateral)	,085	,071	,117		,088	,108	,140	,011	,071	,096	,808
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ni	Correlación de Pearson	1,000**	-,969	,999	,990	1	1,000	,997	,993	1,000	1,000**	-,162
	Sig. (bilateral)	,003	,159	,029	,088		,020	,052	,077	,017	,008	,896
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cu	Correlación de Pearson	,999	-,961	1,000**	,986	1,000	1	,999	,989	,998	1,000	-,132
	Sig. (bilateral)	,022	,179	,010	,108	,020		,033	,096	,037	,012	,916
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Zn	Correlación de Pearson	,996	-,945	,999	,976	,997	,999	1	,980	,994	,998	-,081
	Sig. (bilateral)	,055	,211	,023	,140	,052	,033		,129	,070	,044	,948
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
As	Correlación de Pearson	,993	-,992	,986	1,000	,993	,989	,980	1	,996	,991	-,280
	Sig. (bilateral)	,074	,082	,106	,011	,077	,096	,129		,059	,085	,819
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Se	Correlación de Pearson	1,000	-,975	,997	,994	1,000	,998	,994	,996	1	,999	-,189
	Sig. (bilateral)	,015	,142	,047	,071	,017	,037	,070	,059		,025	,879
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cd	Correlación de Pearson	1,000	-,966	,999	,989	1,000	1,000	,998	,991	,999	1	-,150
	Sig. (bilateral)	,011	,167	,021	,096	,008	,012	,044	,085	,025		,904
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Profundidad	Correlación de Pearson	-,167	,401	-,117	-,297	-,162	-,132	-,081	-,280	-,189	-,150	1
	Sig. (bilateral)	,893	,737	,926	,808	,896	,916	,948	,819	,879	,904	
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

\*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

\*\*.. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

**Tabla 7.** Valores promedios de la susceptibilidad magnética registrada en los sedimentos del canal y el error de propagación calculado en los instrumentos utilizados durante la medición.

Testigos Suelo	Estratos (cm)	$\bar{X}$ Susceptibilidad Magnética por Estrato	$\bar{X}$ Total perfil Susceptibilidad Magnética ( cgs x $10^{-6} g^{-1}$ )	$\bar{X}$ Error de Propagación
Perfil A	0 - 5	$2.9 \text{ cgs} \times 10^{-6} g^{-1}$	2,29 cgs x 10-6 g-1	$\pm 0,0576$
	5 - 10	$9.72 \text{ cgs} \times 10^{-6} g^{-1}$		$\pm 1,5615$
	10 - 15	$1.3 \text{ cgs} \times 10^{-6} g^{-1}$		$\pm 1,5767$
Perfil B	0 - 5	$1.35 \text{ cgs} \times 10^{-6} g^{-1}$	5,007 cgs x $10^{-6} g^{-1}$	$\pm 0,2918$
	5 - 10	$3.92 \text{ cgs} \times 10^{-6} g^{-1}$		$\pm 0,1672$
	10 - 15	$2.94 \text{ cgs} \times 10^{-6} g^{-1}$		$\pm 0,1073$
Perfil C	0 - 5	$8.04 \text{ cgs} \times 10^{-6} g^{-1}$	6.69 cgs x $10^{-6} g^{-1}$	$\pm 0,1662$
	5 - 10	$8.8 \text{ cgs} \times 10^{-6} g^{-1}$		$\pm 0,1885$
	10 - 15	$6.69 \text{ cgs} \times 10^{-6} g^{-1}$		$\pm 0,0628$
Perfil D	0 - 5	$1.35 \text{ cgs} \times 10^{-6} g^{-1}$	4,58 cgs x $10^{-6} g^{-1}$	$\pm 1,3378$
	5 - 10	$7.2 \text{ cgs} \times 10^{-6} g^{-1}$		$\pm 0,3366$
	10 - 15	$2.96 \text{ cgs} \times 10^{-6} g^{-1}$		$\pm 0,3320$

**Tabla 8.** Valores promedios de la susceptibilidad magnética registrada para los perfiles suelos del canal y el error de propagación calculado en los instrumentos utilizados durante la medición.

Testigos sedimentos	Estratos	$\bar{X}$ Suscept Magnética por Estrato	$\bar{X}$ Total perfil Susceptibilidad Magnética	$\bar{X}$ Error de Propagación
Perfil 1	Superficial	$0.40 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$	$0.98 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$	$\pm 0,0264$
	Medio	$0.75 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$		$\pm 0,0250$
	Profundidad	$0.52 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$		$\pm 0,0180$
Perfil 2	Superficial	$0.65 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$	$0.87 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$	$\pm 0,0177$
	Medio	$0.63 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$		$\pm 0,0079$
	Profundidad	$0.3 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$		$\pm 0,0136$
Perfil 3	Superficial	$1.67 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$	$1.09 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$	$\pm 0,0071$
	Medio	$0.96 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$		$\pm 0,0037$
	Profundidad	$0.36 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$		$\pm 0,0049$
Perfil 4	Superficial	$0.35 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$	$0.65 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$	$\pm 0,0277$
	Medio	$0.59 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$		$\pm 0,0206$
	Profundidad	$0.47 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$		$\pm 0,0185$
Perfil 5	Superficial	$4.48 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$	$4.49 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$	$\pm 0,0337$
	Medio	$4.18 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$		$\pm 0,0112$
	Profundidad	$3.61 \text{ cgs} \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$		$\pm 0,0108$