

UCh - FC
29. Ambiental
B 268
C. 1

**ACUMULACIÓN DE ELEMENTOS TRAZAS METÁLICOS
EN SUELOS AGRÍCOLAS, POR APLICACIÓN DE LODOS
DE PLANTAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS
RESIDUALES URBANAS GENERADOS EN
LA REGIÓN METROPOLITANA**



Seminario de Título entregado a la
Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile
en cumplimiento parcial de los requisitos
para optar al título de
QUÍMICO AMBIENTAL

Carolina Carla Barra Pizarro

Director del Seminario de Título: **Ing. Agr. M. Sc. Sergio González M.**

Profesor Patrocinante: **M. Sc. Sylvia Copaja C.**

Abril, 2004

FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE 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
alumna

Carolina Carla Barra Pizarro

ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación del Seminario de
Título como requisito para optar al título de Químico Ambiental

Director del Seminario de Título:

Ing. Agr. M. Sc. Sergio González M.

Comisión de Evaluación del Seminario de Título:

Prof. Patrocinante: M. Sc. Sylvia Copaja C.

Dra. Carmen Pizarro A.

Dra. Marcia Cazanga S.



*“A mis Padres,
por su apoyo y cariño incondicional”*

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a Dios por acompañarme en esta tarea que es parte de la vida.

Al Sr. Sergio González M. por el tema de Seminario de Título, por su sincero apoyo y dedicación en el Centro Regional de Investigaciones Agropecuarias, INIA-CRI, La Platina, y a todas las personas que estuvieron conmigo durante mi permanencia, en especial a Regina Ite, Carlitos, Juanito y Edgar. Así también, a Aguas Andinas S.A. por el financiamiento de esta investigación.

Agradezco de manera especial a mi profesora patrocinante Sra. Sylvia Copaja C. por todo su cariño, comprensión y sabiduría; también a la comisión, Sra. Carmen Pizarro y Sra. Marcia Cazanga.

Durante mi estadía en la universidad quiero recordar y agradecer por su compañía y amistad a Mariela, Pato, Claudio, Viviana, Fanny, Rafa y Chica. También, a todos los profesores que hicieron posible mi formación como Químico Ambiental.

A una persona muy especial en mi vida, por su compañía, amor y paciencia, gracias Marcelo.

Por último, agradezco hoy y siempre a mi familia, a quienes amo con todo mi corazón, a mis padres Carlos Barra y Rudy Pizarro, los cuales me han guiado en el camino de la vida con su amor y apoyo incondicional, y a mis hermanos Angela y Carlos, por todo su cariño y ayuda.

Prólogo

En Chile, Aguas Andinas S.A. a través del proyecto “Valorización Agrícola de Lodos Provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de Aguas Andinas S.A. como Fertilizante” está evaluando las alternativas más viables para el reuso de lodos, probando la efectividad de éstos como fertilizante; ya que la iniciación y puesta en marcha de modernas Plantas de Tratamientos de Aguas Servidas en el Gran Santiago (El Trebal, La Farfana, Los Nogales) y periferia en la Región Metropolitana, la cual pretende tratar la totalidad de las aguas servidas en el año 2010, generará grandes cantidades de lodos que aún no tienen un reuso definido.

El principal objetivo del proyecto de Aguas Andinas es “Realizar ensayos de campo con el fin de Valorizar agrícolamente los lodos como fertilizantes”, es decir evaluar la utilización de los lodos como fuentes de macro y micro nutrientes para diferentes cultivos, reemplazando parcial o totalmente a los fertilizantes químicos con la adición de lodos en suelos de buena productividad.

El presente trabajo de investigación forma parte de este proyecto, Código Interno 500052-12, que el CRI-INIA la Platina está desarrollando desde el mes de Enero del año 2001. El encargado del Proyecto y Coordinador INIA ante Aguas Andinas, es el Sr. Sergio González Martineaux, Ingeniero Agrónomo M. Sc., Investigador del Departamento de Ciencias Ambientales CRI-INIA-La Platina.

ÍNDICE GENERAL

	Página
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2. Generación de lodos	2
1.2.1. Proceso de tratamiento de aguas servidas	4
1.2.2. Restricciones para la disposición de lodos	6
1.3. Normativa para la utilización de lodos en la agricultura	7
1.4. Utilización agrícola de los lodos	11
1.4.1. Características de los lodos	12
1.4.2. ETM's y plantas	15
1.4.3. Factores que regulan el paso de los ETM's del suelo a la planta	18
1.5. Objetivos	21
1.5.1. Objetivo General	21
1.5.2. Objetivos Específicos	21
CAPITULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	22
2.1. Actividades preparatorias a los ensayos	22
2.1.1. Selección de lodo y suelos	22
2.1.2. Preparación del medio físico de los ensayos	23
2.2. Ensayo en macetas con suelos representativos (Ensayo 1)	24
2.2.1. Tratamientos y aplicación de nutrientes, ensayo trigo	24
2.2.2. Procedimiento ensayo trigo	26
2.2.3. Actividades de mantención ensayo trigo	27
2.2.4. Cosecha trigo	28
2.2.5. Obtención de muestras y análisis en trigo	29

2.3. Ensayo en macetas con dosis crecientes de lodo (Ensayo 2)	33
2.3.1. Tratamientos y aplicación de nutrientes, ensayo ballica	33
2.3.2. Procedimiento ensayo ballica	34
2.3.3. Actividades de mantención ensayo ballica	35
2.3.4. Cosecha ballica	36
2.3.5. Obtención de muestras y análisis en ballica	36
CAPITULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
3.1. Actividades preparatorias a los ensayos	39
3.1.1. Caracterización de lodo	39
3.1.2. Caracterización general de los suelos utilizados en ensayos	40
3.2. Resultados Ensayo en macetas con suelos representativos (Ensayo 1)	44
3.2.1. Rendimiento trigo	44
3.2.2. Contenido de ETM's en granos, trigo	47
3.2.3. Contenido de ETM's en PAV, trigo	50
3.2.4. Contenido de ETM's en raíces, trigo	52
3.2.5. Contenido de ETM's en suelo después de cosecha, trigo	54
3.3. Ensayo en macetas con dosis crecientes de lodo (Ensayo 2)	56
3.3.1. Rendimiento ballica	56
3.3.2. Contenido de ETM's en cortes (C1, C2 y C3), ballica	57
3.3.3. Contenido de ETM's en raíces, ballica	59
3.3.4. Contenido de ETM's en suelo después de cosecha, ballica	60
CONCLUSIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXO I	68
ANEXO II	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Producción y proyección de lodos en plantas de tratamiento de aguas servidas en Santiago	3
2	Concentraciones máximas de metales pesados en lodos de uso agrícola	9
3	Contenidos máximos de metales en suelos antes de una aplicación de lodos	9
4	Tasas máximas de aplicación de lodos	10
5	Frecuencia de análisis a efectuar a los lodos con destino a la aplicación agrícola	10
6	Concentración de ETM's en Superfosfato Triple (SFT)	16
7	Contenidos normales y críticos de ETM's en las plantas	18
8	Tratamientos empleados en ensayo con suelos representativos	24
9	Muestras obtenidas en ensayo con suelos representativos para los suelos ADG, CHD y MAO	30
10	Dosis de lodo para cada tratamiento en ensayo de acumulación de ETM's	33
11	Muestras obtenidas en ensayo de acumulación de ETM's, suelo MAO	38
12	Determinaciones analíticas de muestras de lodo, tomadas desde el monorrelleno de la Planta El Trebal, efectuadas en el CRI INIA-La Platina	39
13.1	Características de las muestras superficiales (0-20cm de profundidad) de suelos incorporados a ensayos en macetas	42
13.2	Contenido de ETM's en las muestras superficiales de suelos incorporados a ensayos en macetas	43
14	Contenido de ETM's en granos en los suelos: ADG, CHD y MAO	47
15	Contenido de ETM's en PAV en los suelos: ADG, CHD y MAO	50
16	Contenido de ETM's en raíces en los suelos: ADG, CHD y MAO	52
17	Contenido de ETM's, después de cosecha en suelos: ADG, CHD y MAO	54

18	Contenido de ETM's en cortes, ballica	57
19	Contenido de ETM's en raíces, ballica	59
20	Contenido de ETM's en el suelo MAO, después de cosecha, ballica	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Diagrama de distribución de macetas en ensayo 1	25
2	Esquema para la determinación de ETM's en lodos, suelos y sedimentos por Espectrofotometría de Absorción Atómica, Método EPA 3050B	31
3	Esquema para la determinación de ETM's volátiles en tejido vegetal por Espectrofotometría de Absorción Atómica, Método EPA 3052	32
4	Diagrama de distribución de macetas en ensayo 2	40
5.1	Producción de trigo (PAV) en suelos de la RM, en términos relativos	45
5.2	Producción de trigo (granos) en suelos de la RM, en términos relativos	46
6	Curvas de biomasa aérea de ballica	56

Lista de abreviaturas

glh:	gramos de lodo húmedo
tonls:	toneladas de lodo seco
ADG:	Agua del Gato
CHD:	Chada
EAA:	Espectrofotometría de Absorción Atómica
ETM's:	Elementos trazas metálicos
MAO:	Maipo
PAV:	Parte Aérea Vegetativa

RESUMEN

La agenda de construcción de plantas de tratamiento de aguas servidas que proyecta una cobertura del 98% de las ciudades del país el año 2010, significará un mejoramiento significativo de la calidad del agua de muchos cursos fluviales con el consiguiente beneficio sanitario y agrícola. Esto trae como consecuencia el aumento en las cantidades de lodo producido, creando la necesidad de gestionar adecuadamente este residuo y buscar alterar lo menos posible el ambiente.

Ante este panorama, Aguas Andinas está interesada en fomentar la disposición de éstos a través de su aplicación a suelos en producción manteniéndose en el marco legislativo del anteproyecto de Reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas (CONAMA); generando, de esta manera, un beneficio económico tanto para la empresa como para los agricultores; lo que se conoce como “aplicación benéfica” de lodos.

Este trabajo aborda el estudio de los efectos producidos por la aplicación de lodo del Monorrelleno de la Planta de Tratamiento “El Trebal” de Aguas Andinas S.A. sobre distintos tipos de suelos característicos de los valles aluviales de la Región Metropolitana. En experimentos de invernadero, se estudió los efectos acumulativos de ETM's producidos por la aplicación de lodo en suelos, en dos ensayos en macetas. En el primer ensayo, el lodo fue incorporado en dosis de 12,7 tons ha⁻¹ (lodo puro) y 6,3 tons ha⁻¹ (en mezcla de un 50% con fertilización mineral nitrogenada), sobre 3 suelos: ADG, CHD y MAO, provenientes de la Región Metropolitana, y un cultivo de trigo (*Triticum durum*), comparado con una fertilización 100% mineral y un testigo, sin aplicación de lodo ni fertilizante. En el segundo ensayo el lodo fue incorporado en dosis de 2,1; 7,7 y 10,5 tons ha⁻¹, sobre el suelo MAO, Región Metropolitana, y un cultivo de ballica (*Lolium perenne*), lo que se compara con un testigo, sin aplicación de lodo.

El efecto del lodo como fertilizante orgánico en el cultivo de trigo sobre los rendimientos, dependió del suelo utilizado. Los mejores rendimientos se obtuvieron para la mezcla 50% fertilización mineral y 50% fertilización orgánica (lodo). Las producciones de granos tuvieron grandes fluctuaciones entre suelos y tratamientos. Por otro lado, en el cultivo de ballica, hubo efectos positivos sobre el rendimiento, en biomasa producida a medida que las dosis del lodo fueron más elevadas.

La adición de lodos incrementó levemente los contenidos totales de ETM's en los suelos. Los contenidos de ETM's en los tejidos vegetales analizados (granos, raíces y PAV) no aumentaron significativamente por la aplicación de lodo. La carga metálica medida en los tejidos vegetales proviene, básicamente, del aporte propio de los suelos y/o del aporte del fertilizante (Superfosfato Triple, SFT).

Desde el punto de vista de la distribución de ETM's en las partes de la planta, el lodo aumentó la concentración de ETM's en los granos, especialmente el Zn, en todos los suelos las concentraciones fueron mayores que en otras partes de la planta (PAV y raíces); esto se presenta en menor grado para el Cu. Para los ETM's restantes las mayores concentraciones se presentaron en las raíces. En PAV las concentraciones de ETM's fueron mayores que las encontradas en granos y menores que en raíces.

SUMMARY

The construction schedule of wastewater treatment plants, which will cover 98% of the cities by the year 2010, is an important improvement in the quality of many fluvial courses with the resulting sanitary and agricultural benefits. As a consequence the amount of sewage sludge will increase creating the need of an adequate management of this product, trying not to disturb the environment.

In accordance with this, Aguas Andinas is interested in developing a way to apply the sewage sludge to productive soil within the legislation framework of the preliminary design of Regulations for the handling of non-dangerous sewage sludge which was generated for water treatment plants (CONAMA); producing, this way, an economic benefit for the company as well as for the farmers; this is what is known as “beneficial application” of sewage sludge.

This work approaches the study of the effects produced by the application of sewage sludge of Monorrelleno of “El Trebal” Treatment Plant of Aguas Andinas S.A. in soils with different characteristics in the alluvial valleys of the Metropolitan Region. In greenhouse experiments, the accumulative effects produced by the application of sewage sludge to the soil was studied in two experiments with pots. In the first experiment, the sewage sludge was incorporated in 12,7 tons ha^{-1} amounts (pure sewage sludge) and 6,3 tons ha^{-1} (in mixes with 50% nitrogenous mineral fertilization), in 3 different types of soil: ADG, CHD y MAO, originating of the Metropolitan Region, and wheat cultivation (*Triticum durum*), compared with a 100% mineral fertilization, and a control (untreated soil). In the second experiment the sewage sludge was incorporated 2,1; 7,1 and 10,5 tons ha^{-1} amounts, in the MAO soil, Metropolitan Region, and ballica cultivation (*Lolium perenne*) fields, which was compared to a control, without sewage sludge application.

The effect of the sewage sludge on yield as organic fertilizer in the cultivation of wheat, depended of the type of soil used. The best yield was the 50% mineral fertilization and 50% organic fertilization (sewage sludge) mix. The production of wheat grains had great fluctuations between soil and treatments, fact that is not strange in plants cultivated in pots, in a greenhouse. On the other hand, in the cultivation of ballica, it had positive effects on the yield, in biomass produced as the amounts of sewage sludge were increased.

The adding of sewage sludge increased the total content of metallic residue of ETM in the soil. The ETM content in plant tissue analyzed (grain, roots and PAV) did not increase significantly by the application of sewage sludge. The measured metallic load in vegetal weaves comes, basically, of the contribution of soils and/or the contribution of the fertilizer (Triple Superphosphate, SFT).

From the point of view of ETM's distributions in parts of the plant, sewage sludge has increased the concentration of ETM's in wheat grains, specially zinc, in all soils the concentrations are greater in other parts of the plant (PAV and roots); this appears in smaller degree for the Cu. For the ETM's remaining the greater concentrations appeared in the roots. In PAV the concentrations of ETM's were greater than found in grains, but low that in the roots.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes Generales

La generación de residuos, ha sido una de las características distintivas de todas las sociedades humanas. Este problema se ha agudizado con la concentración demográfica en núcleos urbanos y el uso de nuevas tecnologías en la industria que ha introducido contaminantes nuevos, lo cual ha ocasionado riesgos para la salud humana y para el ambiente. En la actualidad, estos problemas afectan a todos los mecanismos reguladores de ecosistemas.

La depuración de las aguas servidas por métodos biológicos o fisicoquímicos, produce cantidades importantes de materiales orgánicos, que se denominan lodos residuales (Yague y col, 1987).

Entre las opciones que se plantean, para dar un destino final a la gran cantidad de lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas servidas, la reutilización, vía aplicación a los suelos como fertilizantes, puede ser una de las alternativas mas adecuada. Sin embargo, es necesario evaluar los problemas que puede ocasionar esta práctica, derivados de la gran cantidad de sustancias que se mezclan con las aguas residuales, por lo que es preciso considerar sus efectos sobre el suelo y las plantas, así como su posible entrada a las aguas subterráneas y a la cadena trófica (Andrade y col, 2000).

La aplicación de lodos residuales a suelos agrícolas es una práctica habitual en países desarrollados por razones prácticas y económicas, desde la doble perspectiva de

frenar la degradación del medio ambiente y conseguir el aprovechamiento de los recursos que la mayoría de los países poseen en mayor o menor cantidad (Quinteiro y col, 1998).

La degradación de los suelos, es un hecho sumamente preocupante, ya que incide negativamente en los ecosistemas y produce considerables pérdidas económicas. La incorporación de materia orgánica a los suelos de cultivo favorece sus propiedades físicas, químicas y biológicas y, para este fin, se puede emplear diversos productos orgánicos, de origen vegetal y animal, como los lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas, que contienen hasta un 60% de materia orgánica en su composición respectivamente (López y col, 2000).

Un factor importante que puede limitar la utilización agrícola de los lodos es la presencia de cantidades elevadas de metales pesados entendiendo por tales aquellos que presentan una densidad mayor de $5,0 \text{ g cm}^{-3}$, pues a partir de una determinada concentración resultan tóxicos para la planta y con el subsiguiente riesgo para la cadena trófica.

1.2. Generación de Lodos

La creciente generación de lodos, en el mundo, ha llevado a buscar alternativas de uso para éstos, siendo el Consejo de la Unión Europea (CUE) quien está a la vanguardia en los estudios de utilización de estos residuos. De acuerdo a la Unión Europea (U.E.), la producción anual de lodos en Europa, se estima en 6,5 millones de toneladas de lodos al año y se espera que esta cifra alcance los 15 a 20 millones de toneladas para el año 2005, lo cual refleja un aumento en cada estado miembro de la U.E. del orden del 40 al 300% (Directiva del Consejo de la U.E. sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas, 91/271/EEC).

En Chile en el año 2000, con el inicio de las obras de construcción de la planta de aguas servidas “El Trebal”, comenzó el plan de saneamiento de aguas servidas del Gran Santiago, cuyo objetivo es tratar las aguas contaminadas de una población estimada en 1.700.000 habitantes de la zona sur y sur poniente de Santiago, que descargan sus aguas servidas al río Maipo y el Zanjón de la Aguada. Dicha planta se encuentra ubicada a 35 kilómetros de la ciudad de Santiago, al norponiente de la comuna de Padre Hurtado, en la ribera norte del río Mapocho. Esta planta trata un caudal promedio de $4,4 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$, con lo que es posible descontaminar el 23% del total de las aguas servidas generadas por los habitantes de Santiago (Aguas Andinas, 2002).

La Planta de Tratamiento de Aguas Servidas La Farfana, entró en funcionamiento a fines del año 2003 y descontamina el 50% de las aguas servidas de la capital. El objetivo de esta planta es sanear una población estimada en 3.294.000 habitantes, de las comunas de La Reina, Ñuñoa, Peñalolén, La Florida, La Cisterna, San Ramón, Pedro Aguirre Cerda, Santiago, Providencia, Macul, San Joaquín, Quinta Normal, Lo Espejo, Estación Central, Las Condes, Pudahuel y Lo Prado. Esta planta tendrá un caudal promedio de $8,8 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$, y se encuentra ubicada en la comuna de Maipú (Aguas Andinas, 2002).

En la tabla 1 se muestra la producción actual y proyección de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas servidas en Santiago.

Tabla 1. Producción y proyección de lodos en plantas de tratamiento de aguas servidas en Santiago.

LODO SECO				
Plantas	2001	2004	2009	2027
	ton año⁻¹			
El Trebal	21535	24090	27740	39420
La Farfana	---	51465	54385	62780
Los Nogales	---	---	29565	43070
Total Diario	21535	75555	111690	145270

Fuente: Aguas Andinas, 2001.

1.2.1. Proceso de tratamiento de aguas servidas

Una planta depuradora de aguas servidas urbana consta de dos grandes líneas de tratamiento, una correspondiente a la depuración de aguas y la otra al tratamiento de los lodos que se generan en las operaciones de decantación. El tratamiento más comúnmente utilizado para estos lodos está constituido por las siguientes operaciones (Soler, 1998):

Estabilización: consiste en la reducción de la materia orgánica hasta alcanzar su relativa estabilidad, a fin de evitar la putrefacción posterior y los malos olores. Entre las más comunes se encuentran las siguientes:

- Estabilización aeróbica y aireación prolongada a temperatura ambiente o autotérmica (termofílica); se basa en la oxidación microbiana de la fracción más lábil de los lodos; tiene el inconveniente que su contenido inicial de materia orgánica disminuye en una tercera parte. La estabilización en frío supone la aireación de los lodos durante períodos que oscilan entre los 15 y 50 días, obteniendo un producto prácticamente estabilizado. El proceso termofílico utiliza el calor metabólico producido por la biodegradación de la propia materia orgánica del lodo para llegar a alcanzar temperaturas entre 45 y 65°C.
- Estabilización biológica anaerobia; se someten los lodos a una digestión anaerobia durante tiempos y temperaturas variables, generándose lodos cuyo contenido en materia orgánica es de 50% menos que el material de partida. Es una estabilización muy difundida en estaciones de medio y de gran tamaño, ya que el gas producido en la digestión se puede utilizar como fuente de energía.
- Estabilización química; se realiza por la adición a los lodos de productos químicos que los inactiva en gran medida; habitualmente se utiliza cal que produce un considerable aumento del pH, eliminando los microorganismos patógenos. Con este procedimiento se favorece la liberación de amoníaco por lo que desde el punto de vista agrícola puede haber una reducción del valor fertilizante del lodo.



Espesamiento: se puede realizar antes de la estabilización o después de ella, con el fin de reducir lo más posible el volumen del lodo a tratar. Esta operación se suele llevar a cabo mediante procedimientos físicos, que incluyen el espesamiento por gravedad, flotación, centrifugación y filtros de banda por gravedad. Usualmente se utiliza el espesamiento por gravedad donde se pueden concentrar los sedimentos primarios hasta un 6% u 8%, y lo secundarios hasta un 2%. La flotación mediante la inyección con aire disuelto permite una concentración de sólidos entre un 3% y 6%.

Acondicionamiento: consiste en un proceso físico-químico cuyo principal objeto es facilitar la pérdida de agua en los lodos, preparándolos para la fase posterior de deshidratación que permite obtener un producto relativamente sólido o semisólido. Los métodos de acondicionamiento más utilizados son:

- El acondicionamiento químico permite reducir la humedad del lodo desde un 90-99% a un 65-85% dependiendo de la naturaleza de los sólidos a tratar. Esto permite la coagulación de los sólidos y a la liberación del agua absorbida, por lo cual se efectúa antes de las operaciones de deshidratación.
- El acondicionamiento térmico consiste en el calentamiento bajo presión sobre los 200°C durante una media hora, con lo que se obtiene un material con muy buenas características para su posterior deshidratación y prácticamente esterilizado.
- El acondicionamiento por levigación es realmente un lavado que reduce la alcalinidad y separa los sólidos finos, disminuyendo así la demanda química de oxígeno del lodo. Este procedimiento también suele arrastrar nitrógeno del producto.

Deshidratación: el lodo tratado se somete a una deshidratación con el fin de obtener un material semisólido con un volumen menor y más fácil de manejar. Se puede llevar a cabo por medios naturales (lagunas o lechos de secado) o mecánicos (filtración al vacío o bajo presión, centrifugación y filtración).

1.2.2. Restricciones para la disposición de lodos

La puesta en práctica de la Directiva Europea sobre Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (91/271/CEE), ha originado un rápido desarrollo de plantas de tratamiento de aguas residuales en Europa, dando lugar a cantidades crecientes de lodos. Sin embargo, la Directiva Europea señalada, proyecta restringir las actuales vías de vertido de los lodos:

Vertido controlado: es un sistema de eliminación definitiva, aunque precisa zonas adecuadas. Hay una tendencia a reducir la cantidad de materia orgánica a introducir en vertederos, para promocionar el reciclaje de las mismas, minimizando los lixiviados y las emisiones de metano (Soler, 1998).

Vertido al mar: no accesible desde el 01/01/2000. Este sistema fue una de las vías más utilizadas en el mundo, pero ha sido eliminada debido a la alta concentración de metales pesados que se han encontrado en las aguas marinas (Bontoux y col, 1996).

Incineración: que aunque reduce al máximo su peso y volumen, resulta poco interesante porque supone un desperdicio energético considerable y por los productos de combustión contaminan la atmósfera (Yague y col, 1987).

Rellenos Sanitarios: vía restringida, ya que hay incompatibilidad con el procesamiento de residuos sólidos domiciliarios. Este método es crítico en la Región Metropolitana, siendo de menor vida útil y los sitios son difíciles de ubicar (INIA, 2001).

Monorrellenos: alto costo; dificultad para encontrar sitios apropiados (INIA, 2001). Actualmente, Aguas Andinas dispone de monorrellenos o monofills, en las plantas de tratamientos de aguas servidas.

Disposición en suelos agrícolas: el reciclaje de lodos de distintos orígenes como fertilizante en terrenos agrícolas, forestales o espacios degradados, es una de las vías de eliminación más aceptadas, ya que ofrece la posibilidad de que estos residuos se conviertan en recursos. Se puede comparar con lo que se hace tradicionalmente con una amplia gama de residuos orgánicos que se esparcen a los suelos agrícolas. Sin embargo, los lodos presentan unos potenciales aspectos negativos en cuanto a su uso como abono, fundamentalmente su contenido en elementos traza metálicos y los microorganismos patógenos, entre otros; razones más que suficientes para plantear que la aplicación agrícola de estos materiales no se puede hacer de una forma anárquica, sin el menor conocimiento de su naturaleza y sin una normativa básica para su adecuada aplicación (Yague y col, 1987).

1.3. Normativa chilena para la utilización de lodos en la agricultura

La Comisión Nacional del Medio Ambiente, CONAMA, desarrolló un reglamento, actualmente en la etapa de redacción final, para el tratamiento y disposición de los lodos no peligrosos, entre los cuales están los lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas. Este reglamento tiene por objeto regular el manejo sanitario de lodos no peligrosos provenientes de plantas de tratamiento de aguas. Con ello, proteger la salud de la población y prevenir el deterioro de los recursos naturales, aire, agua, flora, fauna y suelo (CONAMA, 2001). Asimismo, está orientado a regular el uso y manejo de lodos no peligrosos en la agricultura, cuando sus condiciones físicas, químicas y biológicas lo permitan. Con lo cual estos se transforman en un producto útil, para la recuperación de suelos degradados así como para sustituir el uso de insumos tradicionales en la agricultura.

El reglamento se refiere a los lodos no peligrosos generados por plantas de tratamiento de agua potable, de aguas servidas, incluyendo fosas sépticas, así como por plantas de tratamiento de residuos industriales líquidos. Se considerarán lodos no

peligrosos aquellos que no presentan ninguna característica de toxicidad, como lixiviación, reactividad, inflamabilidad o corrosividad. Independientemente del origen de los lodos objeto de esta norma, ellos deberán cumplir con los requisitos previstos en la misma, para efectos de su transporte, tratamiento, el cual indica las siguientes normas para la utilización de estos lodos en la agricultura:

- Sólo se podrán utilizar en la agricultura lodos esterilizados e higienizados provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas, incluyendo fosas sépticas o de plantas de tratamientos de residuos industriales líquidos.
- Según el contenido de patógenos se distinguen dos tipos de lodos: Lodos Clase A (aquellos aptos para uso agrícola, sin restricciones por razones sanitarias) y Lodos Clase B (aquellos aptos para uso agrícola, con restricciones de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos).
- Los lodos Clase A deberán cumplir exactamente con requisitos como:
 1. Tener una densidad de coliformes fecales menor a 1000 NMP (Número Más Probable) por gramo de lodo, en base seca.
 2. Tener una densidad de *Salmonella* sp. menor a 3 NMP en 4 gramos de lodo, en base seca.
- Los lodos Clase B, deberán cumplir el siguiente requisito: la media geométrica de la densidad de coliformes fecales, producto del análisis de un número de muestras no inferior a siete, tomadas al momento de uso, debe ser menor que 2 millones NMP por gramo de lodo en base seca.

En cuanto a metales pesados, el artículo 13 señala que queda prohibida la aplicación de lodos en suelos de uso agrícola, forestal o en jardines, cuando los análisis indiquen que los contenidos totales de metales pesados sobrepasan cualquiera de las concentraciones máximas señaladas en la tabla 2.

Tabla 2. Concentraciones máximas de metales pesados en lodos de uso agrícola

Metal Pesado	Concentración máxima en mg kg⁻¹ de lodo (base seca)¹
As	40
Cd	40
Cu	1500
Hg	20
Ni	420
Pb	300
Se	100
Zn	2800

¹ Concentraciones expresadas como contenidos totales
Fuente: CONAMA, 2001.

El artículo 18, señala que en caso alguno, se aceptará que los suelos susceptibles de recibir aplicaciones de lodos excedan los contenidos totales para metales contenidos en la tabla 3.

Tabla 3. Contenidos máximos de metales en suelos antes de una aplicación de lodos

Metal¹	Contenido total en mg kg⁻¹ de suelo (base seca)		
	Zona Centro-Norte²		Zona Sur³
	pH >6,5	pH <6,5	Todo pH
As	20	12,5	10
Cd	2	1,25	2
Cu	150	100	75
Mo	2	3	3
Pb	75	50	50
Zn	175	120	175

¹ Para los otros metales señalados en la tabla 2 no se consideran restricciones por falta de información en suelos nacionales

² Desde la línea de la Concordia (Primera Región) por el norte hasta el límite norte de la Sexta Región por el sur

³ Desde el límite norte de la Sexta Región por el norte hasta el Cabo de Hornos (Duodécima Región) por el sur

Fuente: CONAMA, 2001.

El artículo 19, señala que la aplicación de lodos, su forma, tasa y oportunidad, se debe orientar por criterios sanitarios, agronómicos (contenido de nutrientes requeridos por los cultivos, principalmente medidos como nitrógeno, fósforo y potasio disponibles) y por el contenido total de metales pesados, tanto en los lodos como en el suelo receptor. La tabla 4 contiene las tasas máximas de aplicación.

Tabla 4. Tasas máximas de aplicación de lodos

Tipos de usos	Tasa máxima ton há⁻¹año⁻¹ (base seca)
Suelos agrícolas y forestales, incluyendo suelos erosionados con potencial de uso agrícola inmediato	15
Césped, jardines y áreas verdes	2
Suelos degradados sin potencial de uso agrícola inmediato (recuperación de cárcavas para generar capa vegetal o para estabilizar estructuras riesgosas)	30

Fuente: CONAMA, 2001.

El artículo 43, señala que los lodos no peligrosos con destino a la disposición final, deberán contar con un análisis de reducción de atracción de vectores, de la densidad de coliformes fecales y del contenido de humedad. Los lodos no peligrosos con destino a la aplicación en agricultura, deberán contar con un formulario único. Los análisis a efectuar se deben realizar con la frecuencia señalada en la tabla 5.

Tabla 5. Frecuencia de análisis a efectuar a los lodos con destino a la aplicación agrícola

Cantidad de lodos, en ton año⁻¹	Frecuencia de análisis
0 – 300	1 vez al año
300 – 1500	4 veces al año
1500 – 15000	6 veces al año
Mayor a 15000	12 veces al año

Fuente: CONAMA, 2001.

En caso que los resultados de los análisis no varíen de forma significativa en un período de dos años, la autoridad competente podrá autorizar una frecuencia menor, que a lo menos será anual.

1.4. Utilización agrícola de los lodos

Se considera el suelo como un sistema depurador, porque a través de él ciertos iones aportados con los residuos orgánicos se inmovilizan al formar complejos con los coloides minerales y orgánicos del mismo, la materia orgánica es degradada por la acción microbiana y además actúa como un filtro que puede retener desde bacterias hasta partículas en suspensión de mayor tamaño. En la utilización del suelo como sistema depurador hay que considerar también la intervención de los vegetales que en él se desarrollan, ya que al asimilar una cantidad considerable de nutrientes, impiden su pérdida por lavado. Consecuentemente, el suelo es un sistema dinámico a través del cual los elementos nutritivos se pueden reciclar pasando de los residuos a las plantas, al aire o al agua y por tanto representa el destino natural y óptimo de los residuos. Existen muchas limitaciones que dependen de la calidad de los residuos y muchas otras que derivan de las propiedades del suelo a tratar.

La utilización agrícola es el uso más beneficioso para los lodos de aguas servidas, (CWMI, 1996). Para una correcta aplicación agrícola de los lodos residuales urbanos, se deben evaluar previamente los efectos que éstos producirán sobre el suelo, los cultivos, la cadena trófica y el medio ambiente.

Es de creciente preocupación, que el uso de lodos de aguas servidas en suelos de uso agrícola no modifiquen los actuales contenidos de concentración de metales en el suelo (Obbard y col, 1992); puesto que la mayoría de ellos están presentes en concentraciones más altas en los lodos que en los suelos, es razonable contar con que los usos repetidos de los lodos aumenten las concentraciones de estos elementos en el suelo (Stehouwer, 2003).

Con el pasar de las décadas, el contenido de metales pesados en los lodos de aguas servidas ha disminuido debido al pretratamiento de los residuos industriales por las exigencias de la legislación de cada país (Krogmann, 2000). Lo cual, debería aplicarse estrictamente en Chile.

1.4.1. Características de los Lodos

Las características físico-químicas que presentan los lodos pueden variar en función de su origen, su edad y el tipo de proceso de donde se han generado. Así por ejemplo, procesos de depuración que involucran la adición de compuestos químicos (cloruro férrico, polímeros, etc.) precipitan formando parte de los sólidos. También se pueden generar efectos tales como que el hidróxido de aluminio absorba el fósforo o trazas de otros metales como el cadmio. Los lodos se caracterizan por su alto contenido de agua, la que les otorga un volumen importante y favorece sus pobres características mecánicas, dificultando su manejo y disposición final.

Físicamente, los lodos generados en un proceso de tratamiento biológico por lodo activado presentan un color café marrón el que cambia a casi negro cuando esta a punto de descomponerse (si es muy claro puede que haya sido aireado en exceso y los sólidos hayan sedimentado). Su olor es el de tierra húmeda, sin embargo, cuando está descompuesto produce un olor bastante desagradable. Contiene una concentración de sólidos que varía entre 0,3% y 1,5%. La fluidez y la plasticidad de los lodos varían con el contenido de agua y la naturaleza de los sólidos (Knight, 1998):

- Al reducir el contenido de agua del lodo a aproximadamente un 15%, se puede observar un espesamiento bien definido.
- Con un 70% a un 80% de agua, el lodo ya no escurre, y se conoce con el nombre de torta de lodo, y se puede palear.

- Los lodos con un contenido de humedad de hasta un 65%, pueden ser depositados sin restricciones, para ellos es necesario aplicar secado térmico o acondicionamiento con cal.

Las características químicas de los lodos están relacionadas a sus cinco constituyentes principales, los cuales son:

Materia orgánica.- El contenido típico de materia orgánica de un lodo no estabilizado varía entre la un 59% a un 88% de SV, medidos sobre la base de masa seca (porcentaje que representan los sólidos volátiles, removidos tras someter al lodo a una temperatura de 550°C, bajo condiciones de oxidación).

Nutrientes.- Los lodos provenientes de aguas servidas domésticas contienen tres nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como el nitrógeno, fósforo y potasio, los cuales pueden estar en diversas formas químicas. Sin embargo, los niveles de nutrientes presentes en los lodos estabilizados son inferiores a los contenidos en fertilizantes químicos (Metcalf & Eddy, 1996).

Concentración de Patógenos.- Los lodos son principalmente biomasa residual, la cual está constituida por una heterogénea y significativa población de microorganismos como bacterias, virus, protozoos y huevos de helmintos, los que se concentran durante el proceso de depuración de las aguas servidas. Los patógenos son difíciles de cuantificar, debiendo manejar indicadores que permitan estimar su reducción, como por ejemplo, los coliformes fecales.

Químicos Orgánicos Tóxicos.- El lodo generado en una planta de tratamiento de aguas servidas, puede contener sustancias químicas orgánicas sintéticas aportadas por los efluentes industriales, productos químicos utilizados en el hogar y pesticidas.

Metales Pesados y otros micronutrientes.- Los lodos pueden contener cierta concentración de metales pesados e iones orgánicos que son función del tipo y cantidad del residuo industrial descargado en el sistema de tratamiento de aguas servidas. Muchas industrias descargan sus efluentes industriales a través de la red de alcantarillado, el cual aunque cumple con la normativa de descarga (D.S. 609/98 del Ministerio de Obras Publicas) aporta ciertas cantidades de sustancias químicas que se unen a las aguas servidas que posteriormente serán tratadas en las plantas de tratamiento.

Los elementos predominantes en los lodos son Pb, Zn, As, Cu, Mn, Sb y Ba. En cantidades no tan importantes se encuentran Tl, Cr, Co, Cd y Ni. Menores proporciones las presentan Mo, Hg y Sn (Aguilar y col, 2000). El establecimiento de niveles estándar de elementos trazas para la valoración de la contaminación del suelo, constituye el principal requisito de calidad y protección de las funciones agrícolas y ecológicas (Pérez y col, 2000).

El grado de peligrosidad de los metales pesados va ligado a dos propiedades principales: su toxicidad y persistencia, sin olvidar que hay que añadir la capacidad que la planta posee para absorber cualquier elemento; tampoco, se deben olvidar los efectos sinérgicos y antagónicos que un elemento puede desplegar frente a otro. En conjunto, todas estas propiedades son importantes al evaluar el grado de peligrosidad de los metales pesados en el suelo.

Desde el punto de vista medioambiental, los metales pesados más interesantes son el Cd, Cu, Ni, Pb, Cr, Zn y Hg (Pomares y col, 1998). Para asegurar de que los usos repetidos de los lodos estén manejados sustentablemente, debemos considerar efectos acumulativos sobre el ambiente del suelo y de la planta, y el potencial para la contaminación del agua subterránea y del agua superficial (Cogger y col, 2001).

más inmediato. El problema de contaminación de las plantas ha sido, naturalmente, objeto de estudio desde que se empezaron a emplear con fines agrícolas los primeros lodos residuales en 1939 en EE.UU., pero fue necesario llegar a los años 60 para que el problema se afrontase en su integridad y se tuvieran en cuenta los efectos debidos a una experimentación de muchos años.

Existen otras fuentes de elementos trazas metálicos a los suelos, como lo son los fertilizantes minerales, especialmente los fosfatados que contienen estos elementos en sus impurezas, aunque en dosis bajas, pero a largo plazo pueden presentar graves problemas de acumulación. En la tabla 6 se muestra, como ejemplo, los contenidos de ETM's en el superfosfato triple.

Tabla 6: Concentración de ETM's en Superfosfato Triple

ETM	Concentración mg Kg⁻¹
As	16,2 ± 1,0
Cd	5,0 ± 0,0
Cr	88,9 ± 4,8
Cu	3,2 ± 0,0
Ni	25,2 ± 0,8
Pb	11,1 ± 0,6
Zn	61,3 ± 4,2

Fuente: K.P. Raven and R. H. Loeppert, 1997.

Los mayores riesgos de toxicidad derivan del Cd, Cu, Zn y Ni, cuya concentración en lodos es particularmente elevada. La acumulación de Hg se presenta cuando este elemento está contenido en lodos en porcentajes relativamente elevados. El Cu y el Zn se tienden a acumular en medida notable en los tejidos vegetales cuando se encuentran en elevada concentración en los lodos residuales. De todas formas, se debe tener en consideración que uno de los factores principales, para la posibilidad de acumulación de los metales pesados, es el tipo de planta que crece en el suelo tratado con este residuo. Las especies vegetales tienen una tolerancia muy variable con respecto a los metales tóxicos, y

existen diferencias de tolerancia también dentro de una misma especie. La edad de la planta parece también un factor relevante en la acumulación de metales pesados en los tejidos vegetales (Yague, 1987).

Las plantas tienen dos tipos de resistencias a los metales contaminantes: evasión y tolerancia, la evasión es considerada como la capacidad de la planta para prevenir una captación excesiva mientras que la tolerancia se manifiesta como la capacidad para controlar la concentración de esos metales, en su cuerpo.

En algunos casos, las plantas resistentes a un determinado metal poseen mecanismos bioquímicos que limitan la absorción, si bien este hecho no es generalizable; a veces se trata de diferencias funcionales y de adaptaciones metabólicas que confieren una resistencia específica. La tolerancia en relación a un determinado metal no implica resistencia en relación a los otros elementos. Por ejemplo, una planta insensible al cinc puede ser sensible al cobre y viceversa. Se dan algunos casos en los cuales la tolerancia en relación a un determinado metal comporta la insensibilidad hacia otros metales. La propiedad no es generalizable, en el sentido de que la planta resistente al cinc puede tolerar notables cantidades de cobre, pero solo en presencia de cinc. Esta propiedad se define como tolerancia asociada.

La existencia de plantas tolerantes y por tanto acumuladoras de metales pesados tóxicos induce a graves peligros por la inserción de estos elementos en la cadena trófica y la posible intoxicación de animales y personas que se alimentan de ellas. Las plantas poseen un rango de elementos trazas metálicos en su interior que es normal, pero llega un límite el cual es crítico, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7: Contenidos normales y críticos de elementos trazas metálicos en las plantas

Elemento	Rango normal en plantas (mg Kg⁻¹)	Concentración crítica en plantas (mg Kg⁻¹)
As	0,02 - 7	5 - 20
Cd	0,10 - 2,4	5 - 30
Cr	0,003 - 14	5 - 30
Cu	5 - 20	20 - 100
Hg	0,005 - 0,17	1 - 3
Mo	0,003 - 5	10 - 50
Ni	0,02 - 5	10 - 100
Pb	0,2 - 20	30 - 300
Se	0,001 - 2	5 - 50
Zn	1 - 400	100 - 400

Fuente: Alloway, 1995

1.4.3. Factores que regulan el paso de los ETM's del suelo a la planta

En un suelo tanto la movilidad de ETM's hacia horizontes más profundos como su disponibilidad para la planta, están condicionadas por una serie de factores que influyen en los mecanismos de sorción de estos elementos, como son textura, contenido de materia orgánica, pH, contenido de carbonatos, etc.; (Alloway, 1995).

De todos ellos es el pH el que, a igualdad del resto, determina la mayor o menor facilidad con que los metales pueden ser transportados a través del perfil del suelo. Aunque la relación entre el pH de un suelo y las fracciones soluble y disponible de un metal en el mismo difiere para cada elemento, las condiciones ácidas favorecen, en general, el mantenimiento de formas solubles de los compuestos metálicos, y suponen un elevado potencial de lixiviación de metales, que se acentúa en aquellas zonas con predominancia de texturas gruesas y materiales con escasa capacidad de adsorción. Son numerosos los factores que regulan el paso de los metales pesados del suelo a la planta e incluso no todos son conocidos actualmente. En primer lugar, podemos distinguir varias clases de factores:

- Factores relativos al lodo:
 - Grado de enlace y disponibilidad de los metales
 - Carácter complejante de la materia orgánica y su propia descomposición
 - pH del lodo
 - Capacidad de fermentación del lodo
- Factores relativos al suelo:
 - pH del suelo
 - Capacidad de cambio de cationes
 - Contenido en materia orgánica
 - Contenido en arcillas
 - Características de drenaje del suelo
 - Condiciones redox, en relación con el grado de saturación del agua
 - Composición granulométrica del suelo
- Factores relativos a la planta:
 - Naturaleza y sensibilidad específica de la especie vegetal

Así también, la acumulación de metales no es uniforme y puede afectar, según los casos a raíces y partes aéreas (hojas, frutos, granos) siendo distintos los problemas planteados según la parte de la planta que los almacene.

Por todo ello, este trabajo pretende analizar los efectos de diferentes dosis de lodos residuales urbanos sobre la evolución del contenido de ETM's en el suelo y en cultivos, de determinadas especies vegetales, tanto en raíces como en parte aérea vegetativa, fundamentalmente porque los lodos son una fuente permanente de ETM's y, por tanto, presentan siempre el riesgo de incrementar los contenidos metálicos en suelos y plantas

cultivadas como alimento tanto humano como animal. Por tanto, un uso responsable de lodos, entendido como sustentable a largo plazo, requiere de información sobre contenidos de metales en lodos y su dinámica ambiental una vez entregados a los suelos.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General:

Evaluación de la utilización de lodos en diferentes cultivos, como fuente de macro y micro nutrientes dentro de límites permisibles, para lograr que la disposición de éstos en suelos agrícolas sea una alternativa sostenible en el tiempo sin detonar efectos ambientales negativos.

1.5.2. Objetivos Específicos:

- Evaluación del rendimiento de especies vegetales, bajo la aplicación de diferentes dosis de lodos.
- Evaluación de la respuesta de cultivos a la aplicación de lodos en suelos de la Región Metropolitana, respecto a la absorción de elementos trazas metálicos en las diferentes partes de la planta (aéreas y raíces),
- Determinación de la acumulación de elementos trazas metálicos en suelos representativos con diferentes dosis de lodos, antes y después de la siembra de una determinada especie vegetal.
- Evaluación de la distribución, en cuanto a las concentraciones, de los elementos trazas metálicos dentro de las diferentes partes de las plantas y en los suelos.

CAPITULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Actividades preparatorias a los ensayos

2.1.1. Selección de lodo y suelos

- *Selección de lodo*

Se utilizó lodo tomado desde el Monorrelleno de la Planta de Tratamiento “El Trebal” de Aguas Andinas S.A., emplazada en la localidad de Padre Hurtado.

- *Selección de Suelos*

Al levantar el ensayo se comenzó con diez suelos, de los cuales se seleccionaron sólo tres, considerando aquellos más representativos. Las descripciones de los suelos seleccionados se encuentran en anexo I, las cuales fueron tomadas de estudios agrológicos de la Comisión Nacional de Riego, para la Región Metropolitana. Los suelos utilizados fueron los siguientes:

- los suelos MAO, CHD, representando suelos provenientes de un agricultura intensiva, en la Región Metropolitana, y
- el suelo ADG, representando el valle aluvial del Río Maipo, en la Región Metropolitana de Santiago.

Se realizó un análisis de las características generales de los suelos utilizados en los ensayos en cuanto a salinidad, propiedades físicas y químicas, y contenidos totales de elementos trazas metálicos (ETM) asociadas a la estrata arable (primeros 20 cm de profundidad) de los suelos en estudio, antes de iniciar el ensayo.

Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Química y Edafología Ambiental del CRI-INIA, La Platina. Los métodos fueron los utilizados por este laboratorio para los distintos tipos de análisis, fundamentalmente corresponden a los “Métodos recomendados para suelos chilenos” por Sadzawka y col., 2000. Los análisis realizados fueron los siguientes:

- pH: Suspensión y determinación potenciométrica,
- Conductividad Eléctrica (CE): Extracto de saturación y determinación conductivimetría,
- Granulometría: Método de Bouyoucos,
- SO_4^{-2} : Extracto de saturación y determinación colorimétrica,
- Cl^- : Extracto de saturación y determinación por titulación potenciométrica con nitrato de plata,
- Densidad aparente: Método del Cilindro,
- Materia Orgánica (MO): Digestión ácida y determinación colorimétrica,
- CIC efectiva: extracción, saturación con acetato de amonio a pH 7, y
- Humedad aprovechable: Retención de humedad a 0, a 3 y a 15 atm de presión.

2.1.2. Preparación del Medio Físico de los Ensayos

- Adecuación de la sala 3 del invernadero 4 del CRI-INIA, La Platina, consistente en aseo general, reparación y cambio de mesones.
- Colecta de suelos, desde la estrata arable (0-20cm de profundidad), aproximadamente, 80 Kg ss de cada suelo; esta actividad fue ejecutada por la Ing. (E) Amb. Srta. Karin Reuck, INIA.
- Derivación de muestras al laboratorio de Análisis Ambientales S.A. (ANAM S.A.), para los análisis respectivos;
- Preparación de suelos, siguiendo una secuencia de desterronado manual, secado al aire, molienda manual y tamizado bajo 6 mm.

2.2. Ensayo en macetas con suelos representativos (Ensayo 1)

- El ensayo se inició a mediados de Junio del 2002. Se trabajó con un diseño completamente al azar, siendo la maceta la unidad experimental (equivalente a parcela, en los ensayos de campo).
- El ensayo considera 1 especie (Trigo, *Triticum durum*, cv. Llaret-INIA.), 3 suelos, 4 tratamientos y 3 repeticiones, lo que significa 36 macetas en total. Los tratamientos utilizados en este ensayo se presentan en la tabla 8. La distribución de macetas para este ensayo se resume en la figura 1.

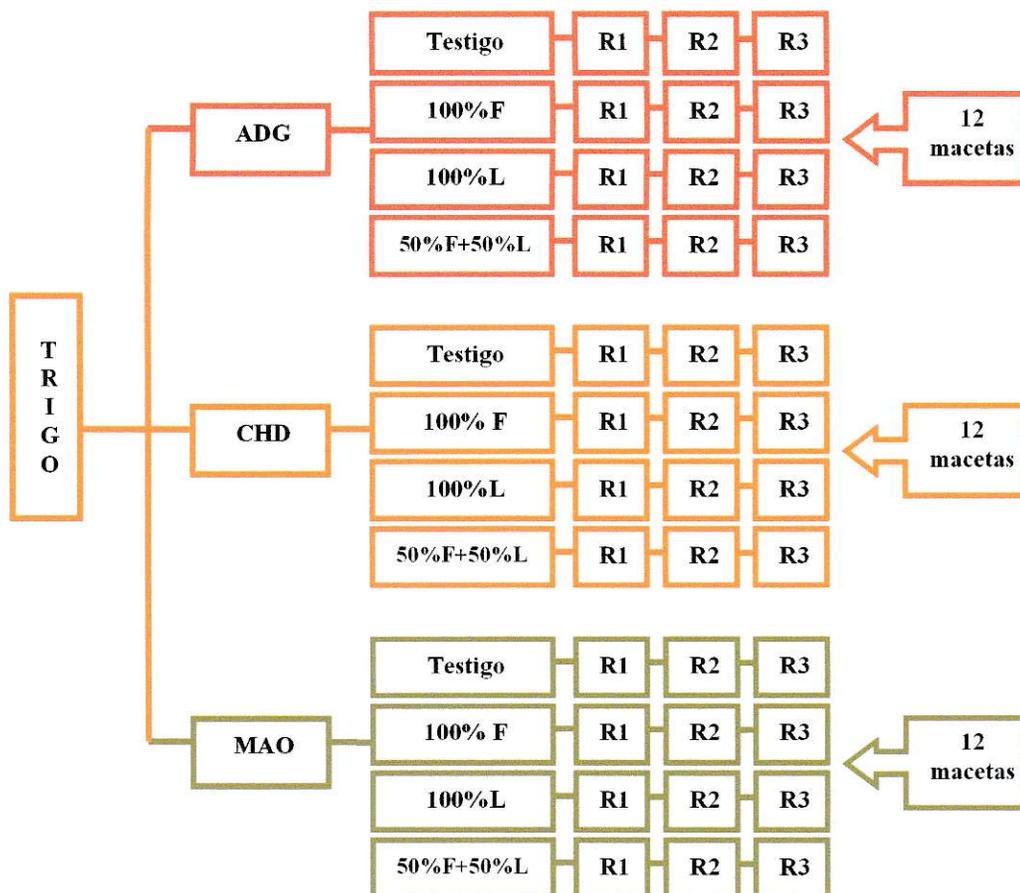
2.2.1. Tratamientos y aplicación de nutrientes, ensayo trigo

Fertilizantes minerales: Como fertilizante mineral, se usó KNO_3 o salitre potásico; como fuente mineral de fósforo, se aplicó SFT (Super Fosfato Triple). Las dosis aplicadas tienen por objeto simular una fertilización nitrogenada de campo de 500 Kg de N/ha, y una fertilización fosfatada de 50 Kg de P/ha.

Tabla 8: Tratamientos empleados en ensayo con suelos representativos

Tratamiento	Aplicación
Testigo	sin aplicación de nutrientes
100%F	1,80 g/maceta KNO_3 100%F (N) y 0,376 g/maceta SFT 100%F (P)
100%L	19,80 glh/maceta 100%L
50%F+50%L	0,90 g/maceta KNO_3 50%F (N) y 0,188 g/maceta SFT 50%F (P) + 9,9 glh/maceta 50%L

Figura 1: Diagrama de distribución de macetas en ensayo 1



2.2.2. Procedimiento ensayo trigo

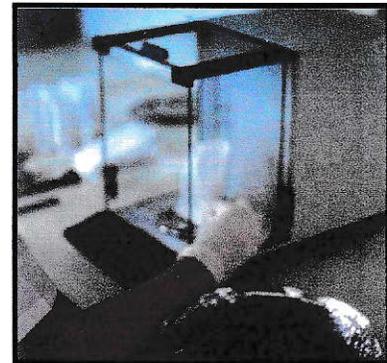
- Rotulado de macetas con tipos de suelos y tratamientos en forma abreviada; presentación de especificación visual dentro del invernadero de las abreviaturas presentes en rótulos.



- Llenado de las 36 macetas, con aproximadamente 5 Kg de cada suelo,



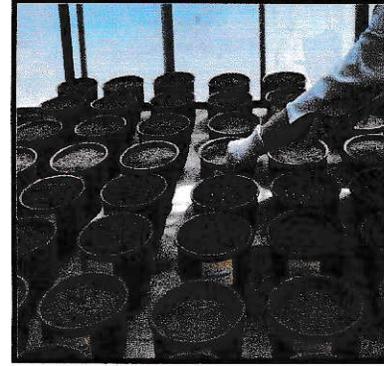
- Determinación de la masa de fertilizantes y lodo, por aplicar,



- Aplicación de fertilizantes y lodo; volteo de maceta sobre polietileno; mezcla con dosis correspondiente de lodo y/o fertilizantes; homogenización manual; traslado a la maceta;



- Sembrado, enterrando 20 – 25 semillas de trigo por maceta, a una profundidad entre 1-3 cm, respectivamente,



- Finalmente, riego con agua potable y cubrimiento con lámina de polietileno, para impedir el secado superficial que perjudica la emergencia de plántulas.



2.2.3. Actividades de mantención ensayo trigo

- *Riego*
- *Sanidad vegetal*
- *Raleo*
- *Otras actividades*

En el riego, al inicio del ensayo, se empezó aplicando 200 mL agua potable/maceta/día, pero debido a las menores temperaturas y a la menor demanda hídrica de las plantas durante la temporada invernal de los cultivos, se bajó a 100 mL/maceta/día; durante la primavera, se retornó a los 200 mL iniciales.

Respecto a la sanidad vegetal, la incidencia de plagas y pestes fue mínima debido a la época del año, por lo que sólo debió recurrirse a tres aplicaciones de fungicida (Bayleton), para el control de oidio en las hojas. En general, el control de las malezas se efectuó manualmente. No hubo ataque de ratones, por lo que se alcanzó una cosecha normal de granos.

Se realizaron dos raleos durante el periodo del ensayo, en el primero se dejó 6 plantas de trigo por maceta (18/Oct/2002) y en el segundo 5 plantas de trigo por maceta (12/Nov/2002).

Se realizaron otras actividades como evitar una excesiva compactación de los suelos y encostramiento de la superficie, esto se hizo mediante rotura manual permanente de la superficie de las macetas. También se aplicó un protocolo de relocalización sistemática de las macetas, a fin de minimizar, idealmente evitar, el efecto de posición, hecho muy frecuente en invernaderos. Ello se tradujo en un movimiento semanal de las macetas.

2.2.4. Cosecha trigo

A principios de Noviembre, se procedió a levantar el ensayo, para lo cual se colectó por separado, raíces, parte aérea vegetativa y espigas. Así también se tomaron muestras del suelo final para ser analizado.

- **Rendimiento:** Para evaluar el rendimiento el material fue envasado en cartuchos de papel, pesado en húmedo, secado en estufa a 60°C por 48 horas hasta peso constante y pesado en seco. Posteriormente, se separó los granos de las espigas y se pesaron por separado.



2.2.5. Obtención de muestras y Análisis en trigo

Seguido del procedimiento realizado para determinar el rendimiento, este material fue ingresado al Laboratorio de Análisis Ambientales, INIA. Debido al alto número de muestras, se debió totalizar algunas muestras por tratamiento y/o repetición, además se seleccionó en algunos casos los tratamientos más representativos. Las muestras analizadas en el laboratorio se resumen en la tabla 9.

Para la determinación de los contenidos totales de ETM's (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn), las muestras fueron preparadas y digeridas según el ETM a analizar y el tipo de matriz, de acuerdo a las figuras 2 y 3. Luego de ser digeridas las muestras se midió su concentración por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA), el equipo utilizado fue un sistema Unicam 929 Solar, equipado para medir por llama, generación de hidruros, generación de vapor, sistema de atrapamiento de átomos y horno de grafito de acuerdo al tipo de metal solicitado. A continuación se señala el sistema utilizado para cada metal:

- As: Digestión ácida y EAA, con generación de hidruros; Límite de cuantificación de As = $0,015 \text{ mg Kg}^{-1}$
- Cd: Digestión ácida y EAA, con uso de STAT (Sistema de Atrapamiento de Átomos); Límite de cuantificación de Cd = $0,25 \text{ mg Kg}^{-1}$
- Cr: Digestión ácida y EAA (Llama Acetileno/Oxido nitroso); Límite de cuantificación de Cr = $3,00 \text{ mg Kg}^{-1}$
- Cu: Digestión ácida y EAA (Llama Aire/Acetileno); Límite de cuantificación de Cu = $2,50 \text{ mg Kg}^{-1}$
- Ni: Digestión ácida y EAA (Llama Aire/Acetileno); Límite de cuantificación de Ni = $3,50 \text{ mg Kg}^{-1}$
- Pb: Digestión ácida y EAA, con uso de STAT (Sistema de Atrapamiento de Átomos); Límite de cuantificación de Pb = $2,50 \text{ mg Kg}^{-1}$
- Zn: Digestión ácida y EAA (Llama Aire/Acetileno); Límite de cuantificación de Zn = $0,50 \text{ mg Kg}^{-1}$

Tabla 9: Muestras obtenidas en ensayo con suelos representativos para los suelos ADG, CHD y MAO

Muestras (parte de la planta)	Suelos (ADG, CHD, MAO)
Granos	Tratamientos Repetición
	Testigo (R1, R2, R3)
	100%F (R1, R2, R3)
	100%L (R1, R2, R3)
	50%F+50%L (R1, R2, R3)
	4 muestras
	3 suelos
	subtotal 12 muestras
PAV	Tratamientos Repetición
	Testigo (R1, R2, R3)
	100%F (R1, R2, R3)
	100%L (R1, R2, R3)
	50%F+50%L (R1, R2, R3)
	4 muestras
	3 suelos
	subtotal 12 muestras
Raíces	Tratamientos Repetición
	Testigo (R1, R2, R3)
	100%F (R1, R2, R3)
	100%L (R1, R2, R3)
	50%F+50%L (R1, R2, R3)
	4 muestras
	3 suelos
	subtotal 12 muestras
Suelo Final	Tratamientos Repetición
	Testigo (R1, R2, R3)
	100%L (R1, R2, R3)
	2 muestras
	3 suelos
	subtotal 6 muestras
Total	42 muestras

Figura 2: Esquema para la determinación de elementos trazas metálicos en lodos, suelos y sedimentos por EAA, Método EPA 3050B
 Digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos (manual técnica llama)

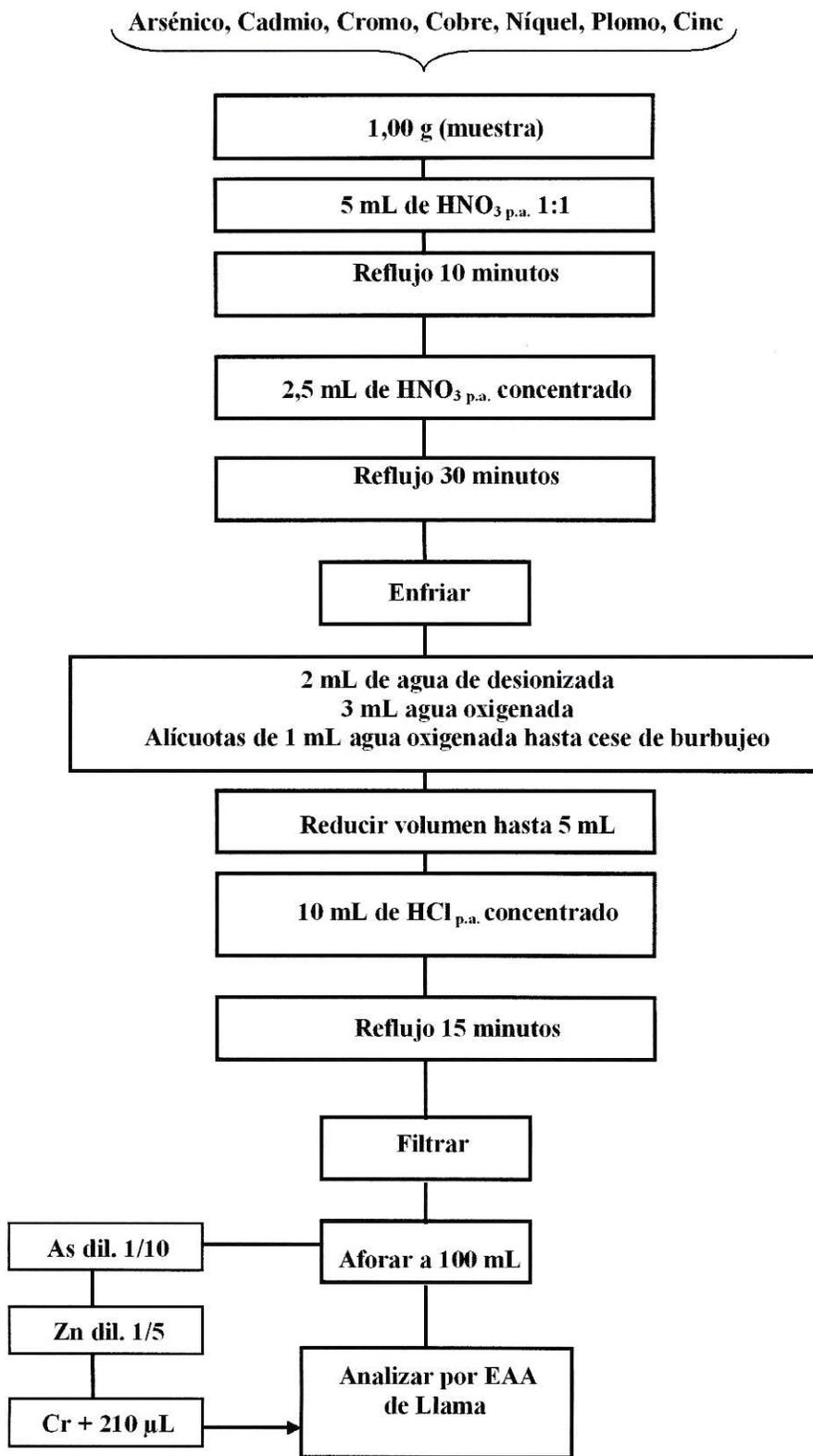
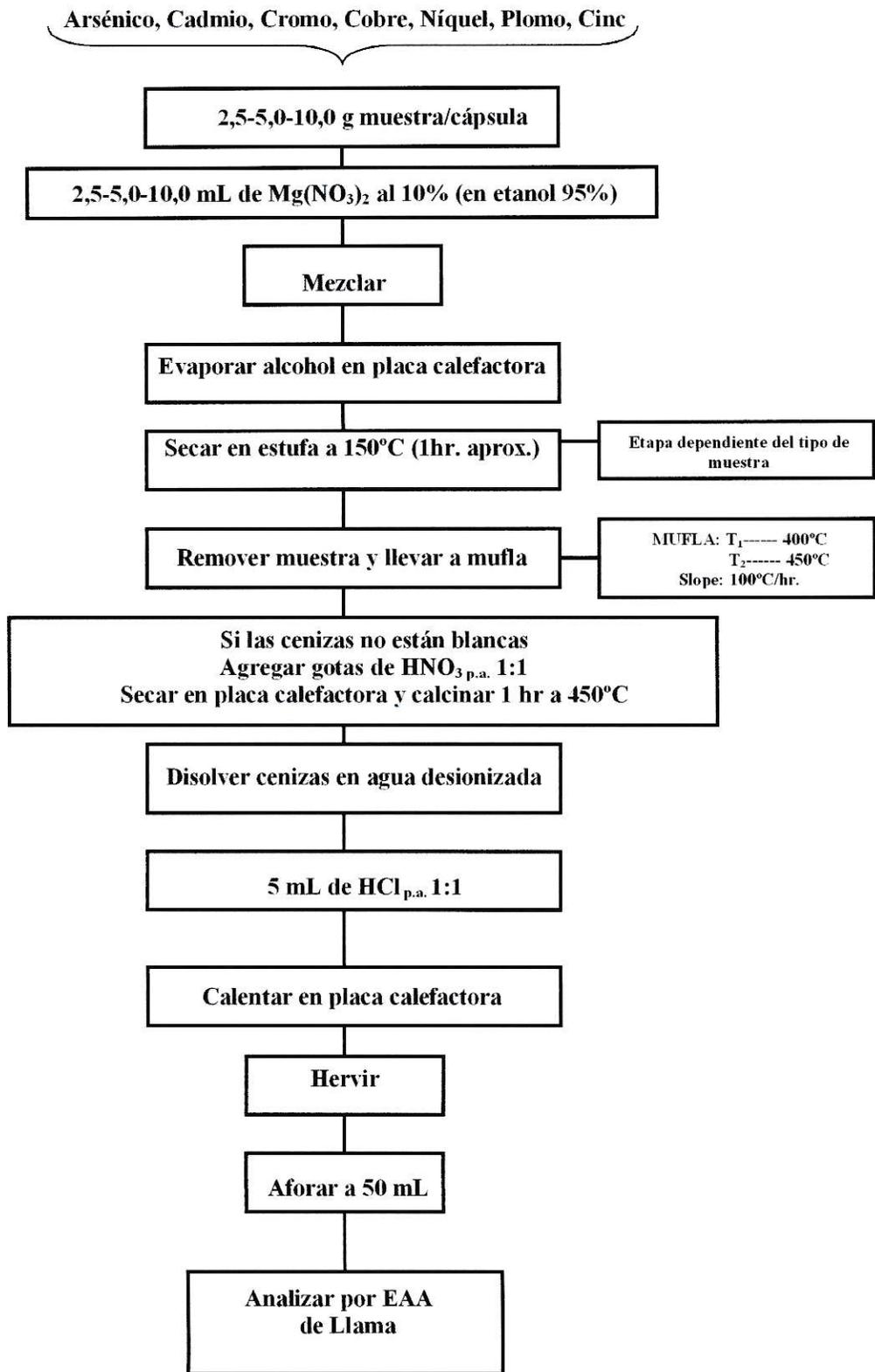


Figura 3: Esquema para la determinación de elementos trazas metálicos volátiles en tejido vegetal por EAA, Método EPA 3052
 Digestión ácida de matrices silíceas y base orgánica (manual técnica llama)



2.3. Ensayo en macetas con dosis crecientes de lodo (Ensayo 2)

El ensayo fue establecido a mediados de Octubre. Se trabajó con el mismo diseño anterior.

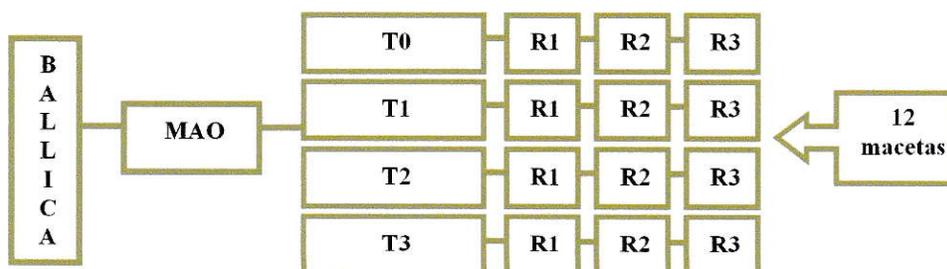
- El ensayo considera 1 especie, 1 suelo, 4 tratamientos y 3 repeticiones, lo que significa 12 macetas en total; debido a que se enfoca a la acumulación de elementos trazas metálicos se utilizó sólo un suelo, el cual fue MAO, correspondiente a uno de los sitios de emplazamiento de los ensayos de campo. La especie incluida es Ballica (*Lolium perenne* Lam.). Los tratamientos, para este ensayo se muestran en la tabla 10. La distribución de macetas para este ensayo se muestra en la figura 4.

2.3.1. Tratamientos y aplicación de nutrientes, ensayo ballica

Tabla 10: Dosis de lodos para cada tratamiento en ensayo de acumulación de ETM's

Tratamiento	Dosis de Lodo
Testigo (T0)	0,00 glh/maceta
T1	3,29 glh/maceta, equivalente a 3 tonls/ha
T2	12,00 glh/maceta, equivalente a 11 tonls/ha
T3	16,40 glh/maceta, equivalente a 15 tonls/ha

Figura 4: Diagrama de distribución de macetas en ensayo 2



2.3.2. Procedimiento ensayo ballica

- Llenado de 12 macetas, con aproximadamente 2,3 Kg. de suelo,

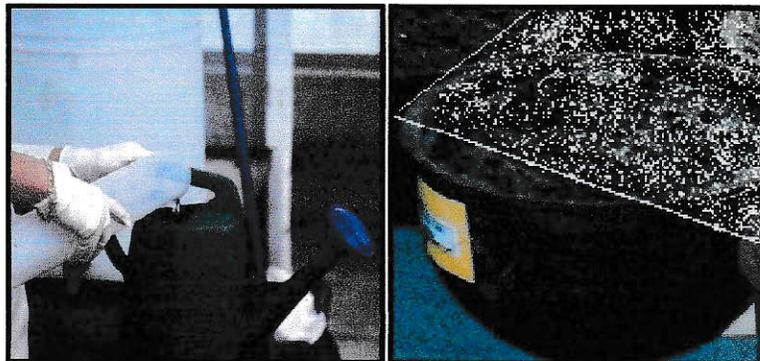


- Determinación de la masa del lodo por aplicar. Aplicación del lodo; volteo de maceta con suelo sobre polietileno; mezcla con dosis correspondiente de lodo, homogeneización manual; y traslado a la maceta (se tomó muestras de este suelo inicial para ser analizado),

- Sembrado, enterrando 30-40 semillas de Ballica, por maceta, a una profundidad de 1-1,5cm;



- Riego de macetas y cubrimiento con lámina de polietileno; impedimento del secado superficial que perjudica la emergencia de plántulas.



2.3.3. Actividades de Mantenimiento ensayo ballica

- *Riego*
- *Sanidad vegetal*
- *Raleo*
- *Otras actividades*

En el riego, al inicio del ensayo, se empezó aplicando bajas dosis de agua, aproximadamente 40 mL agua destilada/maceta/día, pasando a 100 mL luego de la estabilización de las plántulas, pero debido a que las temperaturas desde mediados de noviembre comenzaron a ser mayores, la demanda hídrica de las plantas aumento, por lo tanto se regó con 200 mL agua destilada/maceta/día en los eventos de mayor temperatura ambiental.

Respecto a la sanidad vegetal, no se presentaron plagas ni pestes, por lo que no fue necesaria la aplicación de pesticidas para su control. El control de las malezas se efectuó manualmente. No hubo ataque de ratones.

Para evitar una excesiva compactación de los suelos y encostramiento de la superficie, se realizó el mismo procedimiento que en el ensayo anterior; es decir, fue necesario mantener el mullimiento superficial, mediante rotura manual permanente de la superficie de las macetas.

Al igual que el ensayo anterior fue importante la aplicación de un protocolo de relocalización sistemática de las macetas, a fin de minimizar el efecto de posición. Ello se tradujo en un movimiento semanal de las macetas, siguiendo el protocolo de relocalización. Este protocolo empezó a ser aplicado a fines de Octubre.

2.3.4. Cosecha de ballica

En este ensayo se realizaron tres cortes. A fines Noviembre del 2002, se realizó el primer corte, donde se colectó por separado la parte aérea vegetativa de cada una de las macetas y su respectivo tratamiento. Posteriormente, a fines de Diciembre del mismo año, se realizó el segundo corte siguiendo el mismo procedimiento con el material que en el primer corte. A fines de Enero del 2003 se procedía a realizar el tercer corte, pero el material vegetativo fue insuficiente para ser analizado, ya que luego del segundo corte se produjo una pérdida de consistencia de las plántulas debido a un exceso de riego, o bien, una saturación de agua en el material edáfico; Por esto, fue necesario retirar las raíces para no perder la información de la acumulación de elementos en dicho tejido vegetal, luego se realizó una resiembra para obtener un tercer corte, el cual se realizó a fines de Marzo del 2003, realizando los mismos procedimientos que en los cortes anteriores.

Al levantar el ensayo se retiraron las raíces para ser evaluadas de igual modo que la parte aérea vegetativa de los distintos cortes; así como también, se tomaron muestras del suelo final para ser analizado.

- **Rendimiento:** Para evaluar el rendimiento el material anterior fue envasado en cartuchos de papel, pesado en húmedo, secado en estufa a 60°C por 48 horas hasta peso constante y pesado en seco.

2.3.5. Obtención de muestras y Análisis en ballica

Seguido del procedimiento para determinar el rendimiento todo este material fue ingresado al Laboratorio de Análisis Ambientales, INIA. Debido a que la cantidad de muestras fue elevada, se totalizaron por repetición. Las muestras analizadas para este ensayo se resumen en la tabla 11.

Para la determinación de los contenidos totales de ETM's por EAA, las muestras fueron preparadas y digeridas según el ETM a analizar y el tipo de matriz, de igual modo que el ensayo anterior y el mismo tipo de ETM's analizados, según las figuras 2 y 3.

Para la determinación de los contenidos totales de ETM's (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn), las muestras fueron preparadas y digeridas según el ETM a analizar y el tipo de matriz, de acuerdo a las figuras 2 y 3. Luego de ser digeridas las muestras se midió su concentración por EAA, al igual que el ensayo anterior.

Tabla 11: Muestras obtenidas en ensayo de acumulación de ETM's, suelo MAO

Muestras (parte de la planta y/o residuo)		Suelo (MAO)	
PAV	Primer Corte (C1)	Tratamientos Testigo T1 T2 T3	Repetición (R1, R2, R3) (R1, R2, R3) (R1, R2, R3) (R1, R2, R3)
		<hr/> <i>4 muestras</i> <hr/>	
		<hr/> <i>1 suelo</i> <hr/>	
		subtotal 4 muestras	
PAV	Segundo Corte (C2)	Tratamientos Testigo T1 T2 T3	Repetición (R1, R2, R3) (R1, R2, R3) (R1, R2, R3) (R1, R2, R3)
		<hr/> <i>4 muestras</i> <hr/>	
		<hr/> <i>1 suelo</i> <hr/>	
		subtotal 4 muestras	
PAV	Tercer Corte (C3)	Tratamientos Testigo T1 T2 T3	Repetición (R1, R2, R3) (R1, R2, R3) (R1, R2, R3) (R1, R2, R3)
		<hr/> <i>4 muestras</i> <hr/>	
		<hr/> <i>1 suelo</i> <hr/>	
		subtotal 4 muestras	
Raíces		Tratamientos Testigo T1 T2 T3	Repetición (R1, R2, R3) (R1, R2, R3) (R1, R2, R3) (R1, R2, R3)
		<hr/> <i>4 muestras</i> <hr/>	
		<hr/> <i>1 suelo</i> <hr/>	
		subtotal 4 muestras	
Suelo después de Cosecha		Tratamientos Testigo T1 T2 T3	Repetición (R1, R2, R3) (R1, R2, R3) (R1, R2, R3) (R1, R2, R3)
		<hr/> <i>4 muestras</i> <hr/>	
		<hr/> <i>1 suelo</i> <hr/>	
		subtotal 4 muestras	
Total		20 muestras	

tasa mayor. Si bien el Cu es el segundo elemento más abundante en el lodo, presenta contenidos totales relativamente bajos. En todo caso, ambos son elementos que las plantas los requieren en forma esencial, lo que reduce su efecto en bajas dosis de lodo, pero al aumentar las dosis de lodo aplicadas al suelo, su efecto probablemente será negativo.

El lodo, además de aportar Cu y Zn que son requeridos por las plantas, aporta otros elementos no-esenciales, considerados así puesto que no se han descrito roles fisiológicos esenciales; se trata del As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb y Se; son los elementos que conllevan el mayor riesgo de transformarse en fitotóxicos o desplazarse a través de las cadenas tróficas hasta alcanzar animales o seres humanos, si se cumple el requisito básico de una acumulación progresiva en los suelos, especialmente sensibles a un avance por las cadenas tróficas, se debe pensar especialmente en Cd y Mo por su peligrosidad, pero estos elementos están en bajas concentraciones en el lodo y, además, se trata de elementos cuya presencia en alimentos de consumo humano está regulada, por lo tanto debe ser fiscalizado.

3.1.2. Caracterización general de los suelos utilizados en ensayos

En la tabla 13.1. se presentan las características generales asociadas a la estrata arable (primeros 20 cm de profundidad) de los 3 suelos en estudio, antes del establecimiento del ensayo.

De acuerdo a los valores informados, se puede decir que existen diferencias entre los suelos, dado por los rangos expresados que caracterizan a una serie por sobre otra. El pH para todos los suelos está dentro de los valores normales para las series, a excepción del suelo CHD, el que presenta un valor de acidez mayor que el reconocido oficialmente (Estudio Agrológico del Valle del Maipo. 1986. CNR; Santiago). La serie ADG, presentaría restricciones para el desarrollo de especies vegetales poco tolerantes a las sales, debido a su mayor índice de CE.

En cuanto a la MO, el valor medido para la serie ADG (38,6%), tiene su explicación en el hecho que se trata de un suelo clasificado como Mollisol, el alto contenido de MO explica la capacidad de intercambio catiónico determinada ($50,5 \text{ cmol}^+ \text{ Kg}^{-1}$) y la baja densidad aparente ($0,74 \text{ g cc}^{-1}$). También, ello explica la alta capacidad de retención de humedad aprovechable (60,26%).

La tabla 13.2. presenta los contenidos totales de ETM's de los suelos en estudio. Los rangos de variación de los contenidos de As, Cr, Ni, Pb y Zn, son amplios, pero no entregan evidencias de una posible contaminación antrópica, ya que se encuentran dentro de los rangos más frecuentes informados en la literatura. Los contenidos de Cd se encuentran bajo el LD.

Para el Cu, los contenidos no llegan a valores anómalos o poco frecuentes en los suelos, siendo posible que todos estos contenidos sean naturales (y, por tanto, normales), cada vez que el contenido total excede de 100 mg Kg^{-1} bs se debe sospechar la incidencia de aportes antrópicos; este umbral no fue excedido en los suelos considerados (González, 1994).

En general, de acuerdo a la tabla 3 acerca de los contenidos máximos de metales en suelos antes de una aplicación de lodo, todos los suelos considerados estarían dentro de esta norma, ya que no sobrepasan los límites para ninguno de los elementos ahí mencionados.

Tabla 13.1: Características de las muestras superficiales (0-20cm de profundidad) de suelos incorporados a ensayos en macetas

Valle y Región	Suelo	Origen	pH	CE ds m ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mmol(-)L ⁻¹	Cl ⁻ mmol(-)L ⁻¹	MO %	CIC efectiva cmol(+)/Kg
Mapocho, RM	ADG	aluvial lacustrino	8,15	3,06	12,96	7,66	38,62	50,5
Maipo, RM	CHD	coluvial	5,76	0,66	1,42	8,00	3,45	21,6
Maipo, RM	MAO	aluvial	8,40	1,44	3,21	7,72	2,61	30,3
Valle y Región	Suelo	Origen	Densidad Aparente g cc ⁻¹	Granulometría			Humedad aprovechable %	
				% Arena	% Limo	% Arcilla		
Mapocho, RM	ADG	aluvial lacustrino	1,54	54,72	13,44	31,84	9,36	
Maipo, RM	CHD	coluvial	0,74	42,72	21,44	35,84	60,26	
Maipo, RM	MAO	aluvial	1,62	46,72	19,44	33,84	9,37	

Tabla 13.2: Contenido de ETM's en las muestras superficiales de suelos incorporados a ensayos en macetas

Valle y Región	Suelo	ETM's ¹					
		As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		mg Kg ⁻¹					
Mapocho, RM	ADG	15,61	9,62	59,84	11,81	14,82	84,06
Maipo, RM	CHD	7,40	9,90	63,66	7,92	< 0,60	100,24
Maipo, RM	MAO	13,87	16,10	77,65	16,46	< 0,60	129,53

¹Contenidos totales, en mg Kg⁻¹ de lodo seco a 110°C, medidos en extractos, digestión con HNO₃ p.a. y HCl p.a. conc.; EAA. Cd: < 0,55, Mo: < 0,50 y Hg: < 26 (mg Kg⁻¹)

Resultados de los Ensayos

Todos los resultados que se presentan a continuación son preliminares al estudio del proyecto de lodos de Aguas Andinas S.A.

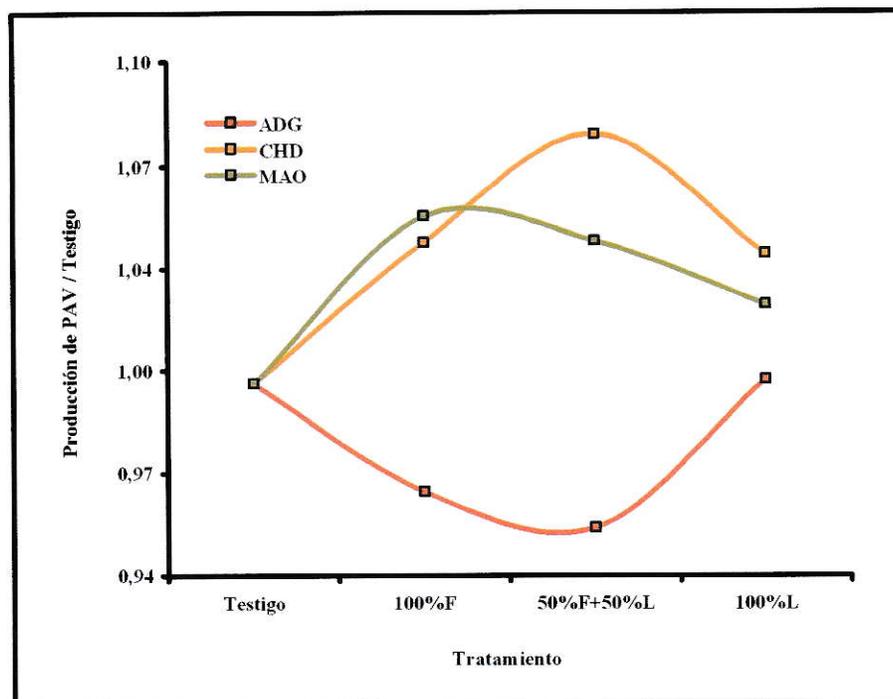
3.2. Resultados Ensayo en macetas con suelos representativos (Ensayo 1)

3.2.1. Rendimiento trigo

El ensayo fue evaluado tanto en función de la producción de granos como de la biomasa aérea vegetativa. No existe asociación entre ambas variables, situación corriente para el trigo cultivado en invernadero, debido a la irregularidad en la producción de granos originada por la dificultad de contar con las condiciones ideales para una adecuada fecundación. Por ello, en estas circunstancias, siendo una variable menos dependiente de las condiciones ambientales externas y más dependiente de la nutrición del suelo, es preferible utilizar la producción de biomasa aérea vegetativa, como indicador de rendimiento.

La figura 5.1. muestra la respuesta de las plantas -como biomasa aérea vegetativa- a los tratamientos en los diferentes suelos. Se observaron diferencias en el crecimiento de las plantas entre suelos, la respuesta vegetal a los tratamientos de fertilización fue relativamente clara, lo que se podría deber a la existencia de una abundancia de nutrientes aportados por la fertilización hecha por los agricultores. No debe olvidarse que todos los suelos fueron muestreados en sitios de agricultura intensiva.

Figura 5.1.: Producción de trigo (PAV), en suelos de la RM, en términos relativos al testigo



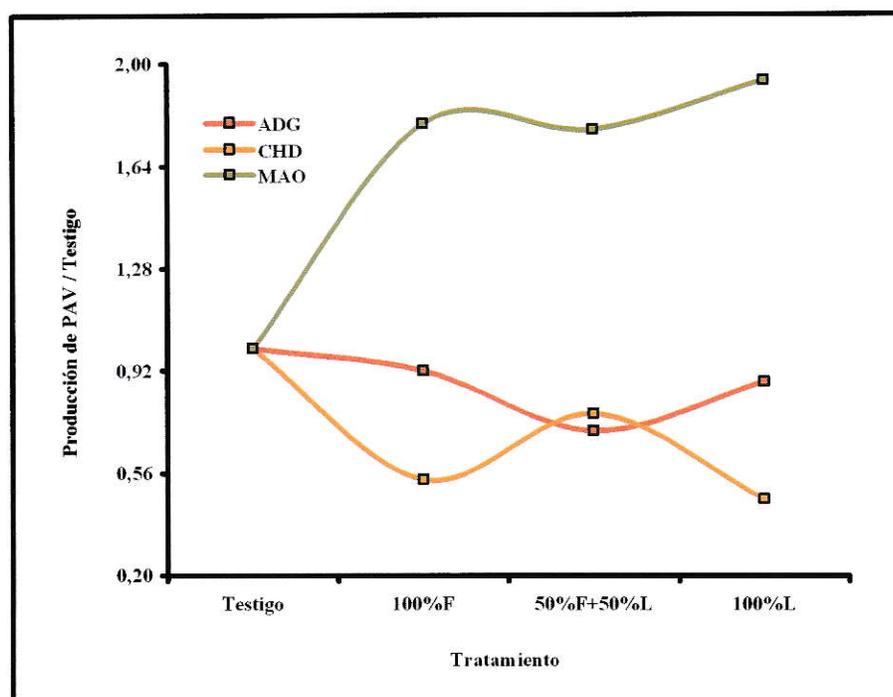
Las figura 5.1. señala una similitud en la respuesta de las plantas de trigo de 2 de los 3 suelos utilizados, el crecimiento de las plantas en los suelos CHD y MAO tendió a subir desde el testigo hacia los tratamientos 100%F y 50%F+50%L, para terminar decayendo hacia el tratamiento 100%L. De esta tendencia, se excluye el suelo ADG, en el cual las plantas se desarrollaron menos en los tratamientos fertilizados con fuentes minerales que en el tratamiento 100%L.

En promedio de los suelos MAO y CHD, excluyendo el suelo ADG, los rendimientos relativos del trigo fueron:

- Testigo, 1,00,
- Tratamiento 100%F, 1,06 (6% más que el testigo),
- Tratamiento 100%L, 1,03 (3% más que el testigo), y
- Tratamiento 50%F+50%L, 1,07 (7% más que el testigo).

Si el rendimiento se mide por la producción de granos, se generan las curvas que se presentan en la figura 5.2. En este caso, es evidente que las curvas de respuesta son menos consistentes entre los suelos y, al mismo tiempo, presentan variaciones más aleatorias entre tratamientos, lo que queda explicado por la insuficiencia de las condiciones para la fecundación de las flores, como se explicó anteriormente.

Figura 5.2.: Producción de trigo (granos) en suelos de la RM, en términos relativos al testigo



Las tablas con los valores de rendimiento en trigo se encuentran en el anexo II.

Contenido de ETM's en trigo

Los resultados obtenidos de los análisis para As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en las partes morfológicas de la planta (Trigo, *Triticum durum*) granos, PAV y raíces, se presentan en las tablas 14, 15, 16 y 17.

3.2.2. Contenido de ETM's en granos, trigo

Se analizaron los granos cosechados de trigo, para todos los tratamientos (Testigo, 100%F, 100%L, 50%F+50%L) en los suelos ADG, CHD y MAO, los resultados se presentan en la tabla 14.

Tabla 14: Contenido de ETM's en granos en los suelos: ADG, CHD y MAO

Suelo	Tratamiento	As	Cd	Cu	Zn
		mg Kg ⁻¹			
ADG	Testigo	0,59	0,25	3,02	43,58
	100%F	0,66	0,26	2,87	49,96
	100%L	0,68	0,31	2,97	61,11
	50%F+50%L	0,71	0,43	3,37	60,59
CHD	Testigo	< 0,015	0,51	6,38	59,50
	100%F	< 0,015	0,81	4,37	89,53
	100%L	< 0,015	0,70	5,38	97,28
	50%F+50%L	< 0,015	0,55	5,57	95,67
MAO	Testigo	0,07	0,48	7,93	45,71
	100%F	0,11	0,56	7,25	71,23
	100%L	0,12	0,57	7,86	71,75
	50%F+50%L	0,20	0,94	8,22	68,03

Los contenidos de ETM's en los granos de trigo del suelo ADG, en general fueron bajos, estos niveles se ven reflejados en los parámetros de este suelo, los que difieren de los suelos restantes destacando el básico pH y, principalmente, el alto % de MO y, consecuentemente, la alta CIC, los cuales pueden estar demostrando que los metales en este suelo no tienden a estar biodisponibles, debido a que a pH's bajos o ácidos los metales tienden a estar más biodisponibles y en este caso tenemos un suelo

relativamente básico, donde encontramos biodisponibles metales como As, Cr, Mo y Se (<http://edafologia.ugr.es/index.htm>), lo cual se ratifica en los contenidos de As encontrados en este suelo a diferencia de los suelos CHD y MAO. En cuanto a la alta CIC, función del alto % de MO, ratifica que este suelo tiene una gran capacidad de fijar metales y el % de MO indica la formación de complejos de cambio y quelatos no bioasimilables a este pH, por sobre todo el Cu, ya que la MO lo retiene fuertemente (<http://edafologia.ugr.es/index.htm>), lo cual se puede ver reflejado en los bajos contenidos de Cu encontrados en los granos del suelo ADG para todos los tratamientos; así también se puede atribuir a los contenidos encontrados de Cd y Zn, para este suelo.

El suelo CHD presenta en los granos de trigo, contenidos de ETM's mayores que los encontrados en los granos del suelo ADG, lo cual se puede deber principalmente a que los parámetros para este suelo favorecen la asimilabilidad de los metales por las plantas llegando así a formar parte de los granos, ya que este suelo es el más ácido en contraste a los demás suelos, así a un pH de 5,76 la movilidad de los metales es mayor a excepción del As, lo que explica que se encuentre por debajo del LD; en cuanto a la CIC ésta es relativamente baja lo que acentúa lo establecido por los otros parámetros, y la MO es de tan sólo un 3,45% lo que disminuye la formación de quelatos fuertemente enlazados y otros complejos estables que no pueden ser bioasimilados.

Los granos de trigo en el suelo MAO presentan niveles muy bajos de As, niveles mayores para Cu y valores para Cd y Zn relativamente similares respecto a los obtenidos para los granos de trigo en los suelos ADG y CHD, por una parte, esto se puede deber a que en este suelo los parámetros antes mencionados no difieren en forma significativa del suelo CHD a excepción del pH que es mayor lo que responde a la presencia de As, no así en el suelo CHD.

En cuanto a la respuesta a los diferentes tratamientos, para todos los suelos se presenta una tendencia, aunque leve, en la siguiente secuencia: Testigo < 100%F < 100%L < 50%F+50%L, esto se puede deber a que los fertilizantes utilizados,

principalmente SFT, presentan concentraciones de metales pesados no despreciables (tabla 6), lo cual se manifiesta en los resultados para los tratamientos 100%F y 50%F+50%L, en este último se puede decir que probablemente hay un efecto de sinergia de los metales presentes en el lodo a formas más bioasimilables, debido al aporte de los elementos presentes en el fertilizante; esto se puede exceptuar para la respuesta del Zn frente a los tratamientos, ya que es el único que presenta sus mayores concentraciones en el tratamiento 100%L, indicando que el lodo es el principal responsable de la presencia de Zn en los tejidos vegetales y, además, debe presentarse en formas asimilables una vez aplicado al suelo. Otra singularidad se presenta en el Cu, donde el valor del testigo es mayor respecto a los tratamientos restantes, esta respuesta algo anómala se puede deber a que las especies vegetales responden frente a situaciones límites, aunque poco frecuentes, donde la especie al encontrarse deficiente de un determinado nutriente, en un espacio confinado como lo es la maceta, tiende a asimilar otros en razón de suplir dicha carencia, debido a la falta de fertilización, no así en los espacios de campo donde la planta puede asimilar los nutrientes desde otros lugares.

En general, para todos los suelos, los mayores niveles de ETM's se presentaron en el suelo MAO, a excepción del As y el Zn, el As es mayor en el suelo ADG, debido probablemente a que presenta un mayor % de MO y una mayor CIC que MAO, y el Zn se presentó mayor en CHD, debido a que este suelo tiene un pH relativamente ácido donde los metales presentan mayor biodisponibilidad. Los ETM's que se encontraron por debajo del LD fueron: Cr < 3,0 mg Kg⁻¹; Ni < 3,5 mg Kg⁻¹; Pb < 2,5 mg Kg⁻¹, esto se puede deber principalmente a que estos no se encuentran bioasimilables, además, están en bajas concentraciones en el suelo sin tratar y lo aportado por el lodo, queda retenido en la fracción residual sin ser bioasimilado y/o se presentan en cantidades insuficientes para ser detectadas..

3.2.3. Contenido de ETM's en PAV, trigo

Se analizó la PAV para todos los tratamientos (Testigo, 100%F, 100%L, 50%F+50%L) en los suelos ADG, CHD y MAO, los resultados se presentan en la tabla 15.

Tabla 15: Contenido de ETM's en PAV en los suelos: ADG, CHD y MAO

Suelo	Tratamiento	As	Cd	Cu	Zn
		mg Kg ⁻¹			
ADG	Testigo	1,76	< 0,25	1,97	24,38
	100%F	2,18	< 0,25	2,37	25,44
	100%L	2,37	< 0,25	3,22	41,59
	50%F+50%L	2,99	< 0,25	3,74	39,21
CHD	Testigo	0,15	0,30	1,52	25,96
	100%F	0,18	0,83	4,52	27,81
	100%L	0,17	0,54	2,32	39,75
	50%F+50%L	0,19	0,51	3,82	39,73
MAO	Testigo	0,49	0,25	2,32	15,37
	100%F	0,61	0,68	4,75	41,34
	100%L	0,51	0,43	4,62	46,63
	50%F+50%L	0,53	0,84	4,97	36,03

La presencia en mayor o menor concentración de los ETM's en la PAV, debida a las diferencias entre los parámetros de los suelos, se mantiene en relación a lo encontrado en los granos.

Los niveles de Cu y Zn encontrados en la PAV, para todos los suelos, son menores que los encontrados en los granos, esto se debe probablemente a que al ser esenciales para el crecimiento de las plantas pueden llegar a formar parte del fruto de la planta en una proporción mayor, probablemente a través del flujo hídrico y enzimático de las plantas. Para los ETM's que no son esenciales para el crecimiento vegetal encontramos una respuesta diferente, las concentraciones de Cd en la PAV se mantienen relativamente similares a las presentes en los granos, a excepción de lo encontrado en el suelo ADG, donde el Cd está por debajo del LD en contraste con los

encontrados en los granos, aunque no están muy por encima de $0,25 \text{ mg Kg}^{-1}$ en éstos últimos; en cambio las concentraciones de As en la PAV son mayores que en los granos, esto se puede adjudicar al hecho de que es un elemento no esencial para las plantas, por lo tanto al no requerirlo se va a presentar en bajas concentraciones, por sobre todo en los frutos.

En cuanto a la respuesta a los diferentes tratamientos, es irregular con respecto a la tendencia encontrada en los granos, donde las mayores concentraciones para As, Cd y Cu estaban en el tratamiento 50%F+50%L, en cambio en la PAV se presentan en el tratamiento 100%F, en particular en el suelo CHD, en MAO hay fluctuaciones entre los tratamientos 50%F+50%L y 100%F y en ADG se mantiene la tendencia encontrada en los granos. Para el Zn se mantiene la mayor concentración en el tratamiento 100%L.

En general, en la PAV los mayores niveles de ETM's se presentaron en el suelo MAO, a excepción del As que es mayor en el suelo ADG.

Los ETM's que se encontraron por debajo del LD fueron: Cr < 3,0 ppm; Ni < 3,5 ppm; Pb < 2,5 ppm, al igual que en los granos, esto se debe principalmente a que estos no se encuentran bioasimilables, o bien, se presentan en cantidades insuficientes para ser detectadas.

3.2.4. Contenido de ETM's en raíces, trigo

Se analizaron las raíces para todos los tratamientos (Testigo, 100%F, 100%L, 50%F+50%L) en los suelos ADG, CHD y MAO, los resultados se presentan en la tabla 16.

Tabla 16: Contenido de ETM's en raíces en los suelos: ADG, CHD y MAO

Suelo	Tratamiento	As	Cd	Cu	Zn
		mg Kg ⁻¹			
ADG	Testigo	2,43	3,51	16,29	37,02
	100%F	3,09	5,32	23,01	34,94
	100%L	5,35	12,55	28,95	74,30
	50%F+50%L	4,81	6,30	17,83	64,85
CHD	Testigo	1,21	3,15	16,55	26,52
	100%F	1,55	4,26	15,51	29,15
	100%L	2,15	4,56	14,74	34,41
	50%F+50%L	2,02	4,37	15,51	30,72
MAO	Testigo	1,71	2,85	64,71	27,05
	100%F	4,84	3,95	43,71	33,36
	100%L	5,47	5,85	42,67	58,58
	50%F+50%L	4,43	4,84	24,05	45,33

Las concentraciones de ETM's encontradas en la raíces en los suelos fueron altas en contraste con las encontradas en la PAV y en los granos, esto se debe probablemente a que la raíces están en contacto directo con el suelo por lo que se presentará una mayor proporción de ETM's; es decir, los iones se acumulan en la raíz a través de un gradiente considerable. El Zn es la excepción, en todos los suelos, ya que su concentración está por debajo de la concentración encontrada en los granos (excepto el suelo ADG, en los tratamientos 100%L y 50%F+50%L, donde es mayor la concentración de Zn en las raíces que en los granos) esto se puede deber a la alta concentración de Zn en el lodo y, además, a que el Zn al ser un micronutriente esencial va a seguir en el flujo dentro de la planta hasta partes donde se necesite su

participación, así también el Cu es un micronutriente esencial, pero se concentra principalmente en la raíz, esto se debe a que es absorbido en bajas cantidades.

En relación a la respuesta a los diferentes tratamientos se puede observar una clara respuesta al tratamiento 100%L, lo que puede indicar que el efecto del lodo en las diferentes partes de la planta es diferenciado, siendo mayor en las raíces. La excepción en este caso es el Cu en los suelos CHD y MAO, ya que se repite la anomalía encontrada anteriormente respecto a la concentración más elevada en el testigo.

En general, las mayores concentraciones de ETM's encontradas en la raíces se presentaron en el suelo MAO, comparado con las concentraciones en las series restantes, a excepción del Cd y el Zn que son mayores en el suelo ADG, esto se puede deber a que MAO es el más básico dentro de todas las series, la mayor parte de los ETM's quedará en las raíces, provocado por el alto pH que desfavorece la bioasimilación hacia otras partes de la planta.

Los ETM's que se encontraron por debajo del LD en las raíces fueron: Cr < 3,0 ppm; Ni < 3,5 ppm; Pb < 2,5 ppm, al igual que en los granos y en la PAV.

3.2.5. Contenido de ETM's en suelo después de cosecha, trigo

En la tabla 17 se muestran los resultados obtenidos respecto a los contenidos de ETM's (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) presentes en los diferentes suelos, después de cosecha.

Tabla 17: Contenido de ETM's, después de cosecha en los suelos: ADG, CHD y MAO

Suelo	Tratamiento	As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		mg Kg ⁻¹					
ADG	Testigo	59,67	12,19	48,86	6,97	10,39	77,10
	100%L	62,13	13,26	52,00	7,54	10,42	91,82
CHD	Testigo	17,07	14,08	56,72	9,09	8,08	82,60
	100%L	17,66	14,38	59,16	9,23	8,46	86,62
MAO	Testigo	27,43	13,01	59,23	13,11	21,71	113,41
	100%L	27,71	13,88	65,61	13,38	22,17	121,12

Como ya se mencionó, la serie ADG representa una de las más básicas, junto con la serie MAO, otras características importantes son: su elevada CE, su alto %MO, su elevada CIC, todas estas características en conjunto, unas relacionadas con otras, hacen de este suelo un potencial para entregar ETM's no esenciales para el desarrollo de las plantas, esto se observa en el contenido de ETM's que quedaron en el suelo después de cosecha y, además, en la suma total de lo bioasimilado en las diferentes partes de la planta, donde es mayor la concentración de As y Cd en comparación con las concentraciones encontradas en los suelos CHD y MAO, en cambio las concentraciones totales de Cu y Zn bioasimiladas son menores.

Las concentraciones de ETM's presentes en el suelo CHD después de cosecha se encontraron bajas, aunque son levemente mayores que en ADG y levemente menores que en MAO, es decir, puede ser que éste es un suelo que presenta en general características físicas y químicas apropiadas para la aplicación de lodos en cantidades aceptadas por la norma, ya que genera condiciones en que los aportes de ETM's a las plantas son bajos, cediendo en mayor parte metales que son esenciales para el crecimiento de las plantas, ya que lo bioasimilado en el total de la planta es mayor

para el Zn, dentro de los rangos requeridos y el Cu es relativamente similar a las series restantes; y cede en menor parte aquellos que pueden presentar problemas de toxicidad, como lo es el As y el Cd, ya que el contenido total bioasimilado es el menor dentro de las tres series. Todo esto se puede deber al bajo pH que presenta este suelo, favoreciendo la asimilación de elementos necesarios. Esto se puede apreciar, además, en el rendimiento relativo, ya que fue mayor en este suelo.

MAO, es uno de los suelos más básicos, la cual es su principal característica, lo que se ve reflejado probablemente en los contenidos de ETM's que presenta después de cosecha, ya que son los mayores en comparación con los suelos ADG y MAO, pero aunque los contenidos son mayores en el suelo después de cosecha no implica que la bioasimilación fue baja. El contenido total bioasimilado de los diferentes elementos es mayor que en el suelo CHD, exceptuando el Zn, además el Cu fue bastante mayor su contenido en el total de la planta que en los otros suelos.

Con respecto a la respuesta de todos los suelos frente a cada tratamiento, se observa siempre que el tratamiento 100%L es mayor para todos los ETM's, aunque las diferencias con respecto al testigo son bajas.

Por otro lado, se observa que en las diferentes partes de la planta los ETM's: Cr, Ni y Pb se encuentran por debajo del LD, pero en el suelo después de cosecha si están presentes, esto se puede deber a que éstos se encuentran en formas químicas no bioasimilables. Así también, puede haber sucedido que lo aportado por el lodo queda retenido fuertemente casi en su totalidad.

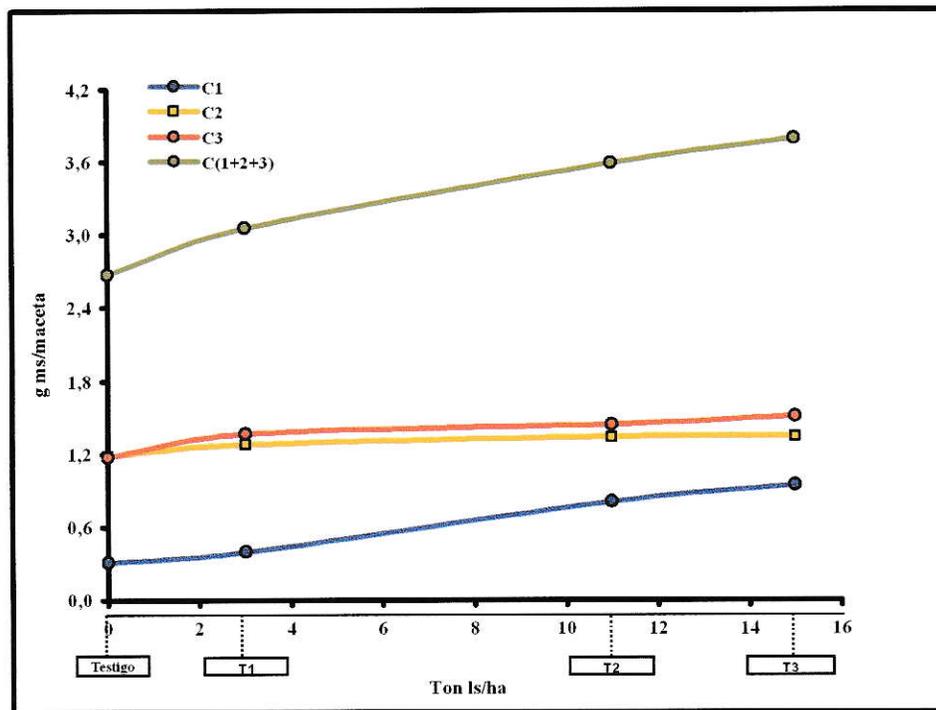
En general, para todos los suelos que se analizaron después de cosecha, el único ETM que se encontró por debajo del LD fue el Cd ($<0,25 \text{ mg Kg}^{-1}$), al igual que en el suelo sin tratar, por lo tanto lo que se presenta en las partes de la planta se debe solamente al lodo, el cual es bajo, por tanto, después de cosecha el contenido, prácticamente, se ha bioasimilado completamente.

3.3. Resultados Ensayo en macetas con dosis crecientes de lodo (Ensayo 2)

3.3.1. Rendimiento ballica

El rendimiento de materia seca se presenta en la figura 6 como peso promedio de tres repeticiones a través de los tres cortes en el suelo que ha recibido los diferentes tratamientos.

Figura 6: Curvas de biomasa aérea de ballica



Se observa que en el primer corte (C1) la producción aumentó con la cantidad de lodo añadida, mientras que en el segundo corte (C2) y tercer corte (C3) no ocurre lo mismo, ya que se produce un leve aumento desde el testigo a T1 y, luego, se mantiene prácticamente constante hacia los tratamientos T2 y T3. En cambio, en la curva que representa la suma de los rendimientos de materia seca para los tres cortes se observa claramente un aumento proporcional al aumento en las dosis de lodo en los tratamientos, esto resultados obtenidos respecto a las diferencias de producción de materia vegetativa en los diferentes tratamiento coinciden con los datos de diversos

autores (Eivazi F., 1990) que indican mayor y mejor desarrollo de cultivos en suelos tratados con lodos residuales siempre que estos no contengan excesos de metales pesados que puedan causar toxicidad.

Las tablas con los valores de rendimiento en Ballica, se encuentran en el anexo II.

Contenido de ETM's en ballica

Los resultados obtenidos de los análisis de As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en las partes morfológicas de la planta (Ballica, *Lolium Perenne*), para los tres cortes y raíces, se presentan en las tablas 18 y 19.

3.3.2. Contenido de ETM's en cortes (C1, C2 y C3), ballica

Tabla 18: Contenido de ETM's en cortes, ballica

Muestra	Tratamiento	As	Cu	Zn
		mg Kg ⁻¹		
C1	Testigo (T0)	1,79	15,37	85,50
	T1	1,86	17,29	79,87
	T2	1,90	17,62	71,71
	T3	2,23	17,80	77,73
C2	Testigo (T0)	0,54	9,32	64,83
	T1	0,73	9,41	72,32
	T2	0,89	11,10	76,96
	T3	0,62	10,35	64,78
C3	Testigo (T0)	1,08	13,23	58,68
	T1	1,84	16,23	59,68
	T2	2,19	16,24	60,21
	T3	2,54	17,23	59,17

En este ensayo el objetivo principal fue observar el efecto de las dosis crecientes de lodo en las partes de la ballica a los diferentes tratamientos, por lo que es importante recordar y resaltar las características tanto físicas como químicas más

importantes de la serie MAO con el fin de relacionarlas con los resultados. La característica más importante de este suelo es que presenta un alto pH y una CIC relativamente alta, lo cual se puede observar en las concentraciones presentes en el primer corte, ya que son relativamente bajas, a pesar que el Cu presenta una cierta particularidad en este suelo, como ya lo habíamos mencionado para el ensayo anterior, donde este suelo puede ser que lo mantenga más soluble; el As, como es de esperar en suelos básicos, es mayor su bioasimilación, lo cual lo podemos ver en la concentración encontrada en el primer corte que no es despreciable.

Las concentraciones de ETM's presentes en la PAV de la ballica en C2, son menores que las encontradas en C1, esto se puede deber a que la planta en el primer corte ya había tomado la mayor parte del metal que se encontraba biodisponible y las formas químicas que van quedando del metal son menos asimilables. También se debe mencionar que los contenidos de As y Cu en C2 disminuyeron prácticamente a la mitad. Las concentraciones de ETM's encontradas en el tercer corte, son mayores que las encontradas en el segundo corte, pero menores que las del primer corte, esto se debe a que el tercer corte representa una resiembra, como ya se había mencionado en materiales y métodos, donde se explica que luego del segundo corte se produjo una pérdida de consistencia de las plántulas debido a un exceso de riego, o bien, una saturación de agua en el material edáfico, por lo que el material vegetativo fue insuficiente para ser analizado y tomarlo como un corte, por esto, fue necesario realizar una resiembra para obtener un tercer corte. Esto podría explicar el mayor contenido de ETM's en el tercer corte que en el segundo, debido a que la planta asimila más elementos para su crecimiento, como ocurre también en el primer corte, pero ya en el tercer corte el contenido de ETM's en la solución del suelo es menor, es decir es menor el contenido de ETM's que se encuentran solubles para ser asimilados por la planta.

Respecto a los diferentes tratamientos, se observa una respuesta clara al efecto de las diferentes dosis de lodo en los contenidos de As y Cu, aunque menos acentuada para este último, donde se observa que las diferencias entre tratamientos con aplicación de lodo y el testigo, no superan el 10% y, además, entre ellos es muy bajo.

En C2, se presenta una respuesta anómala en T3, ya que su concentración es menor que en los tratamientos con menor dosis de lodo.

En el Zn, la respuesta frente a los tratamientos es heterogénea, esto se puede deber a que al ser un micronutriente esencial la planta tiende a disminuir su consumo al aumentar la disponibilidad para que de alguna forma no se produzca un consumo excesivo, u otra razón podría ser que al aumentar el contenido de Zn en el suelo se produce una mayor competencia por los sitios de intercambio y éste se torna menos disponible para la planta.

En general en todos los cortes, los restantes ETM's se encontraron por debajo del LD: Cd < 0,25 mg Kg⁻¹; Cr < 3,0 mg Kg⁻¹; Ni < 3, mg Kg⁻¹; Pb < 2,5 mg Kg⁻¹, esto se puede deber a que estos no se encuentran bioasimilables y, además, están en bajas concentraciones en el suelo MAO sin tratar y/o se presentan en cantidades insuficientes para ser detectadas.

3.3.3. Contenido de ETM's en raíces, ballica

Tabla 19: Contenido de ETM's en raíces, ballica

Tratamiento	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
	mg Kg ⁻¹					
Testigo (T0)	10,33	1,78	5,40	85,20	14,18	195,85
T1	10,42	1,84	6,00	74,65	15,51	182,19
T2	13,03	2,14	6,44	76,20	15,76	187,29
T3	14,36	2,24	6,36	88,56	16,76	198,18

Las concentraciones de ETM's encontradas en la raíces en el suelo MAO fueron bastante mayores a las encontradas en los cortes, esto se puede deber a que este suelo presenta una basicidad alta, por lo que la mayor parte de los ETM's queda en las raíces debido al contacto directo con el suelo y, además, los ETM's se encuentran en menor concentración en la solución del suelo y la bioasimilación hacia otras partes de la planta se ve inhibida.

En relación a la respuesta a los diferentes tratamientos en las raíces, se observa una respuesta bastante regular frente a las dosis de lodo para cada elemento, aunque las diferencias son bastante bajas. En el Cu y el Zn se observa una anomalía con respecto a la concentración en el testigo, pero se debe considerar que estos elementos son esenciales por lo que debe ocurrir una respuesta de sobre asimilación por parte de la planta debido a la necesidad de fertilización.

El ETM que se encontró por debajo del LD en las raíces fue sólo el Ni que es menor a $3,5 \text{ mg Kg}^{-1}$.

3.3.4. Contenido de ETM's en suelo después de cosecha, ballica

En la tabla 20 se muestran los resultados obtenidos respecto a los contenidos de ETM's (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) en el suelo MAO, después de cosecha.

Tabla 20: Contenido de ETM's en el suelo MAO, después de cosecha, ballica

Tratamiento	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	mg Kg ⁻¹						
Testigo (T0)	28,57	0,35	17,84	70,21	15,28	21,02	119,89
T1	28,62	0,36	18,12	71,79	15,37	22,46	126,25
T2	31,36	0,38	18,74	73,83	15,81	22,78	133,35
T3	31,61	0,38	19,11	73,98	15,81	22,88	136,69

Las concentraciones de ETM's en la serie MAO después de cosecha son considerables, lo que se puede deber fundamentalmente al pH.

Con respecto a la respuesta a las diferentes dosis de lodo para todos los ETM's fue muy clara y regular, aunque las diferencias entre tratamientos son bajas, principalmente para el Cu, Ni y Pb que no superan un 5% los tratamientos con dosis de lodo con respecto al testigo, mientras que en los otros ETM's se alcanza hasta un 15% aprox. en algunos tratamientos con respecto al testigo, pero se observa en todos

los casos el efecto del lodo, siendo mayor principalmente en el tercer tratamiento, que representa la aplicación de mayor dosis de lodo. También se observa que los contenidos de Cd, Cr, Ni y Pb son bastante bajos y muy cercanos a los presentes en el suelo sin tratar, esto se corrobora en que en los tres cortes estos ETM's se encuentran por debajo del LD. La única excepción se presenta en el Cd, porque su concentración en el suelo sin tratar está por debajo del LD, por lo que se presenta en las raíces y en el suelo después de cosecha, se puede deber solamente al lodo, en el cual, además, es bajo.

- La adición de lodos incrementó levemente los contenidos de ETM's en las fracciones totales de los suelos después de cosecha, no alcanzándose niveles tóxicos en ninguna de las dosis, adjudicándose la mayor parte de estos ETM's a la presente en los suelos sin tratar. El contenido total de ETM's en los suelos, no se vio disminuido por la incorporación de los diferentes cultivos, debido a que la bioasimilación por parte de éstos es despreciable frente al total de ETM's contenidos en la maceta.
- Dentro de los suelos utilizados en los ensayos, el suelo CHD, presenta los contenidos más bajos de ETM's en las partes de la planta, por separado y en el total de ésta, especialmente aquellos ETM's que no son esenciales.
- En todos los casos y en ambos ensayos, los contenidos de ETM's en la planta, se encuentran dentro del rango normal.
- Por otro lado, los contenidos de ETM's en el lodo utilizado en los ensayos, se encuentran por debajo del límite de la norma chilena, lo que indica que su aplicación es factible.
- Los resultados obtenidos, constituyen un aporte importante dentro de algunos de los requerimientos para la integración de estos residuos en el marco de una agricultura sostenible, siendo una fuente alternativa de materia orgánica y nutrientes para los suelos, que van a contribuir en la mejora de sus propiedades, y por consiguiente, de su calidad. Sin embargo, la escasa incorporación de ETM's en las especies cultivadas tendrá como consecuencia una acumulación de metales en los suelos por la adición de lodos y fertilizantes.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguas Andinas, 2003. Plan de Saneamiento de la Planta El Trebal y La Farfana. En línea, Pág. Web: http://www.aguasandinas.cl/minisitio_andina/trebal.htm
- Aguilar, J., 2000. El desastre ecológico de Aznalcóllar. En línea, Pág. Web: <http://edafologia.ugr.es/donana/aznal.htm>
- Alloway, B.J., 1995. Soil processes and the behaviour of metals. Heavy metals in soils. 2nd ed., Blackie Academic and Professional, U.K. pp. 11-35.
- Andrade, M^a., Marcet, P., Reyzábal, M^a. y Montero, M^a., 2000. Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos. Rev. Edafología. 7: 21-30.
- Aruani, M., 1999. Disponibilidad de micronutrientes en suelos del alto valle de río negro, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Comahue.
- Becerra, J.P., 2003. Experiencia mundial sobre la gestión en agricultura de lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas servidas y evaluación de fototoxicidad de lodos generados en la Región Metropolitana (Chile), mediante pruebas de germinación, Seminario de Título Químico Ambiental, Universidad de Chile.
- Bontoux, L., Vega, M. y Papameletiou, D., 1996. Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas en Europa: El problema de los lodos. IPTS. En línea, Pág. Web: <http://www.jrc.es/iptsreport/vol23/spanish/ENV2S236.html>.
- Bradford, G.R., Bair, F.L. and Hunsaker, V., 1968. Trace and major element content of 170 High Sierra Lakes in California. *Limnology and Oceanography*. 13: 526-530.
- Cogger C., Bary A., Fransen S. and Sullivan D., 2001. Seven years of biosolids versus inorganic nitrogen applications to tall fescue technical report waste management. *Journal Environmental Quality*. 30: 2188-2194.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), 2001. Proyecto Definitivo de Reglamento sobre Manejo de Lodos no Peligrosos. Borrador Versión 6, República de Chile.
- Consejo de las Comunidades Europeas (CEE), 1986. Directiva del Consejo 86/278/CEE del 12 de Junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en la agricultura.

- Diario oficial de las comunidades europeas. En línea, Pág. Web: <http://www.drago.icia.rcanaria.es/indice.html>.
- Consejo de las Comunidades Europeas (CEE), 1991. Directiva del Consejo 91/271/CEE de 21 de Mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Diario oficial de las comunidades europeas. En línea, Pág. Web: <http://www.drago.icia.rcanaria.es/indice.html>.
 - CWMI, Cornell Waste Management Institute, 1996. The beneficial uses of biosolids/sludge. Fact Sheet. En línea, Pág. Web: <http://cwmi.css.cornell.edu/Sludge/Production.pdf>.
 - Chicón L., 2002. Especiación de metales pesados en lodos de aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos digeridos como mejoradores de suelos. Trabajo de investigación del Programa de Doctorado en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Málaga.
 - Eivazi, F., 1990. Nitrogen fixation of soyben and alfalfa on sewage sludge amended soils, *Agic Ecosystems Environmental*. **30**: 1239-136.
 - González, 1994. Perfil Ambiental de Chile, Capitulo 11. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), Secretaría Técnica, Santiago.
 - Gómez I., Moral R., Navarro J., Pedreño, F. y García-Orenes, J., 1994. Efecto fertilizante NPK de un lodo de depuradora. División de Agroquímica, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante. Prácticas ecológicas para una agricultura de calidad. I Congreso de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica. Toledo, Septiembre.
 - INIA, 2001. Proyecto INIA, Aguas Andinas. Valorización agrícola de los lodos provenientes de plantas de tratamientos de aguas servidas, como fertilizante.
 - López J., Navarro M. y González S., 2000. Tratamiento de Descontaminación de materia orgánica residual: límites alcanzados en metales pesados. *Rev. Edafología*. **7**: 151-157.
 - Muse J.K., 1991. Land application of sludge. Environmental Education Series Environmental Quality Agriculture & Natural Resources.
 - Obbard J.P., Jones K.C. and Smith S.R., 1992. Microbial effects of heavy metals in sewage sludge amended soils - effects on symbiotic nitrogen fixation. Report No. FR0308, Medmenham, Foundation for Water Research. pp. 140.

- Pérez L., Moreno A. y González J., 2000. Valoración de la calidad de un suelo en función del contenido y disponibilidad de metales pesados. *Rev. Edafología*. 7: 113-120.
- Pinto, E., 2002. Efecto de la adición de lodos en la incorporación de nutrientes y metales pesados en trigo, cultivados en macetas, Trabajo de graduación Licenciatura en Química, Universidad de Santiago de Chile.
- Polo, A., 2001. Manejo de residuos en España, en: Seminario Taller Internacional de “manejo de residuos sólidos orgánicos para una agricultura limpia”. (9-10 de Octubre, 2001). Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Pomares M., Tarazona M. y Canet R., 1998. Estado de contaminación por metales pesados en suelos de cítricos con cultivo ecológico. Actas del III congreso de la sociedad española de agricultura ecológica SEAE. Una alternativa para el mundo rural del tercer milenio valencia.
- Quinteiro M., Andrade M. y De Blas E., 1998. Efecto de la adición de un lodo residual sobre las propiedades del suelo: Experiencias de campo. *Rev. Edafología*. 5: 1-10.
- Revista "Ecoamérica", 2002. Tecnologías Limpias para la Industria Lodos. Entre la Disposición Final y el uso Benéfico.
- Raven, K. and Loeppert, R., 1997. Trace elements composition of fertilizers and soil amendments. *Journal of Environmental Quality*. 26: 551-557.
- Sadzawka, A., Grez, R., Moraga, M., Carrasco, M. y Rojas, C., 2000. Métodos recomendados para los suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo.
- Silveira, D. & Sommers, L., 1977. Extractability of copper, zinc, cadmium and lead in soils incubate with sewage sludge. *Journal Environmental Quality*. 6: 47-52.
- Soler, P., 1998. Evaluación del impacto ambiental y riesgo de contaminación producidos por la aplicación agrícola de los lodos de depuradora. Facultad de Ciencias, Depto. de Química Agrícola, Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid, España.
- Stehouwer R. , 2003. Land Application of Sewage Sludge in Pennsylvania. Effects of Biosolids on Soil and Crop Quality. *Journal of Environmental Quality*. 29: 1686-1695.

- Toro C., 2002. Impacto de la aplicación de lodos residuales sobre los equilibrios de Cu, Pb y Zn en el sistema suelo/solución-suelo, Seminario de Título Químico Ambiental, Universidad de Chile.
- Uta K., 2000. Land Application of Sewage Sludge (Biosolids). Heavy Metals. En línea, Pág. Web: <http://www.rce.rutgers.edu/pubs/pdfs/fs955.pdf>.
- Yague F., Fernández M. y Sánchez J., 1987. Utilización Agrícola de Lodos de Depuradora. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España.

ANEXO I

DESCRIPCIONES DE SUELOS INCLUIDOS EN ENSAYOS (Tomadas de estudios agrológicos de la Comisión Nacional de Riego, para regiones V y Metropolitana, y CIREN, para VI Región)

I.1.1. SERIE AGUA DEL GATO, franco arcillo limosa

Símbolo Cartográfico: AGD – C3w3
A

La serie Agua del Gato es un miembro de la familia “Fine loamy, mixed, calcareous, thermic, Calcixerollic Xerochrepts”.

Son suelos de origen lacustre, ligeramente profundos que se presentan en el sector depresional al surponiente de la cuenca de Santiago y otros sectores depresionarios, al surponiente de la ciudad El Monte, valle de Mallerauco, etc. Son suelos que presentan un horizonte A con características vérticas, de color negro con matices 10 YR ó 5 YR, textura franco arcillo limosa y bien estructurados, bloques angulares medios moderados, buen arraigamiento y reacción moderadamente alcalina en la superficie (pH 8, d2). El horizonte AC es de color pardo grisáceo oscuro o gris oscuro en matices de 10 YR, textura franco arcillosa, estructura de bloques angulares y subangulares finos moderados, buen arraigamiento, reacción moderadamente alcalina (pH 8,0). El horizonte IIC ca es de colores variables: pardo pálido o pardo en matices del 10 YR, textura arcillosa y sin estructura aparente, no hay raíces. En la zona de contacto entre los horizontes AC y II Cca se presenta un duripan de 5 a 7 cm., II Ccam que impide de la penetración de las raíces y que se presenta extraordinariamente duro en mojado. Hay nivel freático a presión a los 80 cm de profundidad.

Ubicación

Región Metropolitana, provincia de Santiago y Melipilla, camino Mallerauco, 6 Km. al Este del pueblo de Bollenar en parcela 7 del ex fundo San Ramón, por camino interior de Mallerauquito, 80 m al Sur de la entrada.

Posición

La serie Agua del Gato ocupa una posición baja dentro de los sectores depresionales al Suroriente de la cuenca de Santiago y en la cuenca de Mallerauco. La topografía es plana con pendientes dominantes de 0-1%. El régimen de humedad de suelo es xérico, la precipitación media anual es de 460 mm, y la temperatura media anual es de 14,2°C.

Drenaje y permeabilidad

Imperfectamente drenado, permeabilidad lenta y escurrimiento superficial moderadamente rápido (Al principio de la temporada es lento porque al agua penetra en las grietas y se distribuye en forma irregular).

Uso

Aptitud agrícola es para praderas y chacras de temporada, especialmente melones y papas.

PROPIEDADES FISICAS, QUIMICAS Y FISICO QUIMICAS DEL SUELO

UNIDAD CARTOGRAFICA		AGUA DEL GATO		
N° PERFIL		51		
HORIZONTE		Ap	A12	
PROFUNDIDAD cm.		0-19	19-46	
DISTRIBUCION DE PARTICULAS POR TAMAÑO %	> 2	mm		
	2-1		0,6	0,1
	1-0,5		1,0	0,3
	0,5-0,25		1,4	0,7
	0,25-0,10		3,6	2,9
	0,10-0,05		7,5	7,1
	2-0,05		14,1	11,1
	0,05-0,002		55,4	49,9
	< 0,002		30,5	39,0
TEXTURA		FAL	FAL	
DENSIDAD APARENTE g cc ⁻¹		---	---	
HUMEDAD% 1,3 atm		35	38	
RETENIDA 15 atm		26	30	
HUMEDAD APROVECHABLE %		9	8	
HUMEDAD APROVECHABLE cm		2,6	3,2	
CARBONO ORGANICO %		3,3	2,6	
MATERIA ORGANICA %		5,7	4,5	
pH H ₂ O 1:1		7,8	7,5	
C.E. mmhos cm ⁻¹ a 25° C		0,8	1,3	
CaCO ₃ %		1,4	0,2	
CARBONATOS SOLUBLES me L ⁻¹		0,0	0,0	
CATIONES DE INTERCAMBIO	Ca	me 100g ⁻¹	---	
	Mg		---	
	K		0,8	0,7
	Na		1,5	2,5
	SUMA		---	---
CIC		42,0	50,9	
SATURACION BASICA %		---	---	

I.1.2. SERIE CHADA, franco arcilloso

Símbolo Cartográfico: CHD - C1 w4
A

La serie Chada es un miembro de la familia "Fine loamy, mixed, thermic Vertic Xerochrepts".

Son suelos de origen aluvial-coluvial, profundos, en posición de plano ligeramente inclinado (piedmont), y que descansa sobre un substratum aluvial de gravas, piedras con matriz de texturas medias a una profundidad de 115 cm. ó más. El horizonte A es de color pardo rojizo oscuro en matiz del 5 YR, aunque la superficie integrada hacia pardo oscuro en matiz del 7,5 YR, textura franco limosa y bien estructurado, generalmente bloques angulares finos moderados. El horizonte B1 es de color pardo rojizo oscuro en matiz del 5 YR, textura franco arcillosa y estructura de bloques subangulares medios moderados. El horizonte B2 es de color pardo grisáceo oscuro en matiz del 10 YR, fuertemente moteado, textura franco arcillo limosa y sin estructura visible (masiva). El horizonte B3 es de color gris oscuro en matices del 10 YR y sello moderadamente moteado, textura franco arcillo arenosa muy fina y no estructurado (masivo), de escasa porosidad y lenta permeabilidad. Los materiales originales provienen de distintas fuentes con un ligero predominio de rocas básicas y el arraigamiento del suelo alcanza hasta 115 cm. y más.

Ubicación

Región Metropolitana, provincia de Maipo. Camino interior que separa Reserva de las Parcelas en la división del antiguo Fundo Chada, 200 mts, al Oriente de camino secundario al piedmont de Chada, en plantación de duraznos.

Posición

La serie Chada es un suelo plano 1-2% que se presenta en una posición de plano ligeramente inclinado (piedmont), ocupando sectores locales de la Rinconada de Chada y otros similares.

Drenaje y permeabilidad

Moderadamente bien drenado a bien drenado, permeabilidad lenta y escurrimiento superficial moderadamente rápido. Cuando el suelo está seco, el escurrimiento superficial es lento, porque el agua se introduce principalmente por grietas y prácticamente no avanza.

Uso

Su aptitud agrícola es para todos los cultivos de la zona, incluyendo frutales y viñas. Las especies que mejor se adaptan son las de arraigamiento moderadamente profundo.

PROPIEDADES FISICAS, QUIMICAS Y FISICO QUIMICAS DEL SUELO

UNIDAD CARTOGRAFICA		CHADA		
N° PERFIL		45		
HORIZONTE		Ap	A12	
PROFUNDIDAD cm.		0-23	23-42	
DISTRIBUCION DE PARTICULAS POR TAMAÑO %	> 2	mm	---	---
	2-1		1,1	0,5
	1-0,5		3,4	1,8
	0,5-0,25		5,0	3,8
	0,25-0,10		7,1	8,2
	0,10-0,05		8,5	11,7
	2-0,05		25,1	26,0
	0,05-0,002		52,0	48,0
	< 0,002		22,9	26,0
TEXTURA		FL	F	
DENSIDAD APARENTE g cc ⁻¹		---	1,7	
HUMEDAD% 1,3 atm		26	25	
RETENIDA 15 atm		16	16	
HUMEDAD APROVECHABLE %		10	9	
HUMEDAD APROVECHABLE cm		3,9	2,9	
CARBONO ORGANICO %		2,6	2,1	
MATERIA ORGANICA %		4,5	3,6	
pH H ₂ O 1:1		6,3	6,2	
C.E. mmhos cm ⁻¹ a 25° C		0,3	0,2	
CaCO ₃ %		0,0	0,0	
CARBONATOS SOLUBLES me L ⁻¹		0,0	0,0	
CATIONES DE INTERCAMBIO	Ca	me 100g ⁻¹	17,2	20,5
	Mg		3,0	3,1
	K		0,9	0,5
	Na		0,4	0,6
	SUMA		21,5	24,7
CIC		28,5	32,0	
SATURACION BASICA %		75	77	

I.1.5. SERIE MAIPO, franco (tomado del Estudio Agrológico del valle del Maipo, CNR, 1986)

Símbolo Cartográfico : $\frac{\text{MAO} - \text{D1}}{\text{A}}$

La serie Maipo es un miembro de la familia "Fine silty, mixed, thermic, Typic Xerochrepts".

Son suelos de origen aluvial, profundos que se presentan en una topografía plana --con o sin micro relieve-- en una posición de un gran cono aluvial que se extiende por decenas de Km. en ambos márgenes del río Maipo. El horizonte A es de color pardo muy oscuro en matices del 10 YR, textura franca y bien estructurada. El horizonte B cámbico presenta colores pardo oscuros en matices del 7,5 YR y del 10 YR, textura franca y estructura de bloques subangulares medios moderados. Los horizontes C1 y C2 son de colores pardos oscuros en matices del 7,5 YR. Textura franco limosa con gravas finas y medias. En profundidad el substratum se encuentra constituido por gravas y piedras con matriz franco arenosa que representa entre el 40 y 60% en volumen.

Posición

La serie Maipo es un suelo plano, 0-2% de pendiente y ocupa una posición de cono aluvial --como un extenso abanico-- en las márgenes del río Maipo. El régimen de humedad del suelo es xérico, la precipitación media anual es de 330 mm y la temperatura media anual es de 14,2° C.

Ubicación

Región Metropolitana. En el antiguo camino de San Bernardo a Nos, inmediatamente al Sur de la Industria de Aceros Andes S.A., a 150 m. al Oriente de la línea férrea.

Drenaje y permeabilidad

Bien drenado, permeabilidad moderadamente lenta y escurrimiento superficial moderadamente rápido.

Uso

Su aptitud agrícola es para todos los cultivos de la zona, incluyendo frutales y viñas. Las especies que mejor se adaptan son las de arraigamiento profundo.

PROPIEDADES FISICAS, QUIMICAS Y FISICO QUIMICAS DEL SUELO

UNIDAD CARTOGRAFICA		MAIPO		
N° PERFIL		49		
HORIZONTE		Ap	A12	
PROFUNDIDAD cm		0-14	14-30	
DISTRIBUCION DE PARTICULAS POR TAMAÑO %	> 2	mm	---	---
	2-1		2,0	3,3
	1-0,5		6,4	8,1
	0,5-0,25		11,4	10,0
	0,25-0,10		18,0	11,6
	0,10-0,05		13,4	10,1
	2-0,05		51,2	43,1
	0,05-0,002		33,0	32,9
	< 0,002		15,8	24,0
TEXTURA		F	F	
DENSIDAD APARENTE g cc ⁻¹		1,8	---	
HUMEDAD% 1,3 atm		21	26	
RETENIDA 15 atm		10	13	
HUMEDAD APROVECHABLE %		11	13	
HUMEDAD APROVECHABLE cm		2,8	3,7	
CARBONO ORGANICO %		1,1	0,7	
MATERIA ORGANICA %		1,9	1,2	
pH H ₂ O 1:1		7,9	7,7	
C.E. mmhos cm ⁻¹ a 25° C		0,6	0,6	
CaCO ₃ %		1,7	0,0	
CARBONATOS SOLUBLES me L ⁻¹		0,0	0,0	
CATIONES DE INTERCAMBIO	Ca	me 100g ⁻¹	---	17,4
	Mg		---	2,4
	K		0,5	0,5
	Na		0,5	0,6
	SUMA		---	20,9
CIC		16,4	21,8	
SATURACION BASICA %		---	96	

ANEXO II

Ensayo 1: Rendimiento (gr ms por maceta) de las plantas de trigo cultivadas en macetas, en invernadero

Suelo	Tratamiento	Repet.	PAV	Espigas	Granos	Raíces	Peso total aéreo	Peso total planta
ADG	100F	R1	30,85	8,16	5,81	0,48	39,01	39,49
ADG	100F	R2	32,50	7,52	4,82	0,53	40,02	40,55
ADG	100F	R3	30,76	7,91	5,00	0,58	38,67	39,25
ADG	50F50L	R1	30,89	7,44	2,32	0,70	38,33	39,03
ADG	50F50L	R2	31,97	7,76	5,31	0,50	39,73	40,23
ADG	50F50L	R3	30,14	7,43	4,47	0,47	37,57	38,04
ADG	100L	R1	31,98	7,78	4,55	0,30	39,76	40,06
ADG	100L	R2	31,70	7,83	5,49	0,52	39,53	40,05
ADG	100L	R3	33,82	7,43	4,94	0,61	41,25	41,86
ADG	Test	R1	31,40	8,22	4,89	0,49	39,62	40,11
ADG	Test	R2	31,95	7,05	4,67	0,34	39,00	39,34
ADG	Test	R3	34,04	10,19	7,44	0,65	44,23	44,88
CHD	100F	R1	34,50	5,46	1,73	0,57	39,96	40,53
CHD	100F	R2	30,73	6,41	3,01	0,74	37,14	37,88
CHD	100F	R3	35,78	4,36	1,02	0,99	40,14	41,13
CHD	50F50L	R1	34,92	5,18	3,77	0,90	40,01	41,00
CHD	50F50L	R2	35,66	4,09	0,11	1,03	39,75	40,78
CHD	50F50L	R3	33,69	8,02	4,38	0,70	41,71	42,41
CHD	100L	R1	34,56	4,74	1,42	0,80	39,30	40,10
CHD	100L	R2	33,31	3,59	0,41	0,74	36,90	37,64
CHD	100L	R3	32,78	7,09	3,25	0,84	39,87	40,71
CHD	Test	R1	32,11	4,71	2,26	0,85	36,82	37,67
CHD	Test	R2	31,61	7,98	4,01	0,63	39,59	40,22
CHD	Test	R3	33,00	5,12	4,48	0,69	38,12	38,81
MAO	100F	R1	31,40	8,30	4,87	0,60	39,70	40,30
MAO	100F	R2	31,98	8,05	4,99	0,50	40,03	40,53
MAO	100F	R3	32,78	8,44	4,96	0,59	41,22	41,81
MAO	50F50L	R1	29,65	9,29	4,70	0,48	38,94	39,42
MAO	50F50L	R2	32,17	7,43	4,61	0,53	39,60	40,13
MAO	50F50L	R3	33,63	8,85	5,35	0,63	42,48	43,11
MAO	100L	R1	30,58	8,99	6,20	0,66	39,57	40,23
MAO	100L	R2	29,91	9,04	5,85	0,67	38,95	39,62
MAO	100L	R3	33,12	7,67	4,02	0,73	40,79	41,52
MAO	Test	R1	30,67	4,61	2,96	0,48	35,28	35,76
MAO	Test	R2	30,36	8,82	2,03	0,40	39,18	39,58
MAO	Test	R3	30,34	8,96	3,28	0,45	39,30	39,75

Números en sin negrita, medidos; en negrita, calculados.

Ensayo 2: Biomasa aérea de ballica cultivada en macetas, en invernadero

Suelo	Tratamiento	Repet.	PRIMER CORTE		SEGUNDO CORTE		TERCER CORTE	
			Peso seco (g)	Promedio R1R2R3	Peso seco (g)	Promedio R1R2R3	Peso seco (g)	Promedio R1R2R3
MAO	Testigo (T0)	R1	0,34		1,35		1,13	
MAO	Testigo (T0)	R2	0,46	0,40	1,02	1,183	1,22	1,18
MAO	Testigo (T0)	R3	0,40		1,18		1,18	
MAO	T1	R1	0,27		1,40		1,41	
MAO	T1	R2	0,29	0,31	1,37	1,283	1,30	1,37
MAO	T1	R3	0,38		1,08		1,40	
MAO	T2	R1	0,87		1,34		1,40	
MAO	T2	R2	0,85	0,81	1,38	1,340	1,42	1,44
MAO	T2	R3	0,71		1,30		1,50	
MAO	T3	R1	1,09		1,23		1,52	
MAO	T3	R2	0,89	0,94	1,49	1,343	1,46	1,51
MAO	T3	R3	0,85		1,31		1,55	

Números en sin negrita, medidos; en negrita, calculados.