

UCH-Fc
Q. Ambiental
D 542
C. 1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“EFECTOS EN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS SUELOS
DE USO AGRÍCOLA (COMUNA DE MELIPILLA), POSTERIOR A
LA APLICACIÓN DE LODOS ESTABILIZADOS PROVENIENTES
DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS”**

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:

QUÍMICA AMBIENTAL

Katherine Francisca Díaz Álvarez

Director Seminario de Título:

Ing. Juan Roberto Machuca L.

Profesor Patrocinante:

M.Sc. Sylvia Copaja C.

Santiago de Chile, Octubre de 2015.



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 Señorita:

Katherine Francisca Díaz Álvarez

“Efectos en las propiedades químicas de los suelos de uso agrícola (comuna de Melipilla), posterior a la aplicación de lodos estabilizados provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas”

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

Director Seminario de Título
Ing. Juan Roberto Machuca L.

Firma manuscrita en tinta azul del Director del Seminario de Título.

COMISIÓN EVALUADORA

Profesor Patrocinante
M. Sc. Sylvia Copaja C.
Presidente
Dra. Marcia Cazanga S.
Corrector
M. Qca Inés Ahumada S.

Firmas manuscritas en tinta azul de los miembros de la Comisión Evaluadora: Sylvia Copaja C., Marcia Cazanga S. e Inés Ahumada S.



Santiago de Chile, Octubre de 2015.



Katherine Francisca Díaz Álvarez, nació el 17 de noviembre del año 1988, en la ciudad de Melipilla. Vivió toda su niñez y adolescencia en el sector rural de Puangue junto a sus abuelos, tíos y madre. Apasionada por los viajes y el conocimiento de nuevas culturas y realidades, enérgica, aficionada a la danza y los negocios. A los 19 años se trasladó a vivir sola a la ciudad de Santiago donde comenzó sus estudios en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile. Durante su estadía en la Universidad, se enfrentó a varios inconvenientes que si bien hicieron difícil esta etapa, le demostraron que todos los esfuerzos y sacrificios valían la pena.

En diciembre del año 2013 egreso de Licenciatura en Ciencias Ambientales Mención Química. Posteriormente en el año 2014, luego de golpear muchas puertas en departamentos de gestión ambiental y relacionados con el área en el sector público, fue aceptada por el Servicio Agrícola y Ganadero, en calidad de practicante para el desarrollo de su Seminario de Título. Finalmente a principios del 2015 realiza voluntariado “Vive Tus Parques” en Alerce Andino, para posteriormente desarrollar su última práctica profesional en el Ministerio del Medio Ambiente, donde le entregaron todas las herramientas, y confianza en sus aptitudes académicas, logrando reafirmar su compromiso y preferencia por el área pública.

*A mi madre Patricia y Abuelos Javier y Mercedes
Por su fortaleza, y apoyo incondicional.*

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradecer al Señor Mario Gallardo por abrirme las puertas y confiar en mis capacidades de realizar mi Seminario de título en el Servicio Agrícola y Ganadero RM, al Director de este Seminario Señor Juan Machuca, por ser gestor de este proyecto, darme las herramientas y sustento para la realización de este trabajo. A la Señora Sara Menares por sus enseñanzas, apoyo y cariño durante mi estadía en este servicio y a Pamela Carvajal Cartógrafa que me enseñó, apoyo y dio herramientas para el desarrollo de este trabajo. En definitiva a todo este hermoso Servicio Agrícola y Ganadero de la RM y a SAG Melipilla por darme la oportunidad de aprender y crecer como persona y futuro profesional.

Agradezco a mi profesora Patrocinante M.S Sylvia Copaja por su gran compromiso y disposición, y a todos los profesores que hicieron posible mi formación; así como también a Dra. Cecilia Labbé jefa de carrera y a la comisión evaluadora y correctora Dra. Marcia Cazanga y M.Qca. Inés Ahumada.

A Marisol Aravena de Pregrado por su gran labor, motivación y disposición a ayudar, A Margarita de Bienestar por todo el cariño y preocupación a la largo de mi formación, a Maritza de la biblioteca de Ciencias por la energía y cariño. Al hogar Universitario Mario Ojeda de la Universidad de Chile, su administradora Mónica y a los tíos y tías.

A mis queridas amigas hermanas: Yenderi, Carolina, María Fernanda, Bárbara, Francisca, Denisse y Gisell por acompañarme y ser mi familia durante este periodo universitario, su apoyo incondicional, y amor.

Infinitas gracias a todos por haber sido parte de este difícil y hermoso proceso.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Antecedentes Generales.....	1
1.1.1	Descripción y Clasificación de Suelos.....	1
1.1.1.1	Clasificación de Suelos.....	2
1.1.1.2	Capacidad de uso de los suelos.....	2
1.2	Lodos.....	3
1.2.1.	Establecimiento de la Normativa de lodos.....	3
1.2.2.1	Clasificación de lodos.....	4
1.2.3	Concepto de lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).	7
1.2.4	Vías de Uso y Disposición final de lodos.....	9
1.2.5	Normativas de Aplicación de lodos a suelos de uso agrícola.....	10
1.2.6	Efecto de los lodos estabilizados sobre parámetros químicos del suelo.....	12
1.2.6.1	pH.....	12
1.2.6.2	Conductividad Eléctrica.....	13
1.2.6.3	Materia Orgánica.....	14
1.2.6.4	Efecto sobre Elementos trazas.....	15
1.3	Antecedentes Específicos.....	18
1.3.1	Área de Estudio.....	18
1.3.2	Clasificación y características de los suelos seleccionados.....	19
1.3.2.1	Orden Mollisol.....	19
1.4	Objetivos.....	24
1.4.1	Objetivo General.....	24
1.4.2	Objetivos Específicos.....	24
II.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
2.1	Obtención de antecedentes.....	25
2.1.1	Selección de Predios.....	25

2.2	Metodología de Muestreo.....	30
2.3	Selección de parámetros relevantes a estudiar	31
2.4	Metodología de análisis	32
2.4.1	Análisis de contenido de agua.....	32
2.4.2	Análisis del pH: Suspensión y Determinación Potenciométrica.....	33
2.4.3	Conductividad eléctrica: extracto de saturación y determinación por conductivimetría.....	33
2.4.4	Carbón orgánico oxidable.....	33
2.4.5	Cationes extraíbles (Ca, Mg, Na y K).....	34
2.4.6	Relación de adsorción de sodio (RAS).....	34
2.4.7	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).....	34
2.4.8	Elementos trazas Totales (Cu, Zn, Pb, As, Cd, Ni) Método EPA SW846305).....	35
2.4.9	Elementos trazas disponibles: Extracción con (DTPA).....	35
III.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
3.1	Variación del pH.....	37
3.2	Variación de Conductividad Eléctrica.....	42
3.3	Variación de la Materia Orgánica	45
3.4	Variación en la concentración total (mg/kg) de ET en los suelos.....	48
3.4.1	Correlación de Pearson de elementos trazas.....	55
3.5	Efecto de la aplicación de lodos sobre pH, % MO y CIC.....	56
3.6	Comparación de valores de conductividad eléctrica con el RAS.....	61
3.7	Variación de las concentraciones de ET totales en suelos con aplicación y suelos Blancos.....	64
3.8	Análisis de la disponibilidad de Ni, Cd, Zn, Cu y Pb en los suelos estudiados.....	69
3.9	Discusión General de los Resultados.....	72
3.10	Recomendaciones.....	75
IV	CONCLUSIONES.....	79
V	REFERENCIAS.....	82
VI	ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Clasificación de los suelos según los Estados Unidos. (Buol y col, 1998).....	2
Figura 2	Esquema de los procesos del tratamiento de aguas residuales Municipales.....	6
Figura 3	Destino de los lodos producidos en la comunidad europea.....	10
Figura 4	Dinámica que pueden seguir los elementos trazas una vez que son incorporados al suelo...17	
Figura 5	Mapa de la Provincia de Melipilla.	19
Figura 6	Imagen de los polígonos de los predios con lodos predios blancos en el programa QGIS.....	29
Figura 7	Predios seleccionados para muestrear con la serie de suelo correspondiente, según CIREN.	29
Figura 8	Formas de muestreos llevadas a cabo en terreno para el predio HCH4.....	30
Figura 9	Comparación de la variación de pH entre suelos de serie CODIGUA (CDG3, CDG4, CDG6) ISLA DE HUECHÚN (HCH3, HCH4, HCH6).....	38
Figura 10	Comparación de la variación de CE entre suelos de serie CODIGUA (CDG3, CDG4, CDG6) ISLA DE HUECHÚN (HCH3, HCH4, HCH6).....	43
Figura 11	Comparación de la variación del porcentaje de materia orgánica en suelos de serie CODIGUA (CDG3, CDG4, CDG6) e ISLA DE HUECHÚN (HCH3, HCH4, HCH6).....	46
Figura 12	Comparación de la variación de la concentración de elementos trazas (Ni, As, Pb, Cu, Zn) en suelos de serie CODIGUA e ISLA DE HUECHÚN que cuentan con tres aplicaciones (CDG3, HCH3).	49
Figura 13	Comparación de la variación de la concentración de elementos trazas (Ni, As, Pb, Cu, Zn) en suelos de serie CODIGUA e ISLA DE HUECHÚN que cuentan con cuatro aplicaciones (CDG4, HCH4).	51
Figura 14	Comparación de la variación de la concentración de elementos trazas (Ni, As, Pb, Cu, Zn) en suelos de serie CODIGUA e ISLA DE HUECHÚN que cuentan con seis aplicaciones (CDG6, HCH6).	52
Figura 15	Comparación entre los predios con aplicación de lodos y sus respectivos blancos para el pH gráfica a) para MO% gráfica b), y para CIC gráfica c), ordenados en: Grupo I(HCH0a, HCH3, HCH4), Grupo II (HCH0b, HCH6) de la serie ISLA DE HUECHÚN y grupo y grupo III (CDG0c, CDG4, CDG5); Grupo IV (CDG0d, CDG3, CDG6) de la serie CODIGUA.	58
Figura 16	Intercambio catiónico entre la solución suelo, y coloides del suelo cargados negativamente arcillas y materia orgánica (Superiorminerals, 2014).....	60
Figura 17	Comparación entre los predios con aplicación de lodos y sus respectivos blancos para gráfica a) CE, gráfica b) para RAS y gráfica Concentración de cationes c) ; ordenados en: Grupo I (HCH3, HCH4 y HCH0a), Grupo II (HCH6 HCH0b); de la serie ISLA DE HUECHÚN, Grupo III (CDG4, CDG5, CDG0c), y Grupo IV (CDG3,CDG6 ,CDG0d) serie CODIGUA.	63
Figura 18	Comparación de la Concentración total y disponible entre los predios con aplicación de lodos y sus respectivos blancos para (Zn, Cu, Ni).	66
Figura 19	Molécula DTPA (C ₁₄ H ₂₃ N ₃ O ₁₀) ácido 2-[bis [2- [bis (carboximetil) amino] etil] amino] acético.	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Concentraciones máximas en mg/kg de ET en suelos receptores de lodos.....	11
Tabla 2	Rangos de pH con su respectiva denominación.....	12
Tabla 3	Clases de Salinidad según la conductividad eléctrica.....	13
Tabla 4	Rangos de porcentaje de materia orgánica.....	14
Tabla 5	Categorías para la Capacidad de Intercambio Catiónico CIC.....	15
Tabla 6	Clases de capacidad de uso para suelos en estudio.....	22
Tabla 7	Composición promedio de lodos, entregada por aguas andinas en informes anuales 2010 al 2013.....	23
Tabla 8	Criterios para la selección de los predios a estudiar.....	26
Tabla 9	Selección Predios Blancos.....	27
Tabla 10	Calendario de aplicación de lodos en los predios seleccionados a muestrear con información de los Planes de Aplicación realizados por Aguas Andinas presentados al Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).....	27
Tabla 11	Identificación, Ubicación, clasificación y textura de las muestras de suelos agrícolas de la Región Metropolitana.....	28
Tabla 12	Límites de detección de ET totales; disponibles y cationes intercambiables y solubles.....	36
Tabla 13	Correlación de Pearson para el pH.....	41
Tabla 14	Correlación de Pearson para CE.....	45
Tabla 15	Contenido Total ET en el horizonte cultivable del suelo del valle Maipo de la Región Metropolitana.....	49
Tabla 16	Porcentajes de aumento o disminución de las concentraciones de los distintos ET en el tiempo.....	54
Tabla 17	Correlación de Pearson para concentración de elementos trazas totales en el suelo.....	56
Tabla 18	Datos de Conductividad eléctrica CE, razón de adsorción de sodio RAS y concentración de los cationes en meq/L de Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y Na ⁺ obtenidos del muestreo realizado entre agosto y septiembre del año 2014.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS

CDG: Codigua.

DTPA: Ácido 2- [bis [2- [bis (carboximetil) amino] etil] amino] acético

ET: Elementos Trazas.

HCH: Isla de Huechún.

ICP-AES: Espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente.

M S: Masa seca.

PTAS: Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.

SIG: Sistema de Información Geográfica.

RESUMEN

En la comuna de Melipilla, perteneciente a la Región Metropolitana, se comenzó a aplicar lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS), como fertilizantes en estudio, desde antes de la puesta en marcha del reglamento para el manejo de estos lodos. En el año 2010 el Reglamento para el manejo de lodos generados en PTAS, D.S.N°4/2009 del MINSEGPRES entra en vigencia, por lo que se amplía el número de predios y cantidad de toneladas aplicadas en estos. De esto surge la necesidad, por parte del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) como organismo responsable de la fiscalización del cumplimiento de lo dispuesto en el reglamento, evaluar los efectos de las aplicaciones de lodos provenientes de PTAS en los suelos de uso agrícola.

Para este estudio se analizaron los efectos de la incorporación de lodos estabilizados provenientes de PTAS, de propiedad de Aguas Andinas, en once predios de uso agrícola en la comuna de Melipilla, enfocándose principalmente en los parámetros que son considerados en este decreto: pH, conductividad eléctrica (CE), porcentaje de materia orgánica (%MO) y concentración total de elementos trazas ET (As, Cu, Ni, Zn, Pb, Cd). Además, se analizaron parámetros no incluidos en el decreto como: la disponibilidad de estos ET utilizando ácido 2- [Bis [2- [bis (carboximetil) amino] etil] amino] acético (DTPA), la medición de la relación de adsorción de sodio (RAS) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

El análisis de los datos obtenidos de los suelos en las series Isla de Huechún y Codigua indica que existe una variación de éstos suelos a lo largo del tiempo, y que ésta variación depende de la textura, y estructura del suelo, condiciones climáticas, número de

aplicaciones en el tiempo y distancia temporal entre muestreo y aplicación. La aplicación de lodos provocó una disminución de pH en todos los predios que contenían lodos, pero manteniéndose dentro de la neutralidad, lo que al proyectarse en el tiempo podría generar efectos sobre la disponibilidad de los ET en el suelo. Por otro lado, se identificó también un aumento de la CE hasta la tercera aplicación (aunque este aumento no representaría un riesgo, debido a que los valores se encuentran bajo los rangos de suelos salinos).

Existe un aumento en el %MO en los predios analizados con cuatro y seis incorporaciones de lodos, pero al ser un componente en constante descomposición es necesario un seguimiento estacional y con mayor temporalidad. Por otro lado, también se advierte de un aumento en la concentración de ET, principalmente Cu y Zn, con el número de aplicaciones y que As, es un elemento limitante en los suelos al presentar concentraciones cercanas al máximo permitido por la normativa. Finalmente, los ET con mayor porcentaje de disponibilidad en los suelos fueron Cd y Cu, mientras que el menos disponible fue Ni.

A modo general, los suelos de ambas series presentan modificaciones respecto a su composición original, por lo que este valor toma relevancia a medida que se suman toneladas de lodos aplicados, por lo que toma real importancia que realizar una línea base de todos los parámetros químicos, físicos y biológicos del suelo; junto con la selección de un lugar testigo para el seguimiento de las variaciones que la aplicación de lodos pueda generar en estos parámetros.

De este estudio se desprende la necesidad, preponderante, de realizar fiscalizaciones y monitoreos de forma continua, a predios con aplicación de lodos, además de generar

estudios en todos los niveles antes mencionados, cubriendo así el universo real de parámetros en los predios involucrados. Esto puede generar, eventualmente, un mejoramiento en la normativa para que las aplicaciones en los suelos sean sostenibles en tiempo y se resguarden los recursos naturales de nuestro país.

ABSTRACT

In Melipilla, located in the Metropolitan Region, sludges from Wastewater Treatment Plants (WTP) began to be applied before the implementation of the Decree for sludges handling. In 2010, the decree D.S.N ° 4/2009 of the MINSEGPRES for the regulation of the management of sludges from WTP becomes effective, increasing the number of agricultural lands and the amount of sludge applied. Because of this, it becomes necessary for the Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), as responsible Government organism for the control of the regulation of D.S.N°4/2009, assess the effects of the application of sludges from WTP in soils of agricultural use.

In this study, we evaluate and analyze the effects of the addition of stabilized sludges from WTP, property of Aguas Andinas, in eleven agricultural lands in Melipilla, with main focus on the parameters considered in the Decree: pH, electric conductivity (EC), organic matter percentage (%OM) and trace elements (TE) total concentration (As, Cu, Ni, Zn, Pb, Cd). By other hand, we also analyzed parameters not included in the Decree: TE availability using 2-[Bis[2-[bis(carboxymethyl)amino]ethyl]amino]acetic acid (DTPA), measurement of Sodium Adsorption Ratio (SAR) and Cation Exchange Capacity (CEC).

The analysis of the data collected from agricultural soils in Isla Huechún and Codigua indicates a change in soils properties over time, and that this variation depends on the texture and structure of the soil, as well as weather conditions, number of applications and time between sampling and application. The application of sludges caused a decrease in pH in all analyzed lands, but their neutrality is maintained. Despite of this, when projected over time, the decrease in pH may generate effects on the availability of ET on soils.

Furthermore, there is an increase in the EC in all lands with up to three applications (although, this increase does not represent a risk because the values are in the range of saline soils).

Moreover, there is also an increase in the %OM on the soils analyzed with 4 to 6 sludge applications, but since the organic matter is a component in constant decay and degradation it becomes necessary to investigate it in a seasonal manner. On the other hand, we warned of an alarming increase in the concentration of ET, mainly Cu and Zn, with the number of sludge applications; disturbingly As, a very toxic metal, is present in the analyzed soils in concentrations close to the maximum allowed by the regulation. Finally, the highest percentage of available ET in soils were Cd and Cu, while the less available was Ni.

As a general view, both soil series have modified properties from its original composition, so it becomes relevant to study and assess the effects of sludge application from WTP on soils of agricultural use. It is also necessary to take real importance of making a data base of all chemical, physical and biological soil properties and parameters together; as well as a witness soil sample to monitor the variations caused by the successive sludge applications.

From this study arise the tremendous need for inspection and continuous monitoring of the environmental Decrees in Chile, particularly, the effects of sludge application on soils at all levels. This can lead, eventually, to an improvement of the regulation for the management of wastes, especially to evaluate if the sludge applications are sustainable through the time in order to protect the natural resources of our country.

I INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes Generales

1.1.1 Descripción y Clasificación de Suelos

El suelo es un cuerpo natural y dinámico, que cambia con el tiempo y el espacio. Para su estudio, puede ser considerado como un sistema abierto ya que presenta intercambios de materia y energía con el medio, desarrollándose en el suelo diversos procesos físicos, químicos y biológicos, responsables de su morfología (forma) y propiedades (Zúñiga, 1999).

Los suelos son expresiones naturales del entorno en el que se formaron, por lo que la ciencia ha reconocido (USDA, 2014). Cinco factores principales que influyen en la formación del suelo;

- Material parental
- El clima.
- Factores biológicos.
- Topografía.
- El tiempo

Por lo que todos estos procesos dan como resultado que el suelo este constituido por tres fases que se corresponden con los estados de la materia, es decir sólida, líquida y gaseosa, donde se encuentran minerales, materia orgánica, microorganismos y macrorrganismos, flora, fauna, aire y agua entre sus constituyentes.

1.1.1.1. Clasificación de Suelos

La Clasificación de Suelos se refiere a la agrupación por un rango de propiedades similares (químicas, físicas y biológicas) a unidades que puedan ser geo-referenciadas y mapeadas. En Estados Unidos se clasifican en seis categorías, desde el nivel más alto al más bajo de generalización (Figura 1).



Figura 1 Clasificación de los Suelos en EEUU (Buol y col, 1998).

Orden Se relaciona con los procesos de formación de suelos, indicados por la presencia o la ausencia de horizontes importantes de diagnóstico.

Suborden Las características principales del suborden tienen relación con la homogeneidad genética. Los órdenes se subdividen según la presencia o la ausencia de propiedades asociadas a la humedad, los regímenes de humedad del suelo, los principales materiales originales del suelo y los efectos de la vegetación.

Series de Suelo. Las series de suelo se relacionan con los tipos y disposiciones de horizontes; color, textura, estructura, consistencia y reacción de horizontes; propiedades químicas y mineralógicas de los horizontes.

1.1.1.2.Capacidad de uso de los suelos

La capacidad de uso de los suelos es otro tipo de ordenamiento existente, el cual es utilizado para señalar su relativa adaptabilidad a ciertos cultivos. Además, indica las dificultades y riesgos que pueden presentarse al usar los suelos. Está basada en la capacidad de los suelos para producir, señalando las limitaciones naturales de estos.

Las clases convencionales para definir la Capacidad de Uso, son ocho, que se designan con números romanos I hasta VIII, ordenados según sus crecientes limitaciones y riesgos en el uso. (Casanova y col., 2004). Los suelos más aptos para el uso agrícola son los de Clase (I, II y III). Estos poseen muy buenas características físico-químicas, tales como profundidad adecuada, son estructurados, de buena fertilidad natural y de baja pendiente, siendo buenos sostenedores de vida animal y vegetal, y participantes del ciclo hidrológico (CONAMA, 2002).

1.1.2 Degradación y Mejoramiento de suelos cultivables

El acelerado incremento demográfico induce a que la demanda alimenticia y la disminución de superficie cultivable en algunos sectores vayan en aumento, provocando así que los suelos adaptados para cultivos agoten lentamente sus nutrientes, y éstos se expongan a la degradación, alterando sus propiedades por causas naturales o actividades humanas.

La principal consecuencia es la disminución de productividad, la cual puede ser de tipo física, biológica o química (Ministerio del Medio Ambiente, 2010). Por esta razón, es de suma importancia reponer la fertilidad perdida que se produce generalmente por intenso cultivo continuo, mediante la aplicación de nutrientes y materia orgánica.

Tradicionalmente los agricultores han aportado materia orgánica de forma natural al suelo por medio de estiércol animal y purines. Sin embargo, han surgido en la actualidad nuevas opciones como, por ejemplo, la aplicación al terreno de lodos estabilizados provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS), que desde hace algunos años es una alternativa en la Región Metropolitana.

1.2 Lodos

1.2.1. Establecimiento de la Normativa de lodos.

En el año 2000, la empresa Aguas Andinas inicio un Plan de Saneamiento Hídrico de la cuenca de Santiago, debido a la entrada en vigencia del Decreto Supremo N°90/2000 del Ministerio Secretaría General de la República, “Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales”, iniciativa que constituye una de las mayores inversiones ambientales en Chile.

El objetivo principal de este plan fue tratar el 100% de las aguas servidas generadas en Santiago así como en las localidades periféricas, devolviéndolas a los cauces naturales con concentraciones de contaminantes bajo los niveles exigidos por esta norma de emisión.

Un efecto posterior de la normativa fue el aumento en la producción de lodos que este tratamiento generaría a mediano plazo, generando en un futuro colapso en las plantas de tratamiento, por lo cual diversas entidades se alertaron y preocuparon por la búsqueda de soluciones.

Es por esto, que en el año 2000 la CONAMA presenta un Anteproyecto de lodos No Peligrosos, en donde se expresan los requerimientos e imposiciones de acuerdo a las características de los lodos, las características de los sitios de aplicación, y los respectivos criterios de precaución, sean sanitarios, o contenido de compuestos químicos de origen orgánico e inorgánico.

Antecedentes que entre otros fueron la plataforma para la aprobación del Decreto Supremo N°4/2009 del Ministerio Secretaria General de la República denominado Reglamento para el Manejo de lodos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de la CONAMA en el año 2009.

1.2.2 Generación de lodos en el Tratamiento de Aguas Servidas.

Los principales componentes del agua residual, eliminados en las plantas de tratamiento, incluyen: basuras, arenas, espumas y lodo. El lodo extraído y producido en las operaciones y procesos de tratamiento de las aguas residuales (Figura 2) generalmente suele ser líquido o semisólido, presentando un contenido de sólidos entre el 0,25% y el 12% en peso. Este residuo es el componente de mayor volumen eliminado en los tratamientos de aguas.

1.2.2.1. Clasificación de lodos

Durante el tratamiento de aguas residuales se producen distintos tipos de lodos en cada uno de los procesos individuales, los cuales son: lodo crudo, lodo primario, lodo activado, lodo activado de recirculación, lodo secundario y lodo terciario.

Lodo Primario: Producido durante los procesos de tratamiento primario, después de las pantallas y desarenado y consiste en productos no disueltos de las aguas residuales. La composición del lodo primario contiene generalmente gran cantidad de materia orgánica, vegetales, frutas, papeles, etc. Su consistencia se caracteriza por ser un fluido denso con un porcentaje de agua que varía entre el 93% y 97%.

Lodo Secundario: Generado en el tratamiento biológico, donde la biomasa en exceso debe eliminarse de la planta biológica de tratamiento. El lodo en exceso contiene partículas no hidrolizables y biomasa, resultado del metabolismo celular.

Lodo Terciario: Es produce a través de procesos de tratamientos posteriores, con la adición de floculantes para la remoción de material suspendido, nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) y otras contaminantes.

1.2.2.2 Procesamiento de lodos

La fracción de lodos a eliminar, generada en el tratamiento biológico del agua residual, está constituida principalmente de materia orgánica y solo una pequeña parte del lodo está compuesta por materia sólida. Los lodos separados en el sedimentador primario (lodos primarios) y aquellos generados en el tratamiento biológico y los de tratamientos terciario, deben ser estabilizados, espesados y deshidratados antes de ser retirados del sitio de tratamiento como se muestra en la figura 2.

- **Espesamiento:** Los sólidos removidos en los tratamientos primarios y clarificación secundaria se llevan a espesadores de gravedad y de flotación respectivamente, donde se concentran con el fin de aumentar el porcentaje de materia sólida.

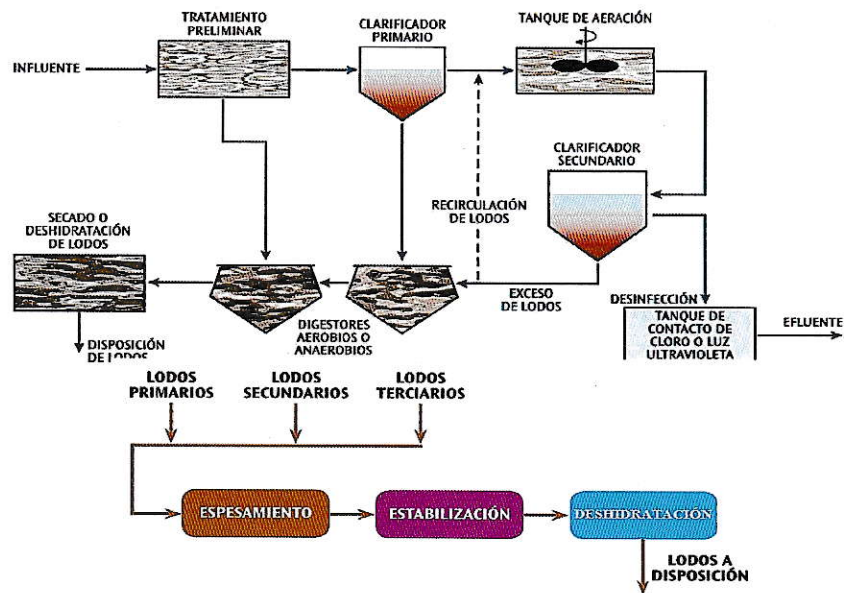


Figura 2. Tratamiento de aguas servidas y generación de lodos.

- **Digestión anaeróbica** Este tratamiento convierte biológicamente la materia orgánica contenida en los lodos bajo condiciones de ausencia de oxígeno, en material celular, metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y otros gases trazas.

Con esto se reduce el poder contaminante del lodo de desecho, obteniendo un lodo estabilizado, libre de su capacidad de putrefacción, malos olores y en buena medida de microorganismos patógenos y parásitos, que permitan que su disposición en el medio, no afecte a la flora, fauna y la salud pública, pues asegura un porcentaje de destrucción de sólidos volátiles superior al 38 %. El proceso se realiza en digestores anaeróbicos, en el caso de condiciones mesofílicas de (35°C), los patógenos y parásitos se eliminan

significativamente en un cierto tiempo de retención hidráulica, estimado entre 14 y 20 días.

- **Deshidratación de lodos:** La humedad de los lodos estabilizados es reducida mediante centrifugación, de un 95% a un 75%, aproximadamente. Luego se utilizan canchas de secado solar (secado de lodos a aire libre), que permiten obtener humedades del orden del 35%. (Plan de manejo de lodos de Planta la Farfana, 2005).

1.2.3 Concepto de lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), define a los lodos estabilizados como residuos sólidos, semisólidos o líquidos, generados durante el tratamiento de aguas servidas domiciliarias. Los lodos incluyen las escorias o sólidos removidos durante el tratamiento primario, secundario o avanzado del proceso de tratamiento de aguas servidas y cualquier material derivado de los lodos, excepto las gravillas o cenizas generadas durante el proceso de incineración.

Cuando los lodos de depuradora son tratados y procesados, se convierten en lodos estabilizados o biosólidos que pueden ser reciclados y aplicados como fertilizante, para mejorar de manera sostenible los suelos manteniéndolos productivos y estimular el crecimiento de las plantas de manera segura (EPA, 2013). Los lodos estabilizados contienen gran cantidad de materia orgánica, microorganismos, macro y micro nutrientes, elementos trazas y agua.

Según la Comisión Nacional del Medio Ambiente, los lodos cloacales se definen como acumulaciones de sólidos orgánicos sedimentables, separados en los distintos procesos de tratamiento de aguas (Cuevas y col., 2006).

Estos lodos pueden generar efectos nocivos para la salud humana, debido a que constituyen un riesgo sanitario, pues como ya se ha mencionado son lodos resultantes de los procesos de depuración de aguas negras, las cuales contienen un número muy grande de contaminantes. Estos incluyen productos de excreción de seres humanos, sustancias químicas domésticas, combustibles de automóviles, lubricantes y productos de limpieza, escorrentía de aguas lluvia provenientes de autopistas y carreteras que contienen hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs o PAHs) y otros productos de quemas de combustibles, y efluentes de diversas industrias (Aloway, 2003).

La legislación vigente en Chile es el D.S. N°4/2009 del MINSEGPRES, define como “lodos” a residuos semisólidos que hayan sido generados en las PTAS, mencionados como lodos estabilizados aquellos con reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios.

Este documento los clasifica sanitariamente según la reducción del potencial de atracción de vectores y la presencia de patógenos en:

- **Lodos clase A:** Lodo sin restricciones sanitarias para ser aplicados a suelos, cumpliendo todos los requisitos exigidos en este reglamento.
- **Lodos clase B:** Lodo apto para aplicación al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos. Este tipo de lodos es el más generado actualmente, por lo que la normativa es clara en sus parámetros máximos expresados en el anexo III para metales según sea la zona y pH.

1.2.4 Vías de Uso y Disposición final de lodos

En la actualidad la disposición final de está ligada a diferentes factores entre ellos: las características finales de estos; exigencias de la legislación ambiental con relación a la disposición de lodos; y posibles lugares para la disposición final de los lodos (Cortés y Montalvo, 2010).

La Unión Europea ha considerado diversas alternativas de disposición de lodos (Figura 3), tal como incineración, depósito en rellenos sanitarios, monorellenos, descarga al mar y aplicación directa al suelo de uso agrícola.

En la década del 80 el principal destino era el traslado a rellenos sanitarios y a monorellenos, pero ya desde el año 2000 se encuentra desplazado por la incorporación directa a suelos de uso agrícola e incineración. Transformándose en la actualidad ya en una tendencia a nivel mundial, debido a los grandes volúmenes de producción de lodos, donde el suelo actúa como compartimiento final de esta disposición, resultando esta actividad una buena alternativa para países como Chile.

La aplicación a los suelos puede ser la forma más segura de disposición final, debido a que el material se diluye sobre grandes zonas, siendo filtrado por la matriz del suelo y descompuesto por los organismos que habitan en él, sobre todo en lugares con mayor producción de lodos como lo es el Gran Santiago.

La aplicación a los suelos, ha generado cierto rechazo, debido a los posibles problemas de contaminación por el aporte de elementos trazas (Nriagu y Pacyna, 1988; Plaste, 2000).

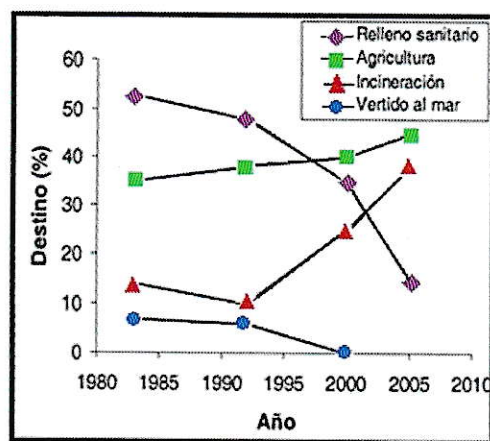


Figura 3 Destino de los lodos producidos en la Comunidad Europea y su evolución en el tiempo (Marambio y Ortega ,2003).

En cuanto a los destinos de los lodos generados por PTAS de la empresa Aguas Andinas el año 2013 en la Región Metropolitana, de un total de 381 mil toneladas en base húmeda, el 41% tuvo como lugar de disposición los Rellenos Sanitarios; 32% con 123 mil toneladas fueron dispuestas en predios agrícolas; y el 27% restante en el Centro de Gestión Integral de Biosólidos (CGIB) El Rutal (Aguas Andinas, 2014).

1.2.5 Normativas de Aplicación de lodos a suelos de uso agrícola.

La aplicación de lodos al suelo parece ser un buen método para reciclar estos desechos, ya que un 80% del material es reutilizable, además de generar mejoras en la productividad y recuperación de suelos degradados (Marambio y Ortega, 2003), disminuyendo la densidad aparente, aumentando la estabilidad de los agregados, incrementando la retención de agua, aportando nutrientes, materia orgánica, y mejorando el rendimiento de diferentes cultivos (Henríquez, 2011). Sin embargo, existen

restricciones para el uso del lodo, las que se asocian a la presencia de elementos trazas (ET) y a una alta carga de microorganismos patógenos (Alloway, 1995).

En Chile las restricciones para la aplicación en suelos están dadas por la normativa D.S N°4/2009 MINSEGPRES, la cual se encuentra en vigencia desde el 26 de abril del año 2010. En la tabla 1 se observan las concentraciones máximas de ET aceptadas en suelos receptores ya sean suelos degradados o normales.

Tabla 1 Concentraciones máximas en mg/kg de ET en suelos receptores de lodos (D.S.N°4/2009 MINSEGPRES).

Metal	Concentración Máxima en (mg/kg) de sólidos totales (base materia seca) ¹	
	Suelos que cumplen con los requisitos establecidos en este título	Suelos degradados que cumplen los requisitos establecidos en este título
Arsénico	20	40
Cadmio	8	40
Cobre	1000	1200
Mercurio	10	20
Niquel	80	420
Plomo	300	400
Selenio	50	100
Zinc	2000	2800

¹ Concentraciones expresadas como contenidos totales (mg/Kg).

Este reglamento indica las exigencias sanitarias mínimas para su manejo, además de las restricciones, requisitos y condiciones técnicas para la aplicación de lodos en determinados suelos, restringiendo las condiciones para aplicación a rellenos sanitarios, aprobando a monorellenos y admitiendo la aplicación casi a todos los tipos de suelo.

En el año 2013 se aplicó a 62 predios de uso agrícola, en una superficie total de 905,6 hectáreas, lo que equivale a una dosis promedio de 37,71 T/ha en base seca de lodos, de los cuales el 66 % de los predios pertenecían a la Comuna de Melipilla.

1.2.6 Efecto de los lodos estabilizados sobre parámetros químicos del suelo

1.2.6.1 Variaciones de pH

El pH es un parámetro de gran relevancia en el suelo, ya que controla la movilidad de los ET, la precipitación y disolución de minerales, reacciones redox, el intercambio iónico, actividad microbiana y la disponibilidad de los nutrientes e indirectamente las propiedades físicas del suelo que variarán dependiendo el valor del pH. En la tabla 2 se indican los rangos de pH con sus respectivas designaciones para la mejor comprensión de los resultados.

Tabla 2 Rangos de pH con su respectiva denominación (CIREN-CORFO, 1996).

DESIGNACIÓN	pH
Ultra ácido	<3,5
Extremadamente ácido	3,5-4,4
Muy fuertemente ácido	4,5-5,0
Fuertemente ácido	5,1-5,5
Moderadamente ácido	5,6-6,0
Ligeramente ácido	6,1-6,5
Neutro	6,6-7,3
Ligeramente alcalino	7,4-7,8
Moderadamente alcalino	7,9-8,4
Fuertemente alcalino	8,5-9,0
Muy fuertemenete alcalino	>9,0

Los lodos aplicados , por lo general presentan valores de pH que fluctuan entre 6 a 8 unidades (EPA,1995), lo que modificaría características del suelo y afectar a los cultivos. El pH es uno de los factores más importantes en la disponibilidad de nutrientes (Rocha y Shirota, 1999), ya que estos pueden ser bloqueados para el consumo de las plantas en determinadas condiciones de pH.



1.2.6.2 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica del suelo (CE) es una medida de la cantidad de sales en el suelo. Esta medida es un importante indicador de la salud de este, ya que afecta a los rendimientos de los cultivos, disponibilidad de los nutrientes para las plantas y la actividad de microorganismos que influyen en procesos clave del suelo. El exceso de sales obstaculiza el crecimiento de la planta, afectando el equilibrio suelo-agua según sea la clase de salinidad que el suelo posea según la tabla 3.

Tabla 3 Clases de Salinidad según la conductividad eléctrica (USDA, 2015).

Clase de Salinidad	Conductividad Eléctrica dS/m
No Salino	0,0 - 2,0
Muy ligeramente Salino	2,1 - 4,0
Ligeramente Salino	4,1 - 8,0
Moderadamente Salino	8,1 - 16,0
Fuertemente Salino	16+

Si bien la CE no proporciona una medición directa de los iones o sales, se ha correlacionado con las concentraciones de diversos cationes e iones (nitratos, potasio, sodio, cloruro, sulfato, y amoníaco).

La salinidad del suelo también se puede ver afectada por aplicaciones sucesivas de lodos debido al aporte de iones SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Na^+ , K^+ y Ca^{2+} entre otros.

Los principales efectos de la salinidad del suelo son la disminución de la capacidad de germinación de la semilla y del crecimiento de la planta (Yahüe y col., 1987).

1.2.6.3 Materia Orgánica

La Materia Orgánica en los suelos es trascendental en la mantención de la fertilidad integral de éste, la que debe considerar la fertilidad química, física y biológica. Los lodos estabilizados están compuestos con aproximadamente el 60% de materia orgánica, siendo el componente más alto entregado por este al suelo. La materia orgánica en suelos cultivables, se encuentra categorizado como se visualiza en la tabla 4.

Tabla 4 Rangos de porcentaje de materia orgánica (CIREN-CORFO, 1996).

Descripción	Rangos (%)
Muy deficiente	0,0 - 1,75
Deficiente	1,76 - 2,5
Algo Deficiente	2,6 - 4,0
Normal	4,1 - 5,0
Apreciable	5,1 - 8,0
Humífero	8,1 - 10,0
Muy Humífero	10+

1.2.6.4 Efecto en la Capacidad de Intercambio Catiónico

Definida como la capacidad de un suelo para adsorber e intercambiar cationes de forma reversible, cuantificados por la suma de miliequivalentes (meq) de cationes intercambiables que posee. El intercambio catiónico es de suma importancia para mantener el equilibrio natural, debido a que regula el consumo de nutrientes por parte de las plantas.

El fenómeno de intercambio catiónico permite que los nutrientes catiónicos que están adsorbidos en forma intercambiable, sean reemplazados por otros estando disponibles en la solución suelo para ser tomados por las plantas. Los componentes que

contribuyen a la CIC son los que forman el complejo coloidal o complejo de intercambio del suelo, constituido por arcillas, óxidos coloidales y humus.

La categorización de la CIC, en los suelos se observa en la tabla 5 en donde se clasifican en rangos adecuados o bajos en suelos cultivables.

Tabla 5 Categorías para la Capacidad de Intercambio Catiónico CIC (INIA, 1992).

Suma de Bases de Intercambio cmol(+)/kg	Rango	Categoría
	≤ 3,00	Muy Bajo
	3,01-6,00	Bajo
	6,01-11,00	Medio
	11,01-15,00	Adecuado
	≥15,01	Alto

La modificación de la CIC del suelo causada por la incorporación de lodos, se traduce en la mayoría de los casos en un incremento, provocado por la alta CIC de los lodos atribuida a su alto contenido de materia orgánica, sin embargo la CIC puede disminuir con el tiempo debido a la degradación de esta (Acevedo y col., 2005).

1.2.6.5 Efecto sobre Elementos trazas

El uso a largo plazo de los lodos puede causar la acumulación de ET en los suelos (López-Mosquera y col., 2000), Esto se debe a que tienden a aumentar su concentración con la tasa de aplicación en el suelo (EPA,1995). Logrando contaminar la cadena alimentaria y reducir los rendimientos de los cultivos (Obrador y col. , 1997; Wang y col., 2003).

Doce elementos traza son conocidos por ser esenciales para los seres humanos: sodio (Na), magnesio (Mg), potasio (K), calcio (Ca), cromo (Cr), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobalto (Co), cobre (Cu), zinc (Zn), selenio (Se) y molibdeno (Mo).

De los elementos no esenciales, mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As) se reconocen como peligrosos para la salud y todos han causado graves problemas de salud como resultado de la contaminación ambiental (Berglund y col., 1984). Dependiendo de las condiciones ambientales y de la cantidad de elementos traza de los suelos, estos elementos pueden ser lixiviados a través del perfil del suelo, y por consiguiente, contaminan las aguas subterráneas.

Antoniadis y Alloway, 2003 estudiaron los suelos que recibieron pesadas cargas de biosólidos y señaló que el movimiento de los elementos traza fue significativa hasta la profundidad de 0,8 metros lo que sugiere los riesgos de la aplicación de este residuo por un largo período.

Los ET en el suelo también pueden seguir otros destinos dentro de este según la figura 4:

- Estar en la solución suelo o bien retenidos por procesos de adsorción, precipitación y complejación en la fracción coloidal.
- Ser absorbidos por las plantas y así ser incorporados a la cadena trófica.
- Pasar a la atmósfera por volatilización.
- Movilizarse a las aguas superficiales por escorrentía o subterráneas por lixiviación.

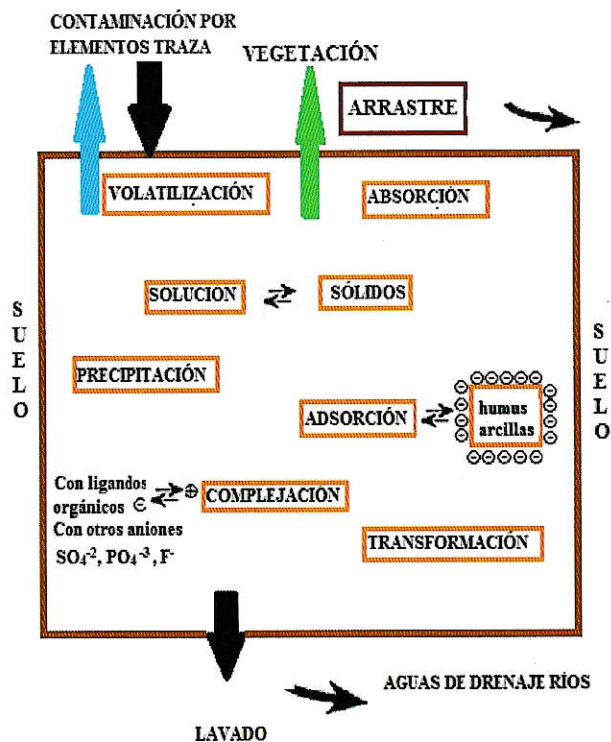


Figura 4 Dinámica que pueden seguir los elementos traza una vez que son incorporados al suelo.

La adsorción y precipitación de la mayoría de los elementos traza en el suelo y su retención en las raíces, limita su desplazamiento hacia la parte aérea de la planta y por ende, evita la fitotoxicidad a causa del aumento en las concentraciones de zinc, cobre o níquel (Chaney, 1994).

1.2.6.6 Efecto del exceso de Nutrientes

El lodo puede introducir cantidades excesivas de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, además de microorganismos patógenos para el suelo (Barry y col.,

1995). La relevancia de estos aportes es que parte del nitrógeno incorporado al suelo se encuentra en forma de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) formas inorgánicas que se encuentran inmediatamente disponibles para las plantas al ser compuestos solubles, los cuales si no son absorbidos por estas, serán dirigidos a napas freáticas o movilizados por lluvias o riego al suelo superficial .

1.3 Antecedentes Específicos

1.3.1 Área de Estudio

El área específica que se ha seleccionado para desarrollar este trabajo se ilustra en la Figura 5, correspondiente a la Comuna de Melipilla, identificada por SIG (sistema de información geográfica) para la visualización global de todos los sectores a los cuales se le ha aplicado lodos estos años.

Esta comuna cuenta con una población proyectada al 2012 de 107.698 habitantes y posee una superficie de 1.345 km² (INE, 2012), posicionándose como la comuna más amplia y poblada dentro de la Provincia de Melipilla, la cual está situada al suroeste de la Región Metropolitana, ocupando la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa y un pequeño sector de la depresión intermedia. Se encuentra ubicada a 63 Km de Santiago, por lo que a la fecha, ha presentado condiciones que han permitido aplicaciones de lodos en forma controlada.

Antes de la promulgación del Reglamento y a la fecha, la provincia de Melipilla ha sido el foco de aplicaciones controladas de lodos, por presentar suelos aptos para su uso y encontrarse cercana a las principales plantas de tratamiento de aguas servidas de la Región

Metropolitana. Esta provincia presenta una extensa superficie con zonas de alta actividad agrícola, con suelos de alta variabilidad y aptos para ser receptores de lodos, ya que presenta una importante conectividad, es decir es una alternativa de disposición final, de un volumen relevante de lodos generados (Henríquez ,2011).

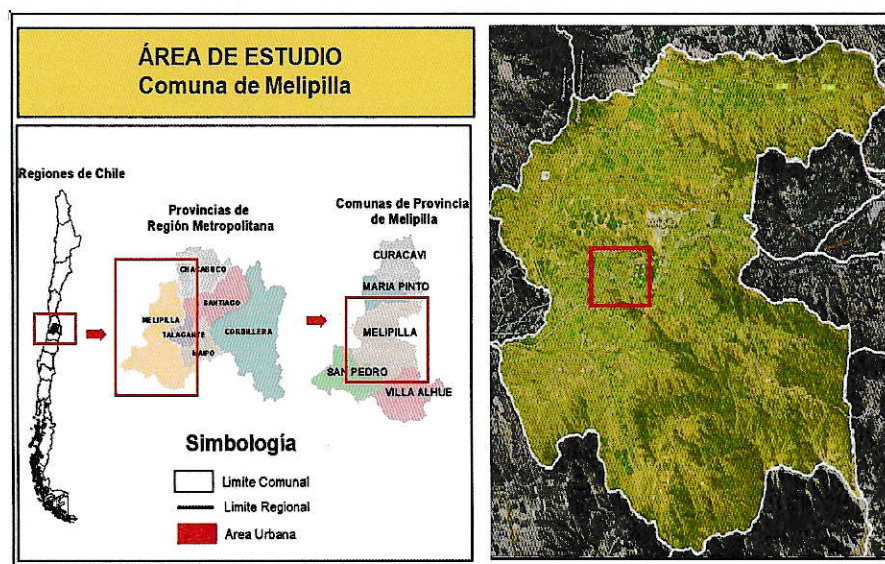


Figura 5 Mapa de la Provincia de Melipilla.

1.3.2 Clasificación y características de los suelos seleccionados

Los suelos estudiados pertenecen al orden Mollisol, suborden Xerolls y serie de suelo CODIGUA e ISLA DE HUECHÚN.

1.3.2.1 Orden Mollisol.

Suelos generalmente minerales típicos de las estepas que tienen un horizonte superficial muy oscuro, coloreado y rico en bases. Casi todos estos suelos tienen un epipedión móllico y muchos también poseen un horizonte de diagnóstico subsuperficial

argílico, nátrico o cálcico. Algunos pocos pueden presentar un horizonte de diagnóstico álbico, petrocálcico o duripan.

La vegetación típica de los Mollisoles es de pradera y se desarrollan en una gran variedad de climas cuyos regímenes de humedad van desde el aquíc al xeric, mientras que los regímenes de temperatura del suelo van desde el cryico al hipertérmico. Normalmente la precipitación de las zonas donde hay Mollisoles oscila entre los 200 y los 800 mm anuales.

La génesis de los Mollisoles está muy relacionada con los procesos que tienen lugar durante la formación del epipedión móllico. Este horizonte se forma por adición de materia orgánica procedente de todos los residuos y su posterior descomposición subsuperficial en presencia de cationes divalentes, particularmente calcio. La evolución de la materia orgánica en estas condiciones conduce al proceso de melanización, responsable del oscurecimiento del suelo.

Las praderas y la vegetación herbácea acumulan grandes cantidades de materia orgánica, cuya descomposición da lugar a compuestos oscuros relativamente estables. La intensa pedoturbación elimina la diferenciación de horizontes, destacándose también la posibilidad de que algunos Mollisoles presenten evidencias de procesos de eluviación e iluviación, tanto de coloides minerales (arcillas, óxidos de hierro y manganeso) como de coloides orgánicos.

Como subdivisiones principales de los Mollisoles se reconocen siete subórdenes Rendolls; Albolls; Aquolls; Borolls; Ustolls; Udolls; Xerolls.

1.3.2.2 Suborden Xerolls

El suborden Xerolls, pertenece a Mollisoles de regiones con clima Mediterráneo. Como su nombre implica, generalmente tienen un régimen de humedad xerica aunque algunos Xerolls que son marginales de Aridisoles tienen un régimen de humedad arídica. Los Xerolls son suelos secos en períodos de verano, pero su humedad aumenta en invierno y se almacena en las capas profundas o encima del lecho de roca.

1.3.2.3 Series de Suelo

Los suelos en estudio se categorizan dentro de las series Codigua e Isla de Huechún, representativas de la zona cercana al río Maipo, en la Región Metropolitana.

Serie Codigua. La serie Codigua pertenece a la Familia arenosa esqueletal, calcárea, mixta, térmica de los Entic Haploxerolls (Mollisol).

Son suelos de origen aluvial estratificados, pedregosos, que ocupan la terraza más baja y la planicie de inundación del río Maipo, en los sectores occidentales de Melipilla. La topografía es plana y las pendientes dominantes son de 0 a 1%. Suelos de color pardo grisáceo muy oscuro en el horizonte A, en matiz 10YR; textura franco limosa o franco arenosa muy fina; estructura de bloques subangulares finos. La Serie se describió en la ortofoto N°20170, Codigua, a 6262, 6 Km de Lat. UTM y a 283,05 Km de Long. UTM. Las propiedades fisicoquímicas de la serie en Anexo I.

Serie Isla de Huechún. La serie Isla de Huechún es miembro de la Familia franca gruesa, calcárea, mixta, térmica de los Fluventic Haploxerolls (Mollisol). Son de origen aluvial, estratificados que se presentan ocupando las terrazas bajas y las planicies de inundación del río Maipo en las proximidades de Melipilla y la Isla de Maipo.

Son suelos de color pardo oscuro, matiz 10YR en el horizonte A; textura arena francosa fina y una débil estructura de bloques subangulares finos; reacción moderadamente alcalina. Los horizontes C son de colores pardo grisáceo oscuro en el matiz 10 YR con moteados que aumentan en tamaño y cantidad con la profundidad; texturas arenosas finas con gravas aisladas y estructura maciza; el arraigamiento es bueno en todo el perfil.

La Serie se describió en la ortofoto N°20148, El Pabellón, a 6265,4 Km de Lat. UTM y a 290,75 Km de Long. UTM. Las características fisicoquímicas de la serie se exponen en el Anexo II, CIREN, 1996.

1.3.2.4 Clase y Capacidad de uso

Los suelos estudiados corresponden principalmente a las clases III y IV cuyas características y capacidad de uso se presentan en Tabla 6.

Tabla 6 Clases de capacidad de uso para suelos en estudio, Pauta para Estudio de Suelos (SAG, 2011).

Clase	Descripción	Limitaciones
III	Presentan moderadas limitaciones en su uso y restringen la elección de cultivos, aunque pueden ser buenas para ciertos cultivos. Tienen severas limitaciones que reducen la elección de plantas con raíces profundas o requieren de prácticas especiales de conservación o de ambas. Presentan hasta un 15% de pedregosidad en superficie. Los suelos de esta clase requieren prácticas de conservación de suelo.	<ul style="list-style-type: none"> • Relieve moderadamente inclinado a suavemente ondulado. • Alta erodabilidad susceptibilidad a la erosión por agua o vientos, o severos efectos adversos de erosiones pasadas. • Suelo delgado sobre un lecho rocoso, hardpan, fragipan, etc, donde limita la zona de arraigamiento con el almacenamiento de agua. • Permeabilidad muy lenta en el subsuelo • Baja capacidad de retención de agua • Contenido de agua excesivo o algún anegamiento continuo después de drenaje • Limitaciones climáticas moderadas. • Inundación frecuente acompañada a algún daño a los cultivos.

IV	<p>Presentan severas limitaciones de uso que restringen la elección de cultivos. Estos suelos al ser cultivados, requieren prácticas de manejo y de conservación muy cuidadosas, más difíciles de aplicar y mantener que las de la Clase III. Los suelos en Clase IV pueden usarse para cultivos, praderas, frutales, praderas de secano, etc. Los suelos de esta Clase pueden estar adaptados sólo para dos o tres de los cultivos comunes y la cosecha producida puede ser baja en relación a los gastos sobre un período largo de tiempo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de agua excesivo, con riesgos continuos de anegamiento después del drenaje. • Pendientes pronunciadas. • Moderadamente salino. • Moderadamente salino. • Relieve moderadamente ondulado. • Baja capacidad de retención de agua. • Suelos Delgados. • Muy alta erodabilidad por agua o viento o severa erosión efectiva. • Abundante pedregosidad superficial. • Texturas finas a muy gruesas. • Moderadamente sódico.
-----------	--	---

1.3.3 Características de Lodos incorporados a los suelos en estudio

Los lodos incorporados a los suelos de la Comuna de Melipilla pertenecen a la clase B y sus componentes entregados en los informes consolidados anuales de aplicación se presentan en Tabla 7.

Tabla 7 Composición promedio de lodos, entregada por Aguas Andinas en los informes anuales planes de aplicación.

Parámetro	Unidad MS	Promedio 2010- 2014
Clasificación Sanitaria	A o B	B
pH	unidad pH	7,65
C.E.	dS/m	5,09
Sólidos Totales		24,60
Materia Orgánica	%	60,58
Nitrógeno Total		5,20
Fósforo total (P₂O₅)		6,38
Arsénico		5,95
Cadmio	mg/kg	1,70
Cobre		439,15
Mercurio		1,93
Níquel		26,88
Plomo		43,00
Selenio		6,78
Zinc		1246,80

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el efecto que ha causado la aplicación industrial de lodos estabilizados de PTAS a través de caracterización química del suelo, en predios de uso agrícola con más de una aplicación.

1.4.2 Objetivos Específicos

- 1 Caracterizar químicamente suelos de la serie ISLA DE HUECHÚN y CODIGUA con aplicación de lodos, mediante mediciones de pH, conductividad eléctrica (CE), razón de adsorción de sodio (RAS), capacidad de intercambio de cationes (CIC), % Materia Orgánica Total y ET totales (As, Cu, Zn, Ni, Cd y Pb) y disponibles por medio del método de extracción con DTPA (Cu, Zn, Ni, Cd y Pb) en el suelo.
- 2 Determinar el impacto que ha tenido sobre el suelo, la incorporación de lodos estabilizados por medio de las propiedades químicas del suelo (pH, CE, %MO, Concentración total de ET As, Cu, Zn, Cd y Pb).
- 3 Comparar parámetros químicos (CIC, CE, RAS, %MO, ET totales y disponibles), entre suelos que cuenten con aplicación de lodos y suelos que no posean incorporación de estos (Blancos).
- 4 Realizar análisis e interpretación de informes de laboratorio, de los predios seleccionados entre los años 2006 al 2014.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Obtención de antecedentes para estudio

Se obtuvo los planes de aplicación de lodos estabilizados de Plantas de Tratamiento pertenecientes a Aguas Andinas (2010 hasta agosto 2014) y entregados al Servicio Agrícola y Ganadero, antes de realizar las aplicaciones, de acuerdo a la normativa vigente.

Estos contienen información química y agrológica, además de datos sobre ubicación geográfica de los predios entre otros compromisos requeridos por el D.S. N°4/2009 del MINSEGPRES, dando un total de cuarenta informes más uno de compilación, al principio de cada año indicando las toneladas aplicadas en el año recién pasado. Además se solicitó información de algunos predios de años anteriores a la entrada en vigencia de este decreto, la cual fue entregada por Aguas Andinas.

Con esto se pudo categorizar la información agrológica y análisis químicos de los diferentes predios que contenían aplicaciones de lodos estabilizados, determinando así, el número de aplicaciones, toneladas aplicadas por año, superficie (ha), serie y capacidad de uso.

2.1.1 Selección de Predios

Para la selección de predios a estudiar (Tabla 8) se consideró lo siguiente:

- Una serie de suelo homogénea dentro del predio, debido a que muchos de los predios poseían tres o cuatro series de suelo dentro de su superficie.
- Presentar estudios agrológicos.

- Presentar un área en lo posible no superior a 13 hectáreas.
- Mayor cantidad de toneladas incorporadas según el número de aplicación.
- Diversidad en el número de aplicaciones de lodos que contenían hasta el mes de agosto del año 2014.
- Mayor cantidad de información disponible.

Tabla 8 Criterios para la selección de los predios a estudiar.

Matriz de Selección	Predio	Cantidad	Serie	Selección
Predios 1 Serie				✓
Área menor a 13 hectáreas de Predio				✓
Predios con más de una aplicación				✓
Planes de Aplicaciones en que aparecen y año.				✓
Cantidad de Toneladas aplicadas en total				✓

Se seleccionó las series de suelo ISLA DE HUECHÚN y CODIGUA, por poseer la mayor cantidad de predios con distinto número de aplicaciones, donde los predios muestreados fueron los que contaban con tres, cuatro, cinco y seis, aplicaciones indicados en la tabla 10, además de cinco predios cercanos que no contaban con aplicación de lodos, a los cuales se les llamó blancos y se identifican en la tabla 9. La designación de cada



predio corresponde a la abreviación de la serie de suelo que corresponde seguida del número de aplicaciones que este posee. Por ejemplo:

Tabla 9 Selección Predios Blancos.

Pedrios	Área (Hectáreas)	Categoría de uso
CDG0c	2,2	IV
CDG0d	2,0	III
HCH0a	3,7	IV
HCH0b	2,0	IV

Con esta elección se determinó un número de once predios pertenecientes a la Comuna de Melipilla de la RM, cinco correspondientes a la serie ISLA HUECHÚN (HCH) y seis de la serie CODIGUA (CDG), donde para cada caso cuatro correspondían a suelos de uso agrícola que tenían tres, cuatro, cinco y seis aplicaciones de lodos estabilizados al mes de agosto del año 2014 y los dos restantes en cada serie fueron muestras blancos ubicadas en las cercanías de los predios con lodos incorporados.

Tabla 10 Calendario de aplicación de lodos en los predios seleccionados a muestrear con información de los Planes de Aplicación realizados por Aguas Andinas presentados al Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).

PREDIO	(Tpromedio/ha/año)										N° Aplic	Total T/ha	ÁREA ha	Clase de Uso
	2004	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014				
CDG3								55,08	68,30	40,00	3	163,38	11,61	III
HCH3				27,39			36,97		47,86		3	112,22	13,90	IV
CDG4		10,89		29,03	30,50			29,56			4	99,98	7,00	IV
HCH4						35,87	62,34	34,42	61,30		4	193,93	23,00	III
CDG6	11,02	30,60		31,09	27,28	30,14		34,02			6	164,15	10,00	III
HCH6	11,25		30,03		32,16	45,51	47,06	36,83			6	202,83	13,20	IV
CDG5			13,40	30,43	26,40	32,92		36,48			5	139,63	9,80	IV

Tabla 11 Identificación, Ubicación, clasificación y textura de las muestras de suelos agrícolas de la Región Metropolitana (Orden, y **Textura) indicada en estudios agrológicos adjuntados en los planes de aplicación entregados a SAG.

Serie	Predio	Ubicación Geográfica (UTM)	Orden	Arena*	Limo*	Arcilla*	Textura*
ISLA DE HUECHÚN	HCH3	0291230; 6266206	M O L L I S O L	32,0	44,0	24,0	Franca
	HCH4	0290591; 6265796		39,0	36,0	25,0	Franca
	HCH0a	0290571; 6266069		-	-	-	-
	HCH6	0290007; 6265435		43,4	40,4	16,2	Franca
	HCH0b	0289941; 6265921		-	-	-	-
CÓDIGEA	CDG4	0283640; 6264589		41,0	45,0	13,0	Franca
	CDG5	0283600; 6264536		57,0	31,0	11,0	Franco Arenosa
	CDG0c	0283147; 6264630		-	-	-	-
	CDG3	0287721; 6264876		39,0	42,0	19,0	Franca
	CDG6	0286793; 6264860		41,0	45,0	13,0	Franca
	CDG0d	0286718; 6265010	-	-	-	-	

Los once predios fueron dibujados en forma de polígonos a través el Sistema de Información Geográfica de Código Abierto (QGIS) y visualizador satelital google earth, donde los sitios fueron ubicados por coordenadas UTM observándose en la tabla 11, determinadas en terreno por un GPS GARMIN modelo MAP62, también fue calculada la superficie que estos cubrían, evaluándose la topografía que tenían, como se puede presentar en la figura 6.

Por archivos de información de CIREN reconocidos por el programa QGIS, se determinaron las series de suelo, categoría de uso, pendiente, erosión entre otras características, según se muestra en la figura 7 para las series de suelos. Corroborándose así la información entregada en los estudios agrológicos, ya existentes en los planes de aplicación. De esta manera además de información facilitada por los agricultores y dueños de los predios se lograron determinar los predios blancos.



Figura 6. Visualización de los predios seleccionados en programa QGIS, donde los polígonos de color celestes corresponden a predios con lodos incorporados y los de color rosado intenso corresponden a los predios blancos.

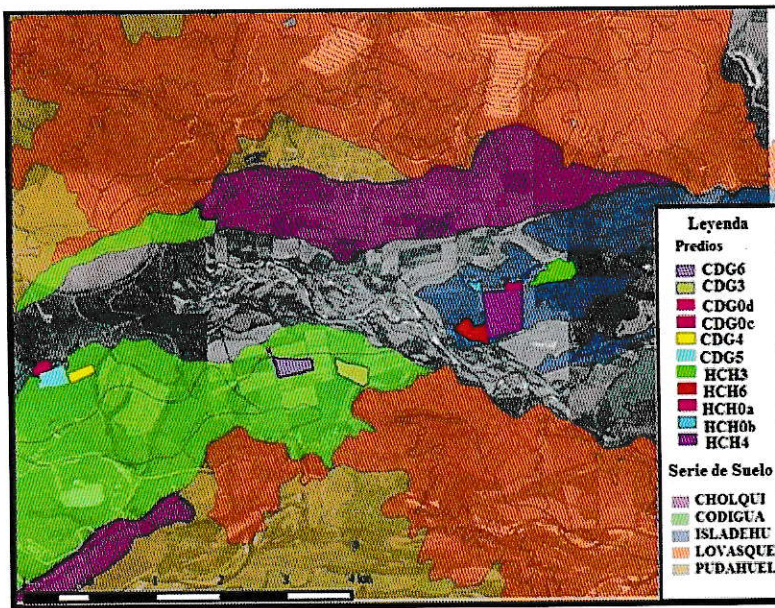


Figura 7 Predios seleccionados para muestrear con la serie de suelo correspondiente, donde los predios dentro de la franja de en color verde pertenecen a la serie CODIGUA y los emplazados dentro del color azul son parte de la serie ISLA DE HUECHÚN.

2.2 Metodología de Muestreo

Se determinó el tipo de muestreo en terreno, según la forma de cada predio, sus características geográficas, la pendiente, cultivos, etc. Por lo que se seleccionó la metodología de muestreo llamada muestreo regular o sistemático donde se siguió un patrón geométrico, recolectando las muestras a intervalos regulares de distancia a lo largo del patrón, cubriendo de manera uniforme el sitio, y así lograr que el predio este totalmente representado en una muestra según patrón asignado (EPA, 1992).

Los patrones fueron la forma de equis (X) para los predios más regulares de formas rectangulares o cuadrados y forma de zig-zag (Z) en los predios de formas irregulares. La muestra para ser totalmente representativa, deber ser compuesta por varias submuestras de igual tamaño.

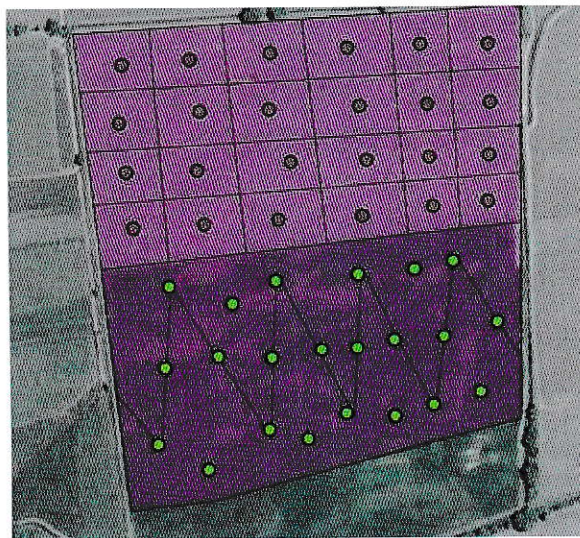


Figura 8 Formas de muestreos llevadas a cabo para el predio HCH4, donde en primera instancia se determinó la forma del muestreo y la distancia entre cada punto para la toma de muestras.

Según la Norma Chilena NCh 2060 de 1990 sobre muestreo para análisis de fertilidad, deben extraerse 25 submuestras por cada unidad de muestreo, la cual se sugiere no exceder una superficie de 10 hectáreas. Para lo que se subdividió el área en unidades de suelos homogéneos en mapas (cartografía), tomando en cuenta el tipo de suelo, topografía, vegetación e historia de manejo previo. Por lo tanto, por cada unidad de muestreo (10 ha aprox.) existirá una muestra compuesta de 25 submuestras.

La toma de muestras se llevó a cabo siguiendo el Protocolo de toma de muestras de suelo en el marco de lo establecido en el artículo N°28 del D.S.N°4/2009 del MINSEGPRES. Documento facilitado por el Servicio Agrícola y Ganadero Región Metropolitana.

Las muestras fueron extraídas a una profundidad de 0-20 cm, en 25 puntos escogidos al azar según la forma regular o irregular de cada predio. Las 25 submuestras colectadas por predio, fueron mezcladas y homogenizadas para obtener una muestra compuesta representativa. Las muestras fueron envasadas, debidamente etiquetadas y transportadas al laboratorio en donde en primera instancia se secaron al aire y se tamizaron a 2 mm.

2.3 Selección de parámetros relevantes a estudiar.

Para la elección de los parámetros a evaluar, se seleccionaron parámetros presentes en estudios de años anteriores, se recurrió a bibliografía y a profesionales relacionados con el tema, para la determinación de los componentes que podrían afectar más al suelo y según el marco regulatorio del D.S.N°4/2009 del MINSEGPRES. Por lo que se seleccionó la concentración total de ET en los suelos receptores, como se encuentra establecido en la

normativa, se seleccionó el pH, la conductividad eléctrica y el aporte de la materia orgánica representado en porcentaje.

Para el Muestreo del año 2014, se agregó CIC, RAS, y elementos trazas disponibles por método DTPA, además de los parámetros mencionados anteriormente, para dilucidar de mejor manera lo que está ocurriendo en el suelo en relación a la información que estos parámetros en conjunto entregan.

2.4 Metodología de análisis.

La caracterización química de los suelos se realizó en el Laboratorio de Agronomía y forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile, según la resolución exenta N° 5856 del Servicio Agrícola y Ganadero, del 30 de Septiembre del año 2010 que aprueba la Nómina de Laboratorios que prestan servicios para la caracterización de lodos y suelos, para la aplicación de lodos provenientes de PTAS, en suelos.

Los métodos utilizados para los distintos análisis pertenecen en su mayoría a Métodos de análisis recomendados para suelos Chilenos CNA (A. Sadzawka y col, 2006) a Métodos de Análisis de suelos del instituto de Investigaciones Agropecuarias serie la Platina n°16 (A. Sadzawka 1990).

2.4.1 Análisis de contenido de agua: por pérdida de masa a 105°C.

La muestra de suelo es homogenizada y tamizada para utilizar la fracción fina de suelo (<2 mm). Esta se seca al aire, hasta masa constante, luego se somete a una temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ para eliminar totalmente el agua. La diferencia entre la masa

de suelo seco al aire y masa de suelo secado a 105°C, se utilizó para calcular el contenido de agua (factor de corrección de humedad).

2.4.2 Análisis del pH: Suspensión y Determinación Potenciométrica.

Se prepara una suspensión de suelo seco al aire con agua destilada en una proporción muestra: agua de 1:2,5 (peso/volumen), y en el sobrenadante se determina el valor del pH-H₂O, con un medidor de pH modelo Thermo Scientific Orion 3- Star.

2.4.3 Conductividad eléctrica: extracto de saturación y determinación por conductivimetría.

Se prepara una pasta de suelo seco al aire, saturada con agua destilada, se filtra al vacío y el agua que queda es el extracto de saturación, en donde se determina la conductividad eléctrica. Este método proporciona la medida más representativa del total de las sales solubles en el suelo, debido a que se relaciona estrechamente con los contenidos de agua del suelo a bajo condiciones de campo, medido con Thermo Scientific Orion 3- Star.

2.4.4 Carbón orgánico oxidable: oxidación con dicromato en medio ácido y determinación colorimétrica del cromato reducido.

El método consiste en una combustión húmeda de la materia orgánica con una mezcla de solución de dicromato de sodio 0,5 mol/L (Na₂Cr₂O₇·2H₂O) y ácido sulfúrico H₂SO₄ al 96%, después de la reacción se mide colorimétricamente el cromato reducido Cr₂O₄²⁻. Este método es aplicable a todos los suelos minerales (carbono orgánico < 20 %).

2.4.5 Cationes extraíbles (Ca, Mg, Na y K) extracción con solución 1M de acetato de amonio a pH 7,0.

La solución de acetato de amonio 1 mol/L a pH 7,0 extrae del suelo los cationes solubles, intercambiables y provenientes de calcita, dolomita y yeso. Como la medición es en un espectrofotómetro de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) serie Axial 720 no necesitan agregar agentes supresores como lantano.

2.4.6 Relación de adsorción de sodio (RAS). Extracto de saturación.

En el extracto de saturación que se indicó en la conductividad eléctrica se determinaron las concentraciones de Ca, Mg y Na solubles y se calculan la relación de adsorción de sodio (RAS) con la siguiente formula utilizándola concentración determinada para los cationes

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}} \quad \text{ec.1}$$

2.4.7 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): método por saturación de sodio a pH 8,2 y percolación (Rhoades, 1982).

La muestra se satura con acetato de sodio 1 mol/L a pH 8,2 se lava con etanol hasta que la conductividad eléctrica no varíe en más de un 10%, se desplaza el sodio adsorbido con acetato de amonio 1 mol/L a pH 7,0 y se mide el sodio desplazado por espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) serie Axial 720 Agilent.

La capacidad de Intercambio Catiónico, se expresa en miliequivalentes por cada 100 gramos de suelo seco y se escribe meq/100 g representado en la ecuación 2.

$$\frac{\text{meq}}{100\text{g}} = \text{mgL}^{-1} \text{ del catión } / (\text{peso equivalente} \times 10) \quad (\text{ec.2})$$

2.4.8 Elementos trazas Totales (Cu, Zn, Pb, As, Cd, Ni) Método EPA SW846-3051 para aceites, sedimentos, lodos y suelo (H. M. Kingston y col. 1997).

La determinación de ET totales se realizó mediante digestión ácida asistida por microondas CEMMARSXPRESS con ácido nítrico suprapur Merck al 65% (HNO₃). Las muestras digeridas son medidas por espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) serie Axial 720, Agilent.

2.4.9 Elementos trazas disponibles: Extracción con ácido 2[Bis [2- [bis (carboximetil) amino] etil] amino] acético (DTPA)

Los metales del suelo se extraen con una solución que consiste en (DTPA 0,005 mol/L, CaCl₂ 0,01 mol/L y trietanolamina (TEA, (HOCH₂CH₂)₃N) 0,1 mol/L, tamponada a pH 7,3 con HCl 1M Merck. En el extracto (filtrado de la mezcla de suelo con la solución de DTPA posterior de la agitación de 2 horas) se determinaron las concentraciones de Cu, Zn, Cd, Pb, Ni por espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES serie Axial 720, Agilent). Los Límites de detección del instrumento (ICP-AES serie axial 720) se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12 Límites de detección de ET totales; disponibles y cationes intercambiables y solubles.
Laboratorio de Ciencias Agronómicas y Forestales de la UC.

Estado	Analito	Unidad	L.D
<i>soluble</i>	Ca	mg/l	0,04
	Mg	mg/l	0,03
	Na	mg/l	0,02
<i>intercambiable</i>	Ca	mg/kg	0,04
	Mg	mg/kg	0,03
	K	mg/kg	0,04
	Na	mg/kg	0,02
<i>total</i>	Ni	mg/kg	0,02
	Cd	mg/kg	0,02
	Cu	mg/kg	0,02
	Pb	mg/kg	0,02
	Zn	mg/kg	0,02
	As	mg/kg	0,02
<i>disponible</i>	Ni	mg/kg	0,02
	Cd	mg/kg	0,02
	Cu	mg/kg	0,02
	Pb	mg/kg	0,02
	Zn	mg/kg	0,02

II. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para completar información de algunos predios antes de la primera aplicación respecto a características físicas y químicas, se utilizaron los estudios de predios cercanos, los cuales si contaban con estudios pre aplicación. Esta información fue corroborada con los estudios agrológicos que se manejaban para la consistencia de las series de suelo y también comparada con el levantamiento de información, análisis químicos y físicos del suelo llevado a cabo por CIREN, 1996, en el Estudio Agrológico de la Región Metropolitana.

3.1 Variación del pH

Estudios anteriores indican que la aplicación de fertilizantes contribuye a la disminución de pH en el suelo, dicho efecto depende de la capacidad tampón del mismo (Liebig y col., 2002).

3.1.1 Efecto del número de aplicaciones de lodo en el pH

En la figura 9 se presenta los suelos ordenados por número de aplicación, comparándose un predio de la serie CODIGUA con otro con igual número de aplicación de la serie ISLA DE HUECHÚN. Se observa a modo general que el pH del suelo disminuyó a medida que aumenta el número de aplicaciones de lodo al suelo.

La comparación entre predios con tres aplicaciones en la figura 9a es la mejor exposición del fenómeno de disminución de pH, ya que se evidencia el descenso del pH desde la primera aplicación, hasta la tercera

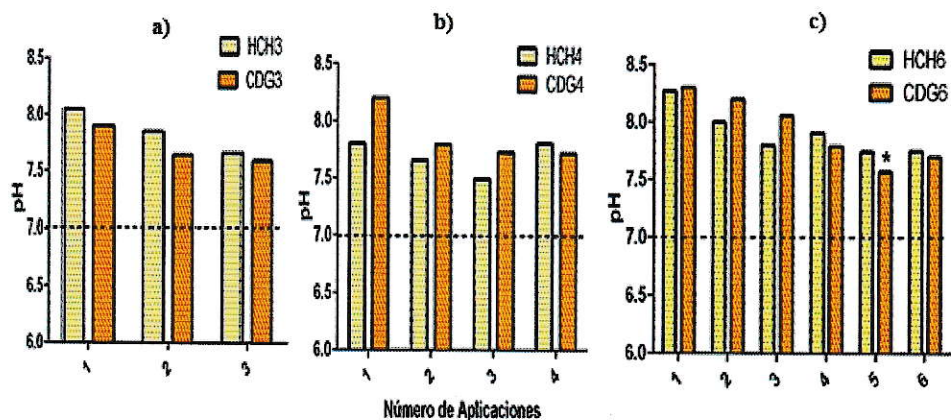


Figura 9 Comparación de la variación de pH entre suelos de serie CODIGUA (CDG3, CDG4, CDG6) e ISLA DE HUECHÚN (HCH3, HCH4, HCH6) que cuentan con tres, cuatro y seis aplicaciones a lo largo del tiempo.

El Δ pH para CDG3 fue de 0,31 y para HCH3 fue de 0,39, lo cual muestra que a pesar de la frecuencia de aplicación y toneladas aplicadas que fueron de alrededor de cincuenta más en el caso de HCH3 según la tabla 2, el suelo siguió el comportamiento lineal decreciente para este parámetro.

CDG4 y HCH4 en la figura 9 b), muestran mayor disminución del pH, que los predios con tres aplicaciones encontrándose Δ pH 0,69 para CDG4 y de 0,67 para HCH4 respecto a sus valores pre-aplicación de 8,40 y 8,20 respectivamente. Estos predios si bien presentan una diferencia de aproximadamente cien toneladas más aplicadas para el predio HCH4, sus valores de pH varían de manera semejante hasta la tercera aplicación. Posteriormente el pH aumenta, probablemente por el tiempo transcurrido entre la última aplicación y el muestreo.

Además de los manejos agrícolas en HCH4, que presentaba áreas con plantaciones y áreas sin sembrar, lo que tiene relación con capacidad de amortiguación entre otras causales ambientales que ayudan al aumento del pH en relación con sus condiciones originales.

CDG6 y HCH6 son los predios que cuentan con mayor número de aplicaciones en este estudio, comenzando las aplicaciones el año 2004 para ambos casos con una tasa inicial de aplicación de 11 toneladas por hectárea. No se observa un efecto inmediato en el pH posiblemente por la baja cantidad de lodos incorporados en la primera aplicación. Al analizar el comportamiento en el tiempo, el predio CDG6 muestra el Δ pH mayor entre los predios comparados con 0,70 y para HCH6 un valor de 0,52. Esto indicaría que entre más aplicaciones de lodos en el tiempo, mayor será el descenso del pH en el suelo.

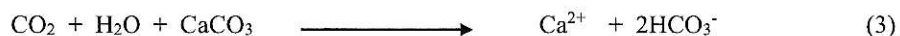
3.1.2 Efecto de la superficie de aplicación

La superficie en esta comparación se hace importante puesto que, el predio HCH6 cuenta con una variación en la superficie de aplicación en el tiempo, lo que cambia el número de muestras compuestas y por ende los resultados varían, ya que se muestreo suelo que no había recibido incorporación de lodos a partir del muestreo del año 2011, hecho que tiene directa relación con el valor de pH que se muestra en la figura 9c) y con el menor Δ pH. Cabe indicar que el valor del año 2014 fue muestreado sobre la misma superficie informada en los primeros planes de aplicación del inicio de las aplicaciones, por lo que este valor sí reflejaría un comportamiento lineal decreciente de la misma forma que se observa en el predio CDG6.

Los predios pertenecientes a la serie ISLA DE HUECHÚN muestran una disminución del pH y un comportamiento lineal decreciente hasta la tercera aplicación de lodos. Así, en la figura 9 los predios HCH6 y HCH4 muestran un aumento de pH después de la cuarta aplicación de lodos, lo que en ambos casos se atribuye a la variación de la superficie de muestreo, ya que fueron predios que en el tiempo fueron ampliando su área de aplicación. Esto afectaría directamente en los análisis de laboratorio, pues las muestras con aplicación de lodos se mezclaron con muestras de suelo que aún no contaban con incorporación de estos.

3.1.3 Efecto salino y materia orgánica

Dentro de los resultados existe una tendencia general a la disminución del pH con el aumento de toneladas aplicadas, atribuible al efecto salino del lodo y al alto contenido de materia orgánica que este aporta al suelo. Favoreciendo la actividad biológica junto con los procesos de mineralización de la MO, generando la liberación de elevadas cantidades de CO₂ que acidifica la solución suelo, y cambia la composición de éste, al entrar en contacto con las partículas edáficas. Una representación del aumento de CO₂ en el suelo produce la disolución de la calcita como se indica en la ecuación 3.



Si bien disminuyó el pH los valores no fueron inferiores a 7,5 lo que indica que los suelos pasaron de clasificarse como moderadamente alcalinos a ser ligeramente alcalinos, siendo una ventaja para los cultivos, al acercar el pH al más apto para la agricultura de valor 7.

3.1.4 Correlación de Pearson

Al aplicar el coeficiente de correlación lineal de Pearson a los datos de ambas series de suelo estos arrojaron un relación negativa y alta, es decir a medida que aumenta el número de aplicaciones disminuye el pH ubicándose en el rango de -0,6 hasta -0,8, en todos los puntos muestreados para pH (Tabla 13).

Los suelos con seis aplicaciones, HCH6 de la serie ISLA DE HUECHÚN y CDG6 de la serie CODIGUA obtuvieron una correlación de -0,860* y -0,918 ** respectivamente, siendo estas correlaciones significativas muy altas al nivel 0,05 (bilateral), y 0,01 (bilateral) respectivamente.

Tabla 13 Correlación de Pearson para el pH.

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

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

Predio	Correlación Pearson	Sig. (bilateral)
HCH3	-0,965	0,169
CDG3	-0,989	0,096
HCH4	-0,656	0,229
CDG4	-0,618	0,266
HCH6	- 0,860*	0,028
CDG6	-0,918**	0,01

La menor correlación la presentó la pareja que contenía cuatro aplicaciones en donde el predio CDG4 presentó la menor correlación negativa con un valor de -0,618 aunque de igual manera es una relación alta entre las variables.

3.2 Variación de Conductividad Eléctrica

El valor óptimo para que un suelo sea clasificado como no salino (tabla 3) es de 0 a 2 dS/m, indicándose en la figura 10 como una línea segmentada. En esta figura se presenta la evolución que ha tenido la conductividad eléctrica en el tiempo, presentándose un aumento significativo después de la aplicación del lodo, debido a la alta conductividad eléctrica que este posee.

Los valores que se registran de este parámetro para los lodos aplicados, son informados por la entidad a cargo (Empresa Aguas Andinas), como promedios de los años o promedio entre meses dependiendo de la cantidad que se genere de estos. El valor utilizado en este caso es el valor promedio entre los años 2012 al 2013 de (7 dS/m).

La comparación entre los predios con tres aplicaciones (figura 10 a) presentan un descenso de la conductividad eléctrica en el transcurso de su historia de aplicaciones, para HCH3 predio que en sus inicios pre-aplicación, ya contaba con un valor de 1,45 dS/m y que posterior a la primera aplicación presenta su máximo valor de CE de 2,37 dS/m, este predio posteriormente baja su concentraciones de sales en él. Por otra parte el predio CDG3 sí mostró un leve aumento en la salinidad de presentar 0,64 dS/m paso a 0,97 dS/m posterior a la tercera aplicación.

Los predios con cuatro aplicaciones (figura 10 b) mostraron que en CDG4 manifiesta un aumento hasta la tercera aplicación de lodos, incrementando a 2,38 dS/m respecto a su valor base, lo que no ocurre para el predio de la serie ISLA DE HUECHÚN el cual en su valor pre-aplicación presentaba ya valores levemente salinos de 2,06 y que posteriormente descende con las aplicaciones de lodos en 1,48 dS/m.

La comparación entre los predios CDG6 y HCH6 (figura 10 c) refleja de mejor manera el comportamiento de la conductividad eléctrica en el suelo, debido a que el aumento de la aplicación de lodos a modo general evidenció un aumento en la CE hasta la segunda aplicación y en algunos casos posteriores a la tercera.

Sin embargo la CE llega a un valor máximo, punto en el cual el suelo se satura, debido a que no tiene más cargas disponibles para mantener retenidas las sales y por lo tanto estas tienden a lixiviar a las napas subterráneas o a acuíferos cercanos a través de acequias por escorrentía.

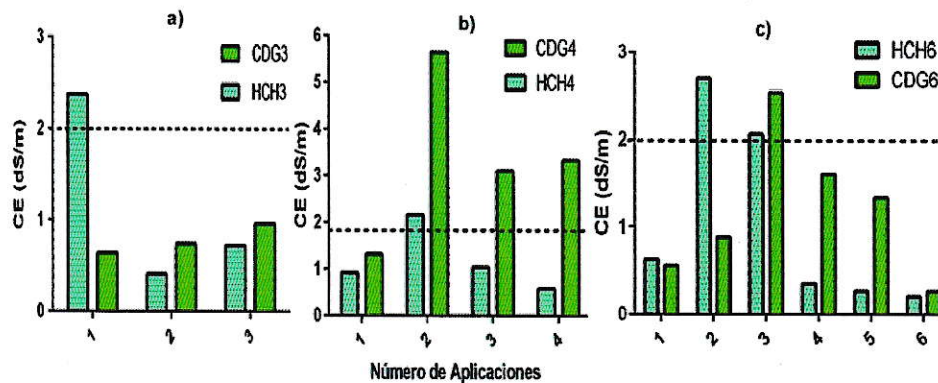


Figure 10 Comparación de la variación de CE entre suelos de serie CODIGUA (CDG3, CDG4, CDG6) e ISLA DE HUECHÚN (HCH3, HCH4, HCH6) que cuentan con tres, cuatro y seis aplicaciones a lo largo del tiempo.

Este proceso se relaciona con la textura del suelo, la que en ambos casos es franco arenoso y franca en los primeros 20 cm del suelo, pero al ser suelos agrícolas el arado voltea otros perfiles más profundos, lo que hace que exista mayor porcentaje de arena sobre la superficie, ya que desde los 22 cm para la serie CODIGUA pasa de una textura

franco arenosa a arenosa y para el caso de ISLA DE HUECHÚN pasa de una textura franca a franca arenosa.

Después de lograr el valor más alto de CE el suelo tiende a bajar la concentración de sales, sin embargo aun así los valores no vuelven a ser los que presentó pre-aplicación.

Los valores máximos de salinidad los presentó el predio CDG4 posterior a la segunda aplicación con 5,6 dS/m clasificándose como salinidad moderada y en la medición posterior a la cuarta aplicación se puede categorizar como ligeramente salino, como se indica en la tabla 3. Mientras que los demás predios que si bien a lo largo del tiempo presentaron aumentos en su CE, en el muestreo del año 2014 todos se encuentran bordeando los valores de 1,0 dS/m, lo que los clasifica como suelos no salinos, indicando que en la actualidad son suelos que no tienen problemas de salinidad, a pesar de que han tenido más de seis aplicaciones en su historia, lo que no limita el hecho de que este parámetro pueda aumentar en el transcurso del tiempo dependiendo del manejo agronómico entre otras variables del predio.

3.2.1 Correlación de Pearson para la conductividad eléctrica.

La correlación de pearson fue aplicada a los datos de los distintos predios en la conductividad eléctrica (tabla 14). El predio CDG3 tiene una correlación positiva de 0,741 la cual es alta y muestra el fenómeno de acumulación de iones hasta la tercera aplicación de lodos, posteriormente se identifica un descenso en las concentraciones, reflejado al cambiar a una correlación negativa en los predios.



La correlación negativa más baja la presentó el predio CDG6 con un valor de -0,105 mostrando una relación casi nula entre las variables. Por otro lado la correlación negativa más alta es la del predio HCH3 con un valor -0,925.

Tabla 14 Correlación de Pearson para CE.

Predio	Correlación Pearson	Sig. (bilateral)
HCH3	-0,925	0,248
CDG3	0,741	0,469
HCH4	-0,63	0,255
CDG4	-0,226	0,715
HCH6	-0,553	0,255
CDG6	-0,105	0,843

Los resultados en general indican, que si bien las variables están relacionadas, no lo están de forma lineal al menos posterior a la tercera aplicación, por lo que la correlación de Pearson en este caso no es aplicable

3.3 Variación de la Materia Orgánica

La materia orgánica es un constituyente esencial del sistema edáfico, gracias a su constitución y propiedades es la principal participante de la mayoría de los procesos, fisicoquímicos y biológicos del suelo. La descomposición de la materia orgánica en el suelo, asociada a la dinámica de mineralización e inmovilización del nitrógeno, son procesos claves en el sistema suelo-planta, donde el contenido de humedad cumple un rol importante en estos procesos (Videla, y col., 2005). Efectos que se potenciarían al incorporar lodos al suelo, por el alto contenido de materia orgánica que este aporta.

La figura 11 presenta el comportamiento del % MO en el suelo después de cada aplicación a lo largo de los años, donde los valores en general se encuentran bajo los

valores normales indicados en la tabla 4, donde la materia orgánica no presenta un patrón regular de comportamiento, sino más bien fluctuaciones de esta en el suelo. Por ser un componente que está en constante descomposición debido a que la materia orgánica incorporada tiene contacto con el aire y los microorganismos, además de estar condicionada por factores como la composición de los organismos presentes, condiciones del entorno (temperatura, humedad, oxígeno, condiciones climáticas), y la calidad de la materia orgánica es decir si el humus está formado por sustancias complejas, más estables o sustancias no húmicas, las cuales son de composición relativamente más simple, y fácilmente consumidos por los organismos, razón por la cual no permanecen mucho tiempo en el suelo.

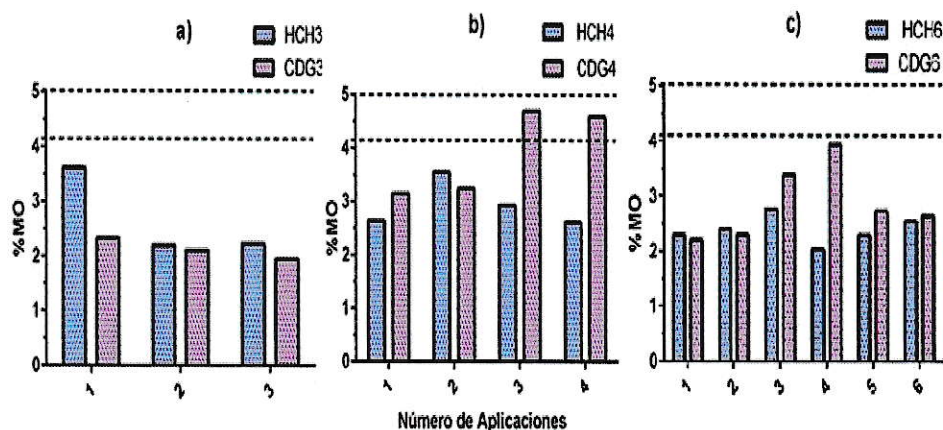


Figura 11 Comparación de la variación en el %MO en suelos de serie CODIGUA (CDG3, CDG4, CDG6) e ISLA DE HUECHÚN (HCH3, HCH4, HCH6) que cuentan con tres, cuatro y seis aplicaciones a los largo del tiempo.

Todos estos son factores agilizan la descomposición y por ende aceleran de esta manera el ciclo del carbono. Como resultado de este proceso se genera menos humus estable y más liberación de CO₂ a la atmosfera, por ende una reducción de la materia orgánica en el suelo.

En la (figura 11a) se indican los porcentajes de materia orgánica de los predios con tres aplicaciones, no determinándose una tendencia entre la disposición de los datos en el tiempo y el número de aplicaciones. El predio CDG3 de la serie CODIGUA obtiene valores deficientes de materia orgánica, no reflejándose un efecto de las aplicaciones de lodos al suelo, pues no se expresa un aumento en % MO.

En la (figura 11 b) El predio CDG4 evidenció un aumento en el porcentaje de materia orgánica en el tiempo, visualizado posterior a la tercera incorporación de lodo, con un valor de 4,7 % el cual se mantuvo hasta la cuarta aplicación, valor que según la literatura en la tabla 4, es descrito como normal y por lo tanto existe un buen arraigamiento de cultivos. Su pareja de comparación, predio HCH4 presentó un ascenso de la materia orgánica a medida que aumentaba el número de aplicaciones, este comportamiento se observó hasta después de la segunda aplicación, luego desciende hasta llegar a un 2,6 % en la cuarta aplicación, valor que es descrito como algo deficiente.

Los predios CD6 y HCH6 mostraron un comportamiento similar al señalado anteriormente, donde CD6 presentó de mejor forma el aumento de la materia orgánica en el tiempo, hasta la cuarta aplicación con 3,9% valor clasificado como algo deficiente. Posteriormente el suelo presenta un decaimiento de materia orgánica reflejado en el muestreo 2014 con un valor de 2,6 % descrito en el mismo rango.

Los predios de la serie CODIGUA se comportaron de forma similar a la serie ISLA DE HUECHÚN, con la diferencia de que los valores de % de MO presentes en esta última, son menores puesto que en ningún caso superaron los valores de 3,6 % de MO, por lo tanto

todos los predios de esta serie se encuentran con porcentajes de materia orgánica deficiente y algo deficiente.

La época en que la muestra fue tomada, es un factor relevante para tener en cuenta, pues dependerá de la estación del año, la etapa de desarrollo de la vegetación, prácticas agrícolas como labranza, la retención de la materia orgánica por el suelo.

Los datos de materia orgánica fueron evaluados con el coeficiente de correlación de Pearson, arrojando correlaciones negativas en algunos predios y positivas en otros. Debido a que no es una variable relacionada linealmente, por lo que la aplicación de este coeficiente no procede.

3.4 Variación en la concentración total (mg/kg) de ET en los suelos.

Para el análisis de los elementos trazas (ET) en el suelo, es relevante la composición de los minerales primarios, que condiciona la composición química de los suelos, y la presencia de formas solubles y activas de ET (Alloway, 1995). Cabe mencionar que el contenido total de metales no permite determinar su origen, y que existen muy pocos estudios en Chile sobre las concentraciones base de ET en los suelos. Estos pocos estudios son prospectivos del contenido total de (Cd, Cu, Mo, Pb y Zn), elaborados entre 1981 y 1990 (tabla 15), por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA, en suelos aluviales entre los ríos Huasco (III Región) y Simpson (XI Región) INIA, 1986, 1990; González, 1994, González y Blaser, 1997.

En la figura 12 se presenta la distribución de los distintos ET en los predios con tres aplicaciones, como concentración total muestreada en los primeros 20 cm del suelo.

Tabla 15 Contenido Total de ET en el horizonte cultivable de los suelos del valle Maipo de la Región Metropolitana, INIA, (1986-1990).

Elemento	Promedio mg/kg	Mínimo mg/kg	Máximo mg/kg	Nº de observaciones
Cadmio	0,45	<1,00	2,84	21
Plomo	23,81	5,00	45,70	19
Zinc	111,44	16,00	200,00	19
Cobre	72,31	7,50	242,80	19

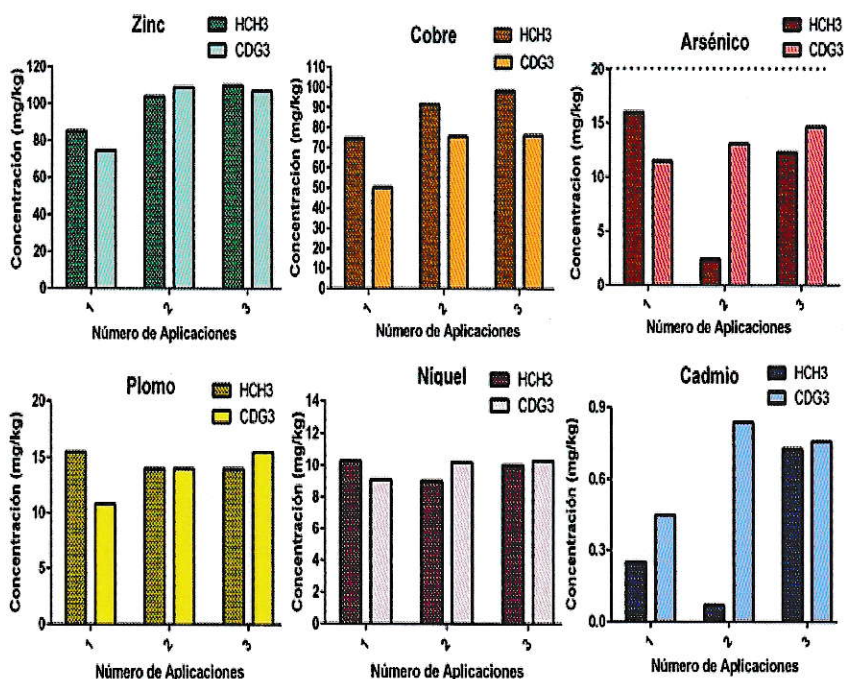


Figura 12 Comparación de la variación de la concentración de elementos traza (Ni, As, Pb, Cu, Zn) en suelos de serie CODIGUA e ISLA DE HUECHÚN que cuentan con tres aplicaciones (CDG3, HCH3).

Los predios con tres aplicaciones CDG3 y HCH3 muestran un aumento en la concentración de ET relacionado directamente con el aumento del número de aplicaciones, donde CDG3 indica un aumento de la concentración en todos los ET. En comparación con

HCH3 que si bien tuvo un aumento sostenido de Cu y Zn no se observó para As, Pb, Ni y Cd. Los predios con tres aplicaciones no son semejantes en la distribución de la concentración de cadmio en el tiempo, pero si indican que desde antes de aplicar lodos hasta después de la tercera aplicación, existió un aumento de la concentración de cadmio.

Los predios con cuatro aplicaciones muestran diferencias en la forma que el suelo fue reteniendo los metales (figura 13), ya que CDG4 si bien muestra un aumento entre la primera y tercera aplicación, para las concentraciones de Cu y Zn, no lo hace para los demás ET, que más bien varían su concentración y luego de la cuarta aplicación tienden todos los ET a disminuir sus concentraciones en el suelo.

Es importante destacar que el arsénico supera el límite permitido por el D.S. N°4/2009 de 20 mg/kg en reiteradas ocasiones en el predio CDG4, posterior a la primera aplicación realizada el año 2006, por lo que la segunda aplicación se realiza el año 2008.

Por ende este predio presenta varios análisis en el tiempo, a causa de la tendencia del suelo de retener arsénico.

Por otro parte el Zn también sobrepasa la norma después de la tercera aplicación donde su límite máximo en el suelo es de 175 mg/kg y obtuvo un valor de 188 mg/kg. La variación de la concentración de metales podría atribuirse en parte a los rangos de tiempo entre cada muestreo, rangos que fueron de aproximadamente dos años, y a la frecuencia de aplicación que fue heterogénea en los años, influyendo directamente en la actividad química, física y biológica del suelo, ayudando a que este predio, presente menores concentraciones de ET, junto con la actividad agrícola que se realiza, lo que podría indicar mayor absorción de estos elementos por las plantas.

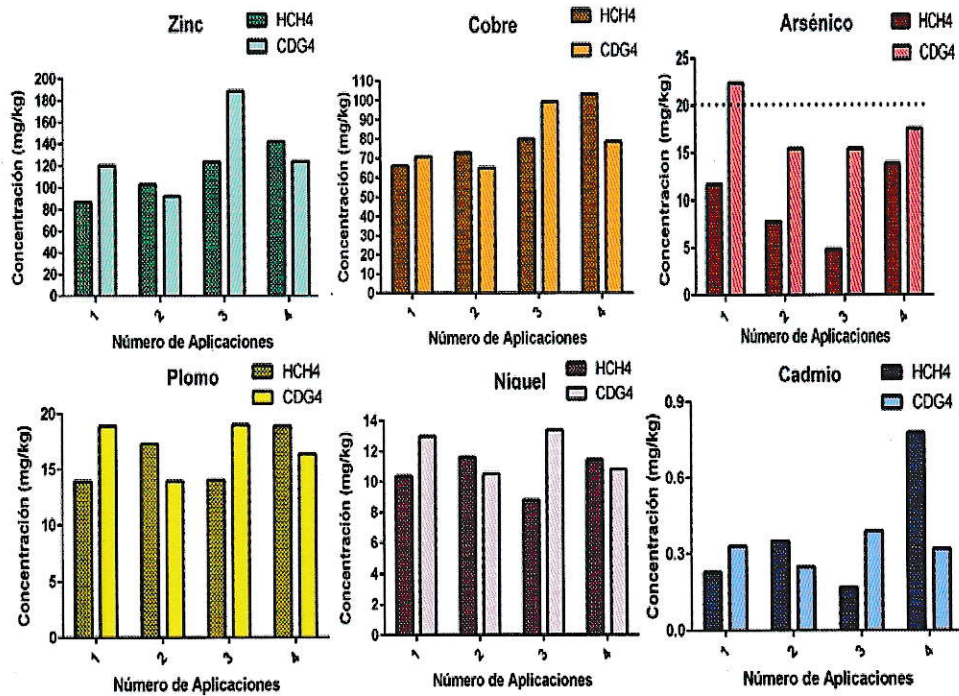


Figura 13 Comparación de la variación de la concentración de elementos trazas (Ni, As, Pb, Cu, Zn) en suelos de serie CODIGUA e ISLA DE HUECHÚN que cuentan con cuatro aplicaciones (CDG4, HCH4).

El predio HCH4 por su parte, denota un aumento permanente en el tiempo en las concentraciones de Cu y Zn principalmente y posee aplicaciones de lodos en el suelo con mejor frecuencia que CDG4 en el tiempo.

Por último, las concentraciones de ET en los predios con seis aplicaciones (Figura 14), presentaron un aumento de las concentraciones de Cu y Zn en el suelo, al compararse los valores entre la primera y sexta aplicación. En ambos predios (CDG6, HCH6) se evidenciaron variaciones en las concentraciones de ET, siendo estas más notorias en el predio CDG6, donde el arsénico superó el máximo permitido por la normativa en tres

ocasiones, lo que lo transforma en un predio de riesgo, y por ende no apto para seguir recibiendo incorporación de lodos.

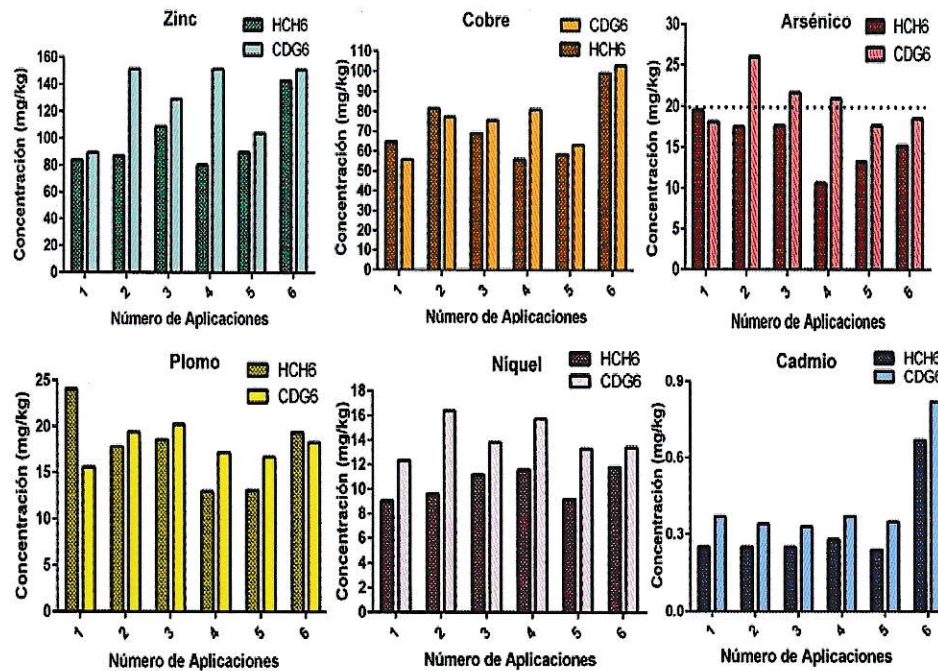


Figura 14 Comparación de la variación de la concentración de elementos trazas (Ni, As, Pb, Cu, Zn) en suelos de serie CODIGUA e ISLA DE HUECHÚN que cuentan con seis aplicaciones (CDG6, HCH6).

El predio HCH6 por su parte aumento su concentración hasta la tercera aplicación, posteriormente está disminuyendo, atribuible a como ya se ha mencionado a la ampliación del área de muestreo, posterior a la cuarta incorporación de lodos.

De acuerdo con la tabla 15 los valores de ET estudiados el año 2014, en comparación con los medidos en suelos del valle del río Maipo por INIA en el año 1990, se encontrarían cercanos a los valores promedios de esta tabla, más que a los máximos. Lamentablemente

los valores de esta tabla son demasiados generales por lo que no se puede determinar un efecto directo en relación con estos.

En la tabla 16 se indican los porcentajes de aumento o disminución en la concentración de ET, donde los valores positivos (azul) indican que hubo un aumento de la concentración y los negativos (rojo) muestran una disminución de la concentración ET, respecto al valor pre aplicación de estos.

Cadmio. Las concentraciones si bien no sobrepasaron la norma, estas si presentaron en todos los predios un aumento sobre el 70 %, entre el valor base y el último muestreado el año 2014, por cada pareja de comparación.

Los predios que presentaron mayor aumento para este ET fueron CDG4, HCH4 aumentando en un 220% su concentración, es decir triplicaron su concentración en el tiempo, al igual que HCH3. Este hecho es un antecedente de precaución debido a que este ET se encuentra entre los dos metales con los límites máximos más bajos de concentración permitidos en la normativa existente, que regula la aplicación de lodos con un valor de 2 mg/kg. Debido a que este elemento es altamente tóxico y acumulativo para el ser humano.

Arsénico. Los predios CDG4 y CDG6, serie CODIGUA, tendieron a sobrepasar la norma, lo que fue reflejado en el porcentaje de aumento que se obtuvo para la concentración de este ET con 20 y 60 % respectivamente. El predio CDG3 también presentó un incremento para este elemento. Respecto a los predios de la serie ISLA DE HUECHÚN, estos mostraron una constante variación y descenso de la concentración (tabla 16, en color rojo).

Tabla 16 Aumento o disminución porcentual de las concentraciones de ET en el tiempo.

Pedrios	As %	Cd %	Cu %	Ni %	Pb %	Zn %	Dif. Aplic
CDG3	13,91	86,67	50,40	12,09	29,63	46,11	0 y 2
	27,83	68,89	51,79	13,19	43,52	43,43	0 y 3
HCH3	1,40	-0,98	23,70	0,99	-4,18	-0,06	0 y 1
	-84,80	-72,00	51,78	-11,68	-13,58	21,99	0 y 2
	-22,10	192,00	62,72	-1,86	-13,58	29,03	0 y 3
CDG4	52,28	230,00	21,86	26,71	20,38	44,89	0 y 1
	5,03	200,00	12,05	2,34	-10,83	10,95	0 y 2
	18,94	285,85	70,65	30,53	20,96	26,93	0 y 3
	19,65	220,00	35,11	5,26	4,46	49,22	0 y 4
HCH4	-25,71	-4,00	9,69	1,57	-13,89	9,21	0 y 1
	-50,60	60,00	20,68	14,13	6,79	21,17	0 y 2
	-68,97	-32,00	32,28	-13,64	-13,58	44,87	0 y 3
	-11,65	212,00	71,17	12,86	16,67	66,57	0 y 4
CDG6	57,74	-17,78	11,16	35,16	44,44	19,97	0 y 1
	26,09	-24,44	53,98	80,22	79,63	103,08	0 y 2
	88,70	-26,02	50,57	51,49	87,74	73,14	0 y 3
	81,91	-16,87	61,50	72,97	58,97	102,88	0 y 4
	53,48	-22,22	25,90	46,15	54,63	39,41	0 y 5
	60,87	82,22	105,18	47,25	69,44	102,41	0 y 6
HCH6	23,50	0,00	7,04	-11,29	48,77	-1,58	0 y 1
	10,83	0,00	35,05	-5,59	9,88	2,40	0 y 2
	11,91	-0,98	14,26	9,58	14,74	27,86	0 y 3
	-32,74	12,00	-7,29	13,64	-19,88	-5,69	0 y 4
	-16,53	-4,00	-3,12	0,10	-43,33	5,54	0 y 5
	-3,74	168,00	64,37	15,80	19,75	67,74	0 y 6

Cobre. Aumentó su concentración luego de la aplicación de lodos, en todos los predios, con incrementos entre 35 y 105%, donde el predio CDG6 presentó el máximo con un 105%, duplicándose la concentración respecto al valor pre-aplicación con una tasa promedio de 28 toneladas anuales en base seca de lodos.

Níquel. Cinco de los seis predios en estudio mostraron un aumento en sus concentraciones de este elemento, aunque estas no superaron el 48%, mostrado por el predio CDG6 posterior a la segunda aplicación.

Plomo. Presenta un aumento de la concentración en cuatro predios, obteniéndose el incremento máximo para CDG6 con un 70 % de la concentración, y el predio que mostró un descenso de la concentración fue HCH3 con una disminución de un 14 % de la concentración respecto a su valor pre-aplicación

Zinc. Después de la última incorporación de lodos aumentó desde un 30 a 102%, respecto a la concentración de los predios antes de la primera aplicación, donde CDG6 duplicó su concentración en el último muestreo.

3.4.1 Correlación de Pearson de elementos trazas.

Cu y Zn. Presentaron en tres predios una relación muy alta entre las variables: HCH3, HCH4, y CDG3 obteniéndose una relación positiva perfecta entre las variables, lo que indica que exactamente en la medida que aumenta el número de aplicaciones en el tiempo, aumenta la concentración de Cu y Zn según la tabla 17.

Arsénico. Las correlaciones de Pearson mostraron ser en su mayoría negativas lo cual es reflejo de la variabilidad de este elemento en los suelos, dependiendo de su estado oxido-reducción, presentando especies generalmente más móviles en condiciones oxidativas, sin embargo el predio CDG3 muestra una relación muy alta entre las variables.

Níquel y Plomo. El predio CDG3 presentó una correlación positiva muy alta del mismo modo el predio HCH6 mostró una alta relación entre las variables, pero solo para Ni. Los demás valores presentaron una relación baja.

Tabla 17 Correlación de Pearson para concentración de ET en el suelo.

Predios	As		Cu		Zn		Pb		Ni		Cd	
	C. Pearson	Sig. Bil.	C. Pearson	Sig. Bil.	C. Pearson	Sig. Bil.	C. Pearson	Sig. Bil.	C. Pearson	Sig. Bil.	C. Pearson	Sig. Bil.
HCH3	-0,52	0,65	0,99*	0,02	1,00**	0,01	-0,97	0,15	-0,48	0,68	0,48	0,68
CDG3	0,87	0,33	1,00*	0,02	0,99*	0,03	0,95	0,20	0,99*	0,05	0,98	0,12
HCH4	-0,37	0,54	0,95*	0,02	0,97**	0,01	0,40	0,50	0,14	0,83	0,64	0,24
CDG4	-0,57	0,29	0,38	0,52	0,07	0,91	-0,29	0,64	-0,62	0,27	0,15	0,82
HCH6	-0,66	0,15	0,33	0,52	0,67	0,15	-0,49	0,33	0,62	0,19	0,75	0,09
CDG6	-0,46	0,35	0,65	0,16	0,32	0,54	0,06	0,91	-0,16	0,77	0,70	0,12

*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).
 **La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Cadmio. Nuevamente es el predio CDG3 el predio que presenta la mejor correlación de Pearson con 0,981, siendo la más alta de los predios, pero que a su vez posee un número de datos menor a las demás muestras, lo que influye en este valor. El predio HCH3 por su lado si bien aumento su concentración desde la primera a la tercera aplicación, presenta una correlación baja asociado al descenso de la concentración medida posterior a la segunda aplicación. El predio CDG4 mostró la menor relación entre las variables con 0,146 que es de esperarse debido a la distribución de los datos en la figura 13.

3.5 Efecto de la aplicación de lodos sobre pH, % MO y CIC.

En agosto y septiembre de 2014 se realizó el muestreo de predios de uso agrícola, para evidenciar que cambios a nivel químico, han producido las aplicaciones sucesivas de lodos, por lo que también fueron muestreados predios cercanos que no poseían aplicación de lodos y así lograr compararlos e incluir nuevos análisis que no son considerados en D.S.N°4/2009 del MINSEGPRES.

Para el análisis de los datos, se organizaron en grupos que poseían predios cercanos de propiedad del mismo agricultor con aplicación (ya evaluados históricamente) y sin

aplicación (blancos). Se designaron cuatro grupos (I, II, III, IV) donde el I y II pertenecen a la serie ISLA DE HUECHÚN y los grupos III y IV pertenecen a la serie CODIGUA.

A continuación se encuentran las comparaciones entre los predios con aplicación de lodos y sin aplicación de estos en la figura 15 para los parámetros de pH, %MO y CIC, categorizadas en la sección I, para la mejor interpretación de los datos.

3.5.1 Efecto en el pH.

Los predios blancos de la serie ISLA DE HUECHÚN mostraron valores de pH más básicos en comparación con los predios con aplicación de lodos, no superando Δ pH mayores a 0,66 en el GRUPO I entre el predio HCH3 y HCH0a. El menor valor de Δ pH lo presentó el GRUPO II entre los predios HCH6 y HCH0b con 0,33.

Los predios de la serie CODIGUA en el GRUPO III mostraron que el predio CDG0c obtuvo valores de pH superiores a los predios CDG4 y CDG5, obteniendo la mayor diferencia con este último predio que presentaba cinco aplicaciones en su historia con un Δ pH 0,18. El GRUPO IV mostró valores muy semejantes entre sus integrantes.

3.5.2 Efecto en la Materia Orgánica.

Para la MO los predios blancos del grupo III, si bien presentaron valores menores que los predios con seis y cinco aplicaciones, las diferencias no fueron superiores a una unidad de porcentaje. Los valores de la muestra blanco se encuentran en la categoría algo deficiente para un suelo de uso agrícola según tabla 4.

Lo mismo ocurre en el GRUPO IV, el cual indica diferencias con el blanco, sin embargo este valor solo es mayor en comparación con CDG4, ya que con el predio CDG5

muestra ser menor, presentando también una baja diferencia de $\Delta\%$ MO con 0,11 por lo tanto los porcentajes de materia orgánica no alcanzan a ser normales según la tabla 4.

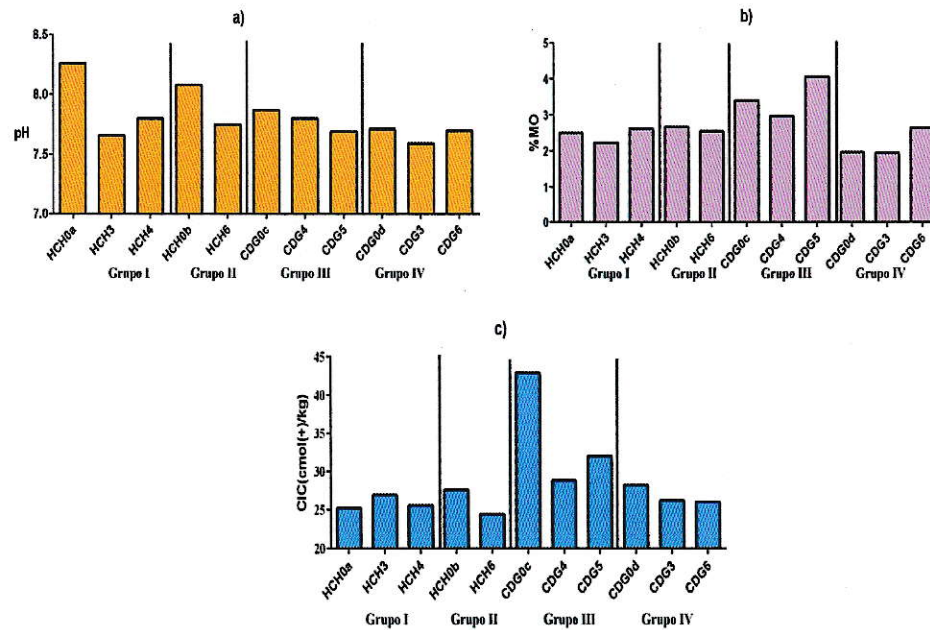


Figura 15 Comparación de a) pH, b) %MO y c) CIC entre predios con y sin aplicación de lodos GRUPO I (HCH0a, HCH3, HCH4), GRUPO II (HCH0b, HCH6) de la serie ISLA DE HUECHÚN. GRUPO III (CDG0c, CDG4, CDG5); GRUPO IV (CDG0d, CDG3, CDG6) de la serie CODIGUA.

Los predios HCH3 y CDG3 presentaron los porcentajes más bajos de materia orgánica, coincidiendo con que ambos predios bajaron sus contenidos de materia orgánica posterior a la tercera aplicación.

3.5.3 Efecto sobre la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).

La CIC es un parámetro no considerado por la normativa. Este parámetro puede entregar información respecto a la cantidad total de cationes adsorbidos en forma

intercambiable por una unidad de masa o peso de suelo. Por ende se relaciona con la adsorción de metales por las partículas del suelo, lo cual reduce la concentración de los ET en la solución suelo. Así un suelo con una capacidad de intercambio catiónico (CIC) alta, tiene más sitios de intercambio en la fracción coloidal del suelo (figura 16), los que estarán más disponibles para una mayor adsorción y posible inmovilización de los ET (Silveira y col., 2003; Oliver y Naidu2003).

Si bien relacionamos los parámetros de pH, % MO y CIC en la figura 15, es posible visualizar que los grupos pertenecientes a la serie CODIGUA se encuentran sobre el valor de 25 cmol (+)/Kg representando una capacidad de intercambio alta según la tabla 7 y favorable para los cultivos (Casanova, 2013).

El mayor valor observado (42,9 cmol (+)/Kg) fue en CDG0c dentro del GRUPO III lo cual es consistente con un pH 7,9 y 3,4% MO. Siendo una CIC muy alta, lo que indicaría que este suelo pueda poseer un contenido considerable de arcilla que según estudios realizados el año 2007 era de 19% presentando una textura franca, ayudado por el contenido de materia orgánica, por ende retendría de mejor manera cationes de los ET. Por tanto a mayor CIC mayor poder amortiguador del suelo, lo que podría ser relevante para ser medido en los estudios de suelo, debido a que si posee una CIC alta, este soportaría mejor el efecto de la aplicación de lodos sobre el pH.

De igual forma en el GRUPO IV el predio CDG0d mostró el valor más alto de CIC lo que indica mayor capacidad de absorber cationes, que los otros integrantes del grupo en comparación, relacionándose este resultado con el tipo diferente de materia orgánica de estos predios, debido a que no poseen aplicación de lodos, además de los contenidos de arcillas que influyen en estos resultados.

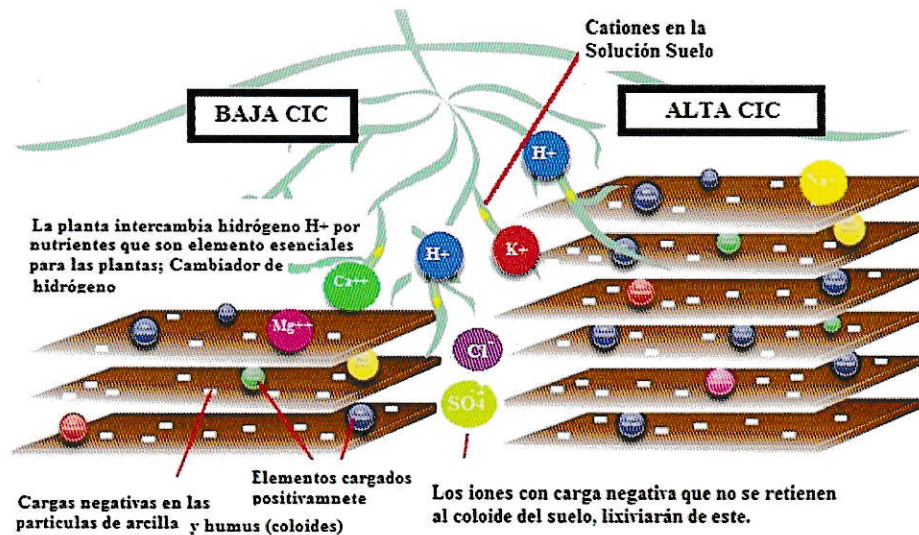


Figura 16 Intercambio catiónico entre la solución suelo, y coloides del suelo cargados negativamente arcillas y materia orgánica (Superiorminerals, 2014).

Dentro de los cuatro predios blancos, tres de estos presentan los valores más altos de CIC en sus grupos, relacionándose directamente con los valores de pH debido a que a medida que aumenta el valor de este, la capacidad de intercambio catiónico sube, produciendo que los H^+ presentes en los grupos funcionales de las arcillas y los compuestos orgánicos se disocian en pH altos y pueden intercambiarse por cationes.

Los cationes que frecuentemente ocupan las posiciones de cambio en los suelos son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , NH_4^+ , Mn^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} .

Entonces, si bien los predios blancos poseen mayor CIC que los predios con aplicación de lodos, no es posible atribuir a la aplicación de lodos la disminución o

aumento de la CIC, debido a que los lodos incorporan un alto contenido de materia orgánica, lo cual incrementa la retención de nutrientes disponibles para las plantas por el suelo, debido a la alta CIC que este posee. Por ende cuanto mayor es el contenido de arcilla y materia orgánica, mayor será la CIC aunque diferentes tipos de arcillas y materia orgánica pueden variar su valor (USDA, 2014).

Los predios de ambas series de suelo mostraron una alta capacidad de absorber cationes, dependiendo si estos cationes serán monovalentes como H^+ , divalentes como Ca^{2+} , Mg^{2+} o trivalentes Al^{3+} , ya que estos elementos ocuparan los espacios disponibles en relación con sus valencias.

3.6 Comparación de valores de conductividad eléctrica con el RAS.

El diagnóstico de condiciones de salinidad en suelos se basa en la medición de la conductividad eléctrica (CE) de extractos de saturación. Otro problema que pueden presentar los suelos afectados por sales es el de la sodicidad es decir un aumento en la proporción de sodio intercambiable. En la actualidad se recomienda usar el RAS del extracto de saturación para caracterizar la condición sódica, definiéndose un valor de RAS de 13 como límite para dividir suelos sódicos de suelos no sódicos (Soil Science Society of América, 1987; Soil Survey Staff, 1999).

La importancia de conocer la cantidad de las sales solubles en el suelo recae en discriminar si el sodio se encuentra en altas cantidades, lo cual producirá en el suelo efectos dispersantes y sellamiento deteriorando la estructura, reduciendo la macroporosidad, aireación y un drenaje pobre, ya que sodio reemplaza otros cationes en los sitios de intercambio.

Tabla 18 Conductividad eléctrica CE, razón de adsorción de sodio RAS y concentración de los cationes (meq/L) de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ obtenidos del muestreo realizado entre agosto y septiembre del año 2014.

Predios	CE dS/m	RAS	Ca meq/L	Mg meq/L	Na meq/L	Grupo
HCH0a	0,26	1,84	7,83	1,79	4,03	I
HCH3	0,72	1,4	31,8	4,62	5,96	
HCH4	0,58	1,24	24,65	3,76	4,69	
HCH0b	0,26	1,34	5,34	0,94	2,37	II
HCH6	0,21	1,49	5,22	0,89	2,6	
CDG0c	3,39	4,49	41,7	23,4	12,8	III
CDG4	1,82	3,52	39,5	17,3	8,71	
CDG5	1,81	3,6	37,7	17,4	9,15	
CDG0d	1,39	4,45	33,9	8,17	20,4	IV
CDG3	0,96	2,22	35,1	6,33	10,1	
CDG6	0,27	1,3	7,2	1,41	2,69	

Por medio de la información recabada se determinaron las mediciones de CE y RAS en donde los datos resultantes del muestreo del año 2014 se organizaron por serie de suelo en la tabla 18, los datos fueron ordenados en grupos, para lograr así una comparación con sus respectivos blancos.

Los suelos de la serie ISLA DE HUECHÚN presentes en el GRUPO I y GRUPO II mostraron valores de conductividad eléctrica por debajo de 0,8 dS/m, el predio HCH3 del GRUPO I, fue el predio con el valor más alto de conductividad eléctrica con 0,75 dS/m clasificándose junto con los demás miembros de la serie como suelos no salinos. El RAS no presentó valores superiores a dos por lo cual se puede evidenciar el bajo aporte de sodio en la conductividad eléctrica.

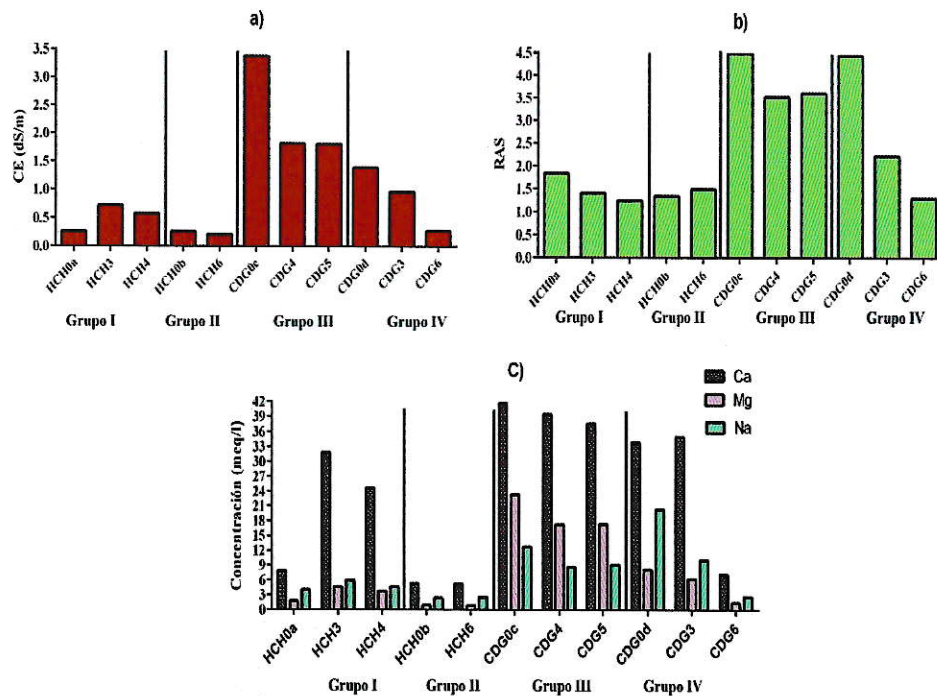


Figura 17 Comparación entre los predios con aplicación de lodos y sus respectivos blancos para a) CE, b) RAS y c) Concentración de Cationes. GRUPO I (HCH3, HCH4 y HCH0a), GRUPO II (HCH6 y HCH0b); de la serie ISLA DE HUECHÚN, GRUPO III(CDG4,CDG5,CDG0c), y GRUPO IV (CDG3,CDG6,CDG0d) serie CODIGUA.

El GRUPO III perteneciente a la serie CODIGUA presenta los valores de conductividad eléctrica más altos entre todos los grupos, donde el predio blanco indica ser el valor más alto de conductividad eléctrica con 3,4 dS/m, encontrándose en la categoría de ligeramente salino, lo cual concuerda con el valor más alto de RAS de 4,49 indicándose una mayor contribución de sodio actuando en la salinidad de este predio, lo que se puede observar en la tabla 18 donde la concentración del sodio soluble en el suelo es de 23,40 meq/L.

En el GRUPO IV nuevamente es el blanco quien presenta el valor más alto de la CE con un valor de 1,36 dS/m, concordando con el valor más alto de RAS en este grupo de 4,45 meq/L, lo cual indica que hay una mayor concentración de sodio con 20,40 meq/L. El predio CDG6 presenta el menor valor de CE de este grupo con un valor de 0,27 dS/m, coincidiendo también con el más bajo valor de RAS en este segmento. El muestreo de este predio se realizó con plantas de trigo en crecimiento, por lo probablemente afecto en la disminución la conductividad eléctrica, ya que las plantas extraen nutrientes de los suelos junto con el regadío, debido a que el predio recibe un aporte constante de agua al estar en uso.

Por lo tanto suelos de la serie CODIGUA presentaron valores más altos de CE y RAS en comparación con los suelos de la serie ISLA DE HUECHÚN.

Respecto a la (figura 17c), es posible evidenciar que el catión más abundante presente en la determinación del RAS, es calcio (Ca), catión que tiene estricta relación con el pH del suelo, debido que este está entre los cuatro elementos principales que afectan este parámetro: calcio (Ca), Magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na). Estos elementos deben estar presentes en las cantidades y proporciones correctas para darle un pH equilibrado a los suelos, por lo tanto la mayor presencia de Ca ayudaría a mantener el pH del suelo con valores superiores a 7 al pertenecer ambas series de suelos a la familia calcárea.

Finalmente todos los predios se encuentran en un rango normal de salinidad, lo que puede reflejarse en la conductividad eléctrica y el valor de RAS.

3.7 Variación de las concentraciones de ET totales en suelos con aplicación de lodos y suelos sin aplicación.

La importancia del análisis de esta variable, recae en que tanto los lodos que se quieren aplicar provenientes de PTAS, como la zona geográfica de destino, pueden presentar una alta carga patógena y presencia de ET, que pueden afectar a la cadena trófica a través de los cultivos y contaminar las aguas freáticas (Legret y col., 1988; Gennaro y col., 1991; Barbarick y col., 2004). Por lo que se llevó a cabo la medición en los suelos que ya contenían ET, incorporados con lodos y suelos que no presentaban una aplicación, y así de esta forma visualizar cual sería el posible comportamiento de las concentraciones de ET.

A continuación, se señalan de manera específica los valores obtenidos de las concentraciones de ET, para cada una de las muestras de suelo, antecedente a considerar, ya que los contenidos totales no deben sobrepasar ciertos rangos establecidos según D.S N°4/2009 MINSEGPRES.

Como se observa en la Figura 18, el contenido total de elementos trazas en las dos series de suelos, se ajustan a lo expresado por la normativa, ya que ningún valor supera los límites establecidos, siendo una ventaja real frente a las concentraciones de ET que aportan las altas dosis lodos, que pueden ser altamente tóxicos, afectando a la salud de la población que se encuentre expuesta.

Dentro de las reacciones adversas en el largo plazo, se encuentran diversas afecciones sobre el aparato gastrointestinal y respiratorio, que también se pueden ver

incrementados por el consumo de alimentos o cultivos contaminados, generándose a su vez, repercusiones en el medio ambiente.

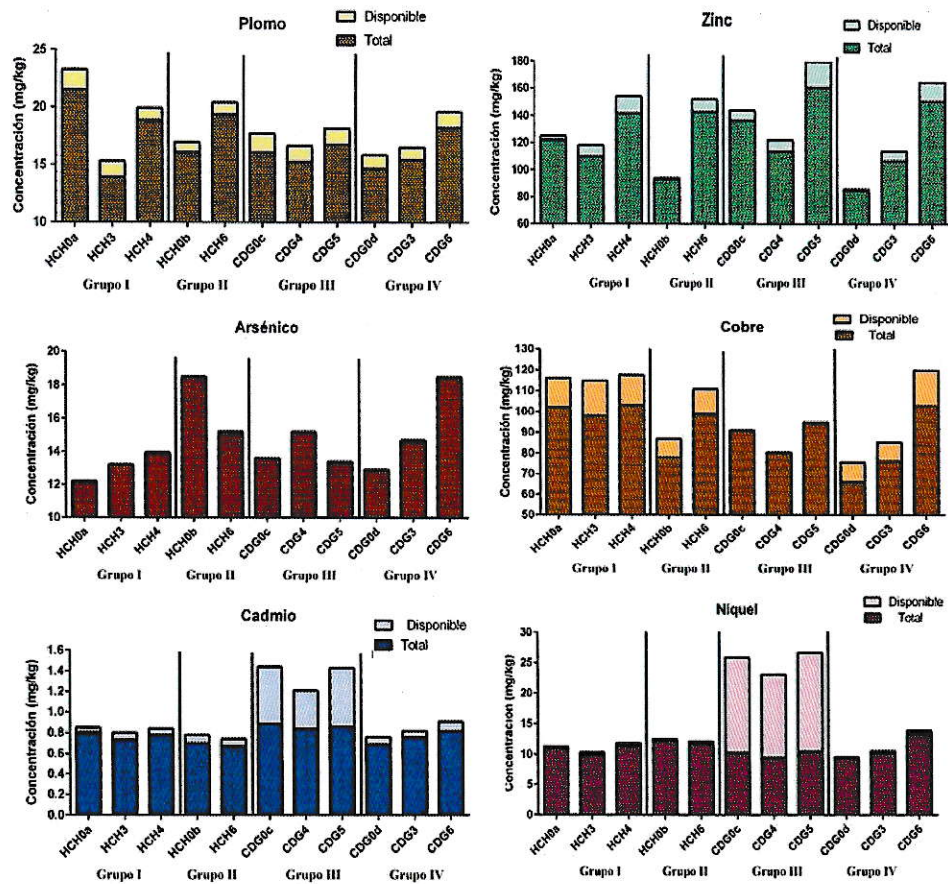


Figura 18 Comparación entre los predios con aplicación de lodos y sus respectivos blancos para la concentración Total y Disponibles por DTPA de Elementos Trazas (Pb, Zn, As, Cu, Cd, Ni).

GRUPO III (Serie CODIGUA), el predio CDG5 es el que cuenta con mayor número de aplicaciones en este grupo, que concuerda con la mayor concentración de ET, (figura 18) con 161 mg/kg de Zn, este valor se encuentra bajo los valores de la normativa,

pero cercano su concentración máximo de 175 mg/kg. El predio CDG4 presenta menor concentración de ET totales en comparación con el predio blancos para todos los ET. Por lo cual a pesar de no ser un predio que cuenta con aplicación de lodo (predio blanco) se encuentra colindante a estos y con aplicación de guano de vacunos, contiguo al almacenaje de alimento para estos, junto con aguas detenidas que mostraban evidencia visible de eutrofización, lo que podría evidenciar otras fuentes de ET además de la posibilidad de contaminación difusa entre los predios por el agua de regadío.

GRUPO IV (Serie CODIGUA) Los predios CDG3, CDG6 y su respectivo blanco mostraron variaciones más esperadas, ya que el predio CDG6 presentó tener la concentración más alta con el mayor número de aplicaciones, seguida del predio CDG3, y finalmente el predio blanco, este último exhibió menores concentraciones. El predio CDG0d si bien estaba cercano a los otros predios, presentaba un manejo totalmente distinto, encontrándose sin actividad agrícola al momento de ser muestreado y sin rastros de haber tenido en un tiempo reciente.

GRUPOS I y II (Serie ISLA HUECHUN) Los predios con mayor número de aplicaciones HCH6 y HCH4 mostraron mayor concentración de Cu y Zn en mg/kg que los predios con menores aplicaciones o predios blancos. El metal con las concentraciones más altas es zinc con 143 mg/kg, valor que se encuentra dentro de los máximos permitidos por la normativa, seguida por el cobre el cual se encontró por lo general entre los rangos de 80 a 100 mg/kg valores bajos para la normativa.

El predio blanco HCH0b en comparación con HCH6 reveló concentraciones menores de Cu, Zn y Pb, para Cd y Ni fue levemente similar entre ambos predios, pero para As se identifica un una cantidad mayor de este elemento en el predio blanco.

Para el predio blanco HCH0a se observaron valores similares a los predios cercanos HCH4 y HCH3 inclusive concentración levemente mayor con este último predio. La concentración total de ET en el suelo sostuvo el orden de Zn>Cu>Pb>As>Ni y Cd.

3.7.1 Comparación de los resultados con la normativa de ET en suelos

Al realizar una comparación entre los valores obtenidos en el muestreo 2014 y la normativa, es posible encontrar predios donde las concentraciones estuvieron muy cercanas a sobrepasar la norma.

Arsénico Los predios más cercanos al máximo permitido fueron: el predio CDG6 de la serie CODIGUA y el predio HCH0a presente en la serie ISLA DE HUECHÚN, faltando solo un 7 % para alcanzar el límite permitido.

Cadmio Los predios que mostraron mayor concentración fueron CDG5 y CDG0c con valores que representaban el 45% de la norma de 2 mg/kg.

Níquel En la concentración de Níquel el predio que expuso la concentración más alta fue CDG6 alcanzando solo un 12 % del máximo permitido de 112 mg/kg.

Plomo El predio que presentó mayor concentración fue HCH0a alcanzando un 29% del máximo permitido de 75 mg/kg.

Cobre En la concentración de Cu el predio que exhibió un 70 % de la norma fue HCH4 de un máximo de 150 mg/kg.



Zinc El predio más cercano a los 175 mg/kg fue el predio CDG5 con un 92% del máximo permitido.

Por ende los ET que presentaron estar más cerca del máximo permitido según la normativa en los predios estudiados fueron: As > Zn > Cu > Cd > Pb y Ni.

3.8 Análisis de la disponibilidad de Ni, Cd, Zn, Cu y Pb en los suelos estudiados.

El suelo puede presentar toxicidad en él, como consecuencia directa de las concentraciones de ET en fracciones bio asimilables de la solución suelo y la fracción coloidal. La fracción asimilable se equipara a la extraída por el agente quelante DTPA que capta todo ion metálico que se encuentre en la solución suelo (Kabata-Pendias, 2000).

Existen estudios que han establecido una alta correlación entre los ET extraídos con DTPA y aquellos disponibles para las plantas (Lindsay y Cox, 1985). Este método se ha utilizado ampliamente para determinar la disponibilidad de metales en el suelo (Monday y col, 2001).

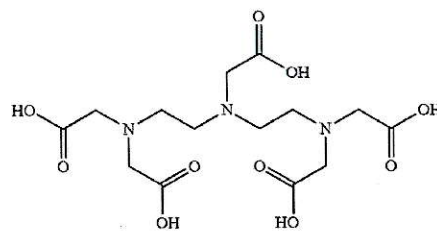


Figura 19 Molécula DTPA (C₁₄H₂₃N₃O₁₀) ácido 2- [Bis [2- [bis (carboximetil) amino] etil] amino] acético

La molécula de DTPA contiene tres grupos carboxílicos y tres aminas terciarias capaces de complejar efectivamente diferentes metales con los que forma complejos 1:1.

Estos complejos permanecen estables, especialmente en medios alcalinos e incluso a temperaturas de hasta 100 °C. El método se realiza a un pH de aproximadamente 7,3 el cual es similar al pH de la solución suelo cercano a las raíces de las plantas.

Por lo tanto, la concentración de ET disponibles, da cuenta de la peligrosidad real para las plantas mientras que la concentración total es válida para identificar la peligrosidad potencial o futura.

En las figuras 18 es posible observar la concentración disponible de cuatro de los cinco ET medida. El As no fue analizado como disponible, por características propias de este elemento traza.

GRUPO I Los predios HCH3, HCH4 presentan diferencias con su blanco en la disponibilidad de zinc y níquel. En el caso de zinc de un 2,4 % que presenta en el HCH0a aumenta a un 7,4 % en el predio HCH3 y a un 8,4 % en HCH4. El porcentaje de níquel si bien fue menor en el predio blanco en comparación con los otros predios, su diferencia no fue superior a 1,5%. El cobre y el plomo resultaron ET más disponibles presentando un 17 % y un 12 % respectivamente en el predio HCH3. El cadmio es el elemento más disponible en el predio blanco.

GRUPO II Conformado por el predio HCH6 y su respectivo testigo HCH0b, sus valores indicaron diferencias en la disponibilidad de Zn, donde el predio blanco presentó 1% disponible de este metal, versus 6,5 % en HCH6, de ET disponible. El níquel también presentó estar más disponible en el predio con aplicación que el predio blanco, obteniendo el doble de porcentaje disponible. El Cu y el Pb son los ET más disponibles en estos

predios y los valores entre el predio blanco y HCH6 son semejantes. Para el metal cadmio el predio HCH0b indicó un 4% más disponible que el predio HCH6.

GRUPO III El blanco CDG0c presenta mayor porcentaje de disponibilidad de Cu y Pb que sus compañeros de grupo, mientras que para Zn, el mayor porcentaje de disponibilidad estuvo en el predio con mayor número de aplicaciones CDG5 con 12%. Para Pb y Cd el blanco presenta el valor más alto disponible alcanzando un 10 y 17 % respectivamente. El elemento Níquel en este grupo mostró en todos sus integrantes valores bajos de disponibilidad alcanzando en su conjunto valores cercanos al 5 %.

GRUPO IV El predio CDG0d indicó los menores porcentajes de disponibilidad para Zn y Pb y Ni con valores de 1,2; 2,0 y 1,9% respectivamente, CDG6 marco los valores más disponibles para Zn, Cu y Pb.

La serie CODIGUA en general presentó mayor disponibilidad de Cu, donde sus valores se encontraron entre 12% como mínimo y 17,5% como máximo, no observándose diferencias mayores al 2,0 % entre los predios y sus respectivos blancos para este elemento.

Por lo tanto los metales más disponibles según el método con DTPA en los suelos estudiados, son el cobre que se encontró entre el 11 y 17 % y el cadmio que se encontró sobre 10 % y 17% de disponibilidad en todos los predios.

En comparación con los valores de los predios blancos, cabe destacar que los metales Ni y Zn se encuentran menos disponibles en predios que no poseen aplicación de lodos. Mientras que para cadmio estos predios presentaron valores altos de disponibilidad superior al 17 % en todos los predios blancos exceptuando CDG0c el cual mostro un 11%.

La biodisponibilidad de los metales está directamente relacionada con las características químicas de los lodos estabilizados y del suelo.

3.9 Discusión General de los Resultados

Si bien la aplicación de lodos evidenció claramente una variación en el pH de los suelos serie ISLA DE HUECHUN y CODIGUA, este descenso no perjudica la fertilidad del suelo, ya que la incorporación acerca los valores de pH a rangos óptimos para la agricultura.

Sin embargo, no deja de preocupar la proyección en el tiempo de este descenso, ya que el poder de amortiguación del suelo es limitado y si bien puede tardar en expresarse es un hecho que este afectará de manera drástica en la disponibilidad de los nutrientes en el suelo, por lo que es necesario la determinación de una tasa máxima de carga, que este puede soportar sin que empeore sus propiedades, y genere un daño ambiental.

La retención de los ET en los suelos, a modo general se relaciona con la textura de ambas series franco arenosa y franca, pertenecientes a familia calcárea, de origen aluvial proyectando altos contenidos de Ca en la sección de suelo muestreada, lo que explica el poder amortiguador del suelo frente al aporte de biosólidos, provocando que las variaciones de pH no presentaran valores menores a 7, y resguardando así la disponibilidad de los ET en el suelo.

Este hecho puede verse reflejado en la relación que tiene el pH con el tipo de arcilla predominante en esta zona de valle central del tipo illita (Besoain,1985), la cual tiene estrecha relación con este parámetro del suelo, ya que las interacciones químicas entre los

ET y las arcillas cambian según el pH del medio, por lo que a altos valores de pH provocan una retención metálica que estará acompañada de liberación de hidrógeno, la cual parece ser más específica que la retención a menores valores de pH, por lo tanto la adsorción aumenta con el pH, así lo confirman estudios realizados por Barbier y col, 2000.

Cabe destacar que las capacidades adsorbentes de la arcilla illita son moderadas, debido a la superficie específica que esta posee de 65-100 m²/g, ya que en comparación con otro tipo de arcillas como lo es montmorillonita, esta cuenta con un área superficial mucho mayor de 700-800 m²/g, característica importante para la interacción sólido fluido. Por ende existe un menor valor de CIC, en la illita aunque los valores que esta presenta son clasificados como altos según la tabla 5, al encontrarse entre 20 y 43 cmol/kg. Estos valores se adjudican a las cargas negativas en la estructura de estos silicatos laminares, junto con las cargas presentes en la materia orgánica, generando una buena efectividad en la capacidad de retención de los iones metálicos, como Pb > Cu > Zn., para este tipo de arcilla.

Por otro lado, el hecho que sean suelos calcáreos, puede presentar cierto riesgo sobre la solubilidad de los ET, ya que al existir mayor número de iones Ca disponibles en el suelo, estos pueden desplazar los iones de ET en los sitios de intercambio, provocando así una competencia de estos sitios activos en la materia orgánica y las arcillas (Antoniadis y Alloway, 2002).

El elemento Cadmio, generalmente se presenta en el suelo como ion Cd²⁺, este ion tiende a ser poco adsorbido por parte de la fracción mineral y por la materia orgánica, sin embargo muestra mayores asociaciones a los componentes de la solución acuosa del

suelo, donde presenta una alta tendencia a formar complejos con el ion Cl^- , más que por las superficies sólidas (Neal y Sposito, 1986). Por lo cual se explica en parte que este elemento se muestre más disponible en la solución suelo por medio del método DTPA.

En este estudio si bien se analizó la concentración de los ET totales y disponibles, se hace necesario para un correcto análisis, comprender de qué forma se distribuyen los ET en el suelo. Por ende es necesario la realización de otro tipo de análisis como por ejemplo extracción secuencial, ya que la solubilidad del metal está controlada por reacciones de adsorción/ desorción, precipitación, disolución, y complejación. Estas reacciones influyen en la distribución de los ET, tanto en la fase líquida como sólida, siendo las responsables de la movilidad y biodisponibilidad de este en el sistema suelo. De esta manera se contaría con información más completa y por ende mayor certeza sobre a qué fracción del suelo se encuentra unido el ET. Por lo tanto se podría evaluar el riesgo potencial que la concentración pudiese tener, además de realizar otros ensayos de disponibilidad que puedan validar los resultados que entrega la extracción con DTPA.

En suelos que cuentan con aplicación de lodos, el arsénico está altamente disponible para las plantas (Carbonell y col, 1995). Sin embargo en este estudio no fue posible la determinación de este ET en la solución suelo, debido a las disposiciones del laboratorio donde se analizaron las muestras sumado a que el método DTPA, se encuentra destinado a generar complejos con los cationes de los ET. Por ende este método no sería estrictamente adecuado para la medición de arsénico disponible en el suelo, debido a que este elemento mayoritariamente se encuentra formando especies aniónicas a medida que el pH sube, a diferencia de lo que ocurre con otros elementos trazas. Este hecho se traduce

a que un aumento en el pH del suelo provocaría una liberación de aniones desde dentro de sus posiciones de cambio, de tal manera que el arseniato y arsenito son liberados (Moreno y col, 2012).

Los suelos que fueron muestreados con aplicación de lodos, presentaron variaciones a nivel químico en los parámetros seleccionados. Sin embargo, este estudio fue preliminar al que debiese realizarse para una eficaz fiscalización y monitoreo, de los reales efectos que los lodos provenientes de PTAS, están generando en la diversidad de sectores a los cuales se les encuentra aplicando en la actualidad, pues es una realidad que cada vez es mayor la cantidad de lodos que se genera en la ciudad de Santiago y a nivel país.

Se hace necesario y urgente un buen entendimiento de las reacciones que el suelo está teniendo a lo largo del tiempo, además de una actualización de la normativa y nuevas alternativas para la utilización junto con un mejoramiento en la forma de disponer este lodo de la manera más sostenible.

3.10 Recomendaciones

- Conformación de una base de datos digital, de los predios que cuenten con los análisis químicos físicos y georreferenciales, donde exista una evolución histórica de los parámetros químicos de los suelos con aplicación y que el valor base de los análisis del suelo sin aplicación sea un dato importante para ser evaluado y comparado a lo largo del tiempo.
- Creación de un Sistema de Inscripción de predios donde su superficie no varíe en el tiempo, ya que la variación de superficie afecta a los resultados químicos del

muestreo, con datos georreferenciales en formato kmz o kml para poder ser utilizados en SIG.

- Establecer un calendario fijo y posterior a la aplicación de lodos, para lograr seguimiento continuo de los predios y determinar tendencias temporales.
- Por parte del servicio fiscalizador, realizar análisis a los predios, de manera que exista un control de los niveles de concentraciones de metales y pH, y que estos análisis sean realizados por un laboratorio certificado y diferente al utilizado por la empresa productora de lodos.
- Regulación en la aplicación anual de lodos, tomando en cuenta la demanda nutricional de los cultivos que se establecerán, para así evitar la lixiviación de compuestos que contaminen las aguas subterráneas. Por ende cuando exista un exceso de nitrógeno en el suelo prohibir el uso de lodos.
- Si un suelo ha superado la norma más de dos veces, no esperar a que este disminuya la concentración naturalmente y volver a aplicar, sino que sacarlo del programa, pues es un predio que tendera a concentrar por ejemplo un metal y si bien este puede bajar su concentración en el tiempo, no asegura que su comportamiento en el tiempo sea estable, pudiendo causar efectos en la salud de las personas.
- Mecanismo de regulación para la realización de seguimiento de los predios agrícolas y con otros usos que sean seleccionados para la aplicación de lodos.

- Definir un periodo máximo de aplicación de lodos a los predios, respecto a lo que el suelo pueda contener sin realizar variaciones drásticas en sus características.
- Respecto al Artículo 23° del Reglamento sobre la tasa de aplicación máxima de 90 Ton/ha anuales, es necesario establecer un periodo de tiempo en meses, indicándose que la siguiente aplicación sea posterior a 12 meses. Debido a que el concepto de año se ha prestado en algunos casos, para que se apliquen 90 toneladas en diciembre y en febrero vuelven a aplicar una cantidad similar dando aportes peligrosos al suelo, ya que 90 toneladas es un aporte alto al suelo, en comparación con la normativa europea.
- Proteger las aguas subterráneas creando límites máximos permitidos de nutrientes y ET.
- La aplicación a suelos degradados debiese estar evaluada por el ente fiscalizador competente, debido a que dependiendo del tipo de degradación del suelo, es el aporte que este puede recibir por un lado, por otro es de suma importancia evaluar que la degradación del suelo muchas veces es por pH bajos o por falta de materia orgánica, por lo cual es aún más peligroso que se acepte una mayor concentración de metales en los lodos estabilizados que serán incorporados.
- Respecto al Artículo 21° letra g sobre la distancia de riberas de río y lagos es importante diferenciar entre distancia con pendientes y sin ellas, pues en terreno se evidenciaron distancias menores a 15 m y además en pendiente. Las pendientes facilitan el movimiento o escurrimiento de agua provenientes del regadío de los predios hacia el río pudiendo contaminar los cursos de agua.

- Que exista un modelo de muestreo donde el número de muestras tenga relación con una coordenada UTM y se respete el número de submuestras por hectáreas según metodología de muestreo del reglamento en cuestión.
- Exigir un plan de término de utilización de predios posterior al tiempo definido como máximo para aplicar lodos, donde se analicen sus propiedades químicas, físicas y biológicas, evaluándose los efectos contaminantes o dañinos que pueda haber tenido y si los tuvo crear un sistema de remediación.

III. CONCLUSIONES

El estudio del impacto de la adición de lodos a los suelos ISLA DE HUECHÚN y CODIGUA, han dado como resultado lo siguiente:

- El pH del suelo fue modificado con efectos estadísticamente significativos que tienen que ver con la composición de los lodos, mostrando una tendencia general a la disminución en los suelos, con el aumento de toneladas aplicadas, manteniéndose dentro de los rangos neutros y mejorándose respecto a los requerimientos para la agricultura.
- La materia orgánica y conductividad eléctrica se incrementan al final de la tercera temporada de aplicaciones en todas las muestras evaluadas. La materia orgánica no tuvo un efecto significativo en el suelo, pese al alto porcentaje entregado por las aplicaciones de lodo.
- La conductividad eléctrica no tuvo efectos estadísticos significativos en la correlación de Pearson debido al comportamiento de meseta que este parámetro mostró.
- La aplicación de lodo como fertilizante, determina incrementos de la carga metálica de los suelos, a medida que aumentaba el número de aplicaciones de lodos en el tiempo, aumentó la concentración total de estos elementos trazas Zn, Cu, Pb, Ni, As y Cd.

- El arsénico es el elemento que a lo largo del tiempo, ha sobrepasado con mayor frecuencia los límites máximos de concentración, convirtiéndose en el ET limitante, para seguir con la aplicación de lodos en las series de suelo seleccionadas.
- No es posible evidenciar un efecto en la CIC, ya que no se poseen datos de años anteriores pero sí se puede atribuir a que gracias a esta y el pH, los ET se han mantenido retenidos en el suelo.
- Los predios de la serie ISLA DE HUECHÚN con aplicación de lodos presentaron mayor concentración de sodio en meq/L que los predios blancos.
- Los predios de la serie CODIGUA con aplicación de lodos presentaron menores valores de sodio en meq/L que sus blancos, lo que se relaciona con un valor mayor de RAS en estos.
- Los predios blancos de la serie CODIGUA presentaron menores concentraciones de Zn, Cu y As que los predios con aplicación de lodos, lo que tiene relación con una mayor CIC en comparación con los predios que contienen lodos incorporados.
- Los cambios observados en los suelos con aplicación de lodos, dependen del tipo de suelo, toneladas aplicadas, tiempo transcurrido después de cada aplicación.
- El ET con mayor porcentaje de disponibilidad según método DTPA es el Cu y el menos disponible es el Ni.
- La biodisponibilidad de los metales está directamente relacionada con las características químicas de los lodos estabilizados y del suelo.

REFERENCIAS

- Acevedo, E., Carrasco, M.A, León, O., Martínez, E., Silva, P., Castillo. G., Ahumada, I., Borie, G., González, S., 2005. Criterios de calidad de suelos agrícolas. p 217.
- Aguas Andinas ,2013 Informe Técnico Cumplimiento DS N°4/2009 MINSEGPRES, Presentado en Enero del año 2014 al Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).
- Alloway, B. J. 1995. Heavy metals in soils. Ed. B. J. Alloway. 2nd Ed. Blackie Academic and Professional, p 339. London. UK.
- Barbarick, K.; Doxtader, K.; Redente, E. y Brobst, R. 2004. Biosolids effects on microbial activity in shrubland and grassland soils. *Soil Science*, 2004, Rev. 169; 176-187.
- Barry G, Shudek P., Becks E. y Moody F. 1995. Estimating sludge application rates to land based on heavy metal and phosphorus sorption characteristics of soil. *Water Res.* Rev.29.
- Bautista, C., Etchevers B., y col. 2004. "Revista Electrónica Ecosistemas". Oaxaca. México.
- Buol S.W, Hole F.D y McCracken R.J, 1998. Génesis y Clasificación de Suelos, pp 102-293, México.
- Besoain, 1985. Mineralogía de las Arcillas de los Suelos, p 423. San José, Costa Rica.
- Berglund, S. Davis, R.D. L'Hermite, P. 1984 Utilization of sewage sludge on land: rates of application and long-term effects of metals. Dordrecht: D. Reidel Publishing, p 216.
- Carbonell, B. A. A., Burló, C. F. M., & Mataix, B. J. J. (1995). Arsénico en el sistema suelo-planta: Significado ambiental. Alicante: Universidad de Alicante.
- Casanova, P, M.Vera, E. Luzio, L. Salazar, G. 2004 Manual de Edafología, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, p.52.
- Chaney, R. 1994. Trace metal movements: soil-plant systems and bioavailability of biosolids applied metals. In Clapp C, Linden D, Larson W and Dowdy R. (Ed). *Sewage sludge: Land utilization and the environment*. SSSA Misc. Publication American Society of Agronomy, pp 27-31.

- Comisión Nacional Del Medio Ambiente (CONAMA). 2000. Decreto N° 123. “Anteproyecto de Reglamento para el manejo de Lodos no Peligrosos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas”. Santiago. Chile.
- Cortés, N. Montalvo, M. 2010. Aguas Calidad y Contaminación. Un Enfoque Químico Ambiental. Cenma pp 219-220. Santiago .Chile.
- Cuevas, B., Seguel S, Elliies S., Dorner F.2006 Efectos de las Enmiendas Orgánicas sobre las Propiedades Físicas del Suelo con especial referencias a la adición de lodos urbanos. Rev. 6:1-12.
- Estudio de Impacto Ambiental, (EIA). 2006. Plan de Manejo de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas La Farfana.
http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=1017060
- Gennaro, M.; Vanni, A.; Ferrara, E.; Petronio, B.; Petruzzelli, G. y Liberatori, A. A, 1991.Characterization study of organic matter in municipal treatment sludges by reversed-phase HPLC chromatography. Journal of Environmental Science and Health, Rev.29: 1115-1138.
- Henríquez, O .2011. Análisis y Criterios Mínimos para la Aplicación de Lodos tratados Provenientes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas en Agrosistemas de la Provincia de Melipilla. Región Metropolitana Tesis de Magister Gestión y Planificación Ambiental Santiago. Chile.
- Instituto Nacional de Estadística (INE).2012. Reporte Estadístico Comunal para la Comuna de Melipilla. <http://reportescomunales.bcn.cl/2012/index.php/Melipilla> Consultada el 15 de Junio del 2014.
- Kabata-Pendias, 2000.Trace elements in soils and plants. Ed. CRC Pres LLC Boca, p 413, Raton, Florida, USA.
- Legret, M.; Divet, L. y Juste, C, 1988. Migration et speciation des metaux lourds dans un sol soumis à des epandages de boues de station d’epuration à très forte charge. Nickel Water Residual, Rev.8: 953-959.

- Lewis, D. L., Gattic, D. K., Novak, M. E., SÁnchez, S. y Pumphrey, C. 2002. Interacciones of pathogens and irritant chemicals in land-applied sewage sludges (biosolids). *BMC Public Health* Rev.2:1118.
- Lieg, M. A., G.E. Varvel, J.W. Doran, Y B.J.Wienhold. 2002. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the western corn belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: pp 596-601.
- Lindsay, W. and. Cox, F. 1985. Micronutrient soil testing for the tropics.
- López-Mosquera M.E., Moirón C., Carral E., 2000. Use of dairy industry sludge as fertilizer for grasslands in Northwest Spain: heavy metal levels in the soil and plants. *Res Cons. Rev* 30, pp. 95-109.
- Marambio, C. y Ortega, R. 2003. Uso potencial de lodos derivados del tratamiento de aguas servidas en la producción de cultivos en Chile. *Revista Agronomía y Forestal UC* Rev.20: 20-23.
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA) ,2010. Suelos de uso Silvoagropecuario Capitulo 9, p 374. http://www.mma.gob.cl/1304/articles-52016_Capitulo_9.pdf Consultada por última vez 24 de Junio del 2014.
- Monday, M. Thompson, M. Mbagwu, C. and Laird, D. 2001. Distribution and movement of sludge-derived trace metals in selected Nigerian soils. *Journal of Environmental Quality*. Rev. 30:1667-1674.
- Moreno, J y Peñalosa 2012 The Fate of Arsenic in Soil-Plant Systems Eduardo Moreno-Jiménez Department Agricultural Chemistry , Universidad Autónoma de Madrid , España.
- Neal, R.H. y Sposito, G. 1986 Effects of soluble organic matter and sewage sludge amendment on cadmium sorption by soils at low cadmium concentrations. *Soil Science*, Rev 142: 164– 172.
- Nriagu, J. y Pacyna, M. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Journal Nature* Rev.333:134-139.
- Obrador, A.; Rico, M.I.; Mingot, J.I.; Álvarez, J.M.1997. Metal mobility and potential bioavailability in organic matter-rich soil-sludge mixtures: effect of soil type and contact time. *The Science of the Total Environment*, Rev.206: 117-126.
- Rocha, M. T.; Shirota, R.1999. Disposição final de lodo de esgoto. *Revista de Estudos Ambientais, Blumenau*, Rev. 3:1-25.

- Sadzawka, A. Carrasco M, A. Grez, R. Mora, M. 2004. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo.
- Silveira, 2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola Rev* 4: 793-806.
- Soil Science Society of America, 1987. Glossary of Soil Science Terms.
- Soil Survey Staff, 1999. Soil Taxonomy. 2nd ed., Agriculture Handbook Rev. 436. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), Sistema de Tratamiento de Aguas Servidas Autorizadas a febrero del año 2014.
<http://www.siss.gob.cl/577/w3-article-5059.html#>.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2012 Sampling During the Application of Biosolids on a Land Test Site, Eric A. Foote; Carolyn M. Acheson; Edwin F. Barth; Ronald F. Herrmann; Richard C. Brenner; D. Bruce Harris; Steven J. Naber; Robert H. Forbes, Jr.; Laura L. McConnell; and Patricia D. Millner *Rev.*7:169–199.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA).1992. Preparation of Soil Sampling Protocols. Sampling Techniques and Strategies. EPA/600/R-92/128.
- United States Department of Agriculture (USDA), Soil Electrical conductivity guides for educators, S.F, p 3.
- United States Department of Agriculture (USDA), Soil Formation and Classification. 2014.
http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soil/edu/?cid=nrcs142p2_054278.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2014.
<http://water.epa.gov/polwaste/wastewater/treatment/biosolids/>
- Wang, 2003. Soil contamination and plant uptake of heavy metals at polluted sites in China. *Journal of Environmental Science and Health. Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, *Rev.*38:823-838.
- Yague, F.C; Hernández M.T y Moreno, J.I.; 1987. Centro de Edafología y biología Aplicada de Segura. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España. p 122.
- Zuñiga Bautista.1999 Introducción al estudio de la Contaminación del suelo por metales pesados. p 22.Universidad Autónoma de Yucatán México.

ANEXOS

ANEXO I

PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO

SERIE: CODIGUA

PROFUNDIDAD cm	0 - 22	22 - 40	40 - 55	55 - 70	70 - 100
DISTRIBUCIÓN PARTÍCULAS POR TAMAÑO %					
< 2					
2-1	0,8	1,7	3,7	1,5	4,0
1-0,5	3,9	9,2	18,8	11,0	16,0
0,5-0,25	15,6	49,1	51,8	51,2	42,5
0,25-0,10	19,4	28,7	20,8	29,7	30,5
0,10-0,05	14,7	6,2	3,1	4,9	5,0
2-0,05	54,4	94,9	98,2	98,3	98,0
0,05-0,002	25,9	4,9	1,8	1,7	0,0
< 0,002	19,7	0,2	0,0	0,0	0,0
TEXTURA	Fa	a	a	a	a
DENSIDAD APARENTE g/cm ³	1,7	-	-	-	-
HUMEDAD RETENIDA 1/3 atm. %	22	5	5	4	5
HUMEDAD RETENIDA 15 atm. %	12	3	3	2	3
HUMEDAD APROVECHABLE %	10	2	2	2	2
CARBONO ORGÁNICO %	2,4	0,5	0,1	0,1	0,1
MATERIA ORGÁNICA %	4,1	0,9	0,2	0,2	0,2
pH H ₂ O	7,7	8,2	8,4	8,4	8,4
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (dS/m a 25° C)	1,0	0,5	0,4	0,4	0,6
CaCO ₃	2,8	1,4	1,2	1,0	1,4
COMPLEJO DE CAMBIO (cmol+/kg)					
Ca	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Mg	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
K	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Na	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3
SUMA DE BASES					
CAPACIDAD TOTAL INTERCAMBIO	20,6	6,4	5,0	3,6	4,3

ANEXO II

SERIE: ISLA DE HUECHUN

PROFUNDIDAD cm	0 - 20	20 - 41	41 - 71	71 - 106	106 - 120
Distribución de partículas por tamaño %					
< 2					
2-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-0,5	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3
0,5-0,25	1,8	1,2	5,5	3,2	4,3
0,25-0,10	14,1	12,7	37,4	31,5	28,0
0,10-0,05	26,0	26,0	32,2	35,6	31,8
2-0,05	42,1	40,0	75,2	70,5	64,4
0,05-0,002	38,5	39,2	15,0	19,7	25,2
< 0,002	19,4	20,8	9,8	9,8	10,4
Textura	F	F	Fa	Fa	Fa
Densidad aparente g/cm ³	1,5	1,6			
Humedad retenida 1/3 atm %	21	22	7	7	10
Humedad retenida 15 atm %	12	13	2	2	4
Humedad aprovechable %	9	9	5	5	6
Carbono orgánico %	1,3	1,1	0,2	0,2	0,3
Materia orgánica %	2,3	1,9	0,3	0,4	0,5
pH H ₂ O	8,1	8,2	8,2	8,1	8,1
Conductividad eléctrica (ds/m a 25° C)	1,4	1,2	1,0	1,2	1,3
CaCO ₃ %	4,3	4,4	2,9	2,6	3,4
Complejo de cambio (cmol ⁺ /kg)					
Ca	N.d.	N.d.	N.d.	N.d.	N.d.
Mg	N.d.	N.d.	N.d.	N.d.	N.d.
K	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1
Na	1,3	1,5	1,0	1,0	1,2
Capacidad total intercambio	25,4	16,6	9,2	11,8	13,6

ANEXO III

Concentraciones máximas de metales en lodos para la aplicación al suelo, exigidas en Reglamento para el manejo de lodos generados en PTAS. D.S.N°4/2009, del MINSEGPRES.

Metal	Concentración Máxima en (mg/kg) de sólidos totales (base materia seca)¹	
	Suelos que cumplen con los requisitos establecidos en este título	Suelos degradados que cumplen los requisitos establecidos en este título
Arsénico	20	40
Cadmio	8	40
Cobre	1000	1200
Mercurio	10	20
Niquel	80	420
Plomo	300	400
Selenio	50	100
Zinc	2000	2800

¹ Concentraciones expresadas como contenidos totales (mg/Kg).