



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
MAGÍSTER EN GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL
PROGRAMA INTERFACULTADES

**ANÁLISIS Y CRITERIOS MÍNIMOS PARA LA
APLICACIÓN DE LODOS TRATADOS PROVENIENTES DE
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS EN
AGROSISTEMAS DE LA PROVINCIA DE MELIPILLA,
REGIÓN METROPOLITANA, CHILE**

Tesis para optar al Grado de Magíster en
Gestión y Planificación Ambiental

OLIVIA DE LAS MERCEDES HENRÍQUEZ HENRÍQUEZ

Directora de Tesis
Geógrafo M.Sc. Sra. Carmen Paz Castro C.

Santiago de Chile
Abril, 2011



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
MAGÍSTER EN GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL
PROGRAMA INTERFACULTADES

**ANÁLISIS Y CRITERIOS MÍNIMOS PARA LA
APLICACIÓN DE LODOS TRATADOS PROVENIENTES DE
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS EN AGROSISTEMAS
DE LA PROVINCIA DE MELIPILLA,
REGIÓN METROPOLITANA, CHILE**

OLIVIA DE LAS MERCEDES HENRÍQUEZ HENRÍQUEZ

Directora de Tesis:

Geógrafo M.Sc. Carmen Paz Castro C.

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Presidente:

Químico Dra. María Margarita Préndez B.

Profesor informante (1):

Químico M.Sc. María Adriana Carrasco R.

Profesor informante (2):

Ingeniero Agrónomo M.Sc. Sergio González M.

Santiago de Chile

Abril, 2011

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias con mucha humildad a todas aquellas personas que me alentaron a terminar este trabajo, el que después de varios intentos se ha concretado. Por todo el apoyo, el cariño y por el tiempo que se tomaron para transmitirme sus conocimientos, sus visiones, su alegría y energía.

A mí amado Andreas, infinitas gracias por su amor y apoyo incondicionales, por su ternura y generosidad en este proceso.

A mi profesor y amigo, Don Sergio Alcayaga Casali, que después de mucho tiempo nos volvimos a reencontrar y que de sus conversaciones surgió terminar esta tarea que aún estaba pendiente. Muchas gracias por su cariño, su sabiduría, generosidad y confianza.

Mi profunda gratitud a Caleu, allí surgió la claridad, se encendió la chispa y prosperó la motivación, a Santiago Correa y Verónica Cuevas Larraín, y a cada uno de mis queridos amigos caminantes, mi abrazo agradecido.

A Carmen Paz, mi profesora patrocinante, por su amistad, por su cariño y por todo el ánimo y ayuda que me entregó para terminar esta investigación.

Al profesor Sergio González Martineaux, por su disposición y sus precisos aportes en la revisión de este documento y a la Sra. María Adriana Carrasco Rimassa por su preocupación y su valiosa contribución en este trabajo.

A Vanessa Ruggiero de Souza que me ayudó con mucha de la información entregada en este documento, a angelitos como Mónica Meza Aliaga, que

surgieron en el camino, a mi colega y jefe Mario Ahumada Campos que me ayudó a romper mi inercia con su fuerza, determinación y amistad.

A mis colegas del Servicio Agrícola Ganadero (SAG) por su apoyo, ánimo y afecto en todo momento. Mi gratitud a Juan Machuca Lagos por su gran disposición en terreno, sus conocimientos y cariño.

A Juan Antonio Garcés Durán por sus valiosos aportes, por su sutileza, su generosidad y por sobre todo su amistad.

A mis padres, sabios y sencillos que han estado detrás de mí, apoyándome silenciosos, sin límite en amor y comprensión.

Gracias al Universo y a lo sutil y femenino que ronda en mí.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULOS	Pág.
RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	3
CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN.....	5
1.1 INTRODUCCIÓN.....	5
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
1.3 ÁREA DEL ESTUDIO.....	9
1.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	11
1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	11
1.5.1 Objetivo general.....	11
1.5.2 Objetivos específicos.....	12
CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL Y ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA.....	13
2.1 ENFOQUE DE SISTEMA EN EL TRATAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
2.1.1 Subsistema urbano y periurbano. Áreas de generación de lodos.....	16
2.1.1.1 <i>Plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)</i>	18
2.1.1.2 <i>Los lodos urbanos</i>	18
2.1.2 Subsistema rural o agrosistema. Áreas de disposición de lodos tratados o biosólidos.....	19
2.1.2.1 <i>Suelos como componente del agrosistema</i>	22
2.1.2.2 <i>La materia orgánica en los agrosistemas</i>	23
2.1.2.3 <i>Efectos de la materia orgánica en los suelos</i>	24
2.1.2.4 <i>Ciclo de nutrientes</i>	25
2.2 ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA.....	27
2.2.1 Antecedentes sobre la producción y destino de lodos en la RM.....	27
2.2.2 Precio de los fertilizantes minerales.....	33
2.2.2.1 <i>Precios de la urea</i>	33
2.2.2.2 <i>Precios del super fosfato triple (SFT)</i>	34
CAPÍTULO 3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	37
3.1 MATERIALES.....	37
3.2 MÉTODOS.....	41
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
4.1 EXPERIENCIAS DE USO DE LODOS EN SUELOS.....	44
4.1.1 Lodos como mejorador de suelos (Convenio SAG-Aguas Andinas).....	44
4.1.2 Lodos como fertilizante (Convenio INIA-Aguas Andinas).....	54
4.1.3 Lodos en plantaciones forestales (Universidad de Chile-	

FONDEF DO111034.....	62
4.1.4 Discusión sobre las experiencias de uso de lodos en suelos.....	67
4.2 PLANES DE APLICACIÓN DE LODOS EN SUELOS DE LA PROVINCIA DE MELIPILLA RM.....	70
4.2.1 Caracterización del suelo como receptor de lodos.....	73
4.2.2 Caracterización de lodos tratados aplicados en suelos..	75
4.2.3 Información de algunos planes de aplicación de lodos....	77
4.2.4 Discusión sobre planes de aplicación de lodos en suelos en la provincia de Melipilla.....	79
4.3 IMPACTOS ASOCIADOS A LA APLICACIÓN DE LODOS EN AGROSISTEMAS.....	81
4.3.1 Impactos ambientales por nutrientes.....	82
4.3.2 Impactos ambientales por elementos traza metálicos.....	84
4.3.3 Impactos ambientales por patógenos.....	86
4.3.4 Impactos al cambio climático.....	86
4.4 ANÁLISIS DE LA NORMATIVA ASOCIADA A LA APLICACIÓN DE LODOS EN SUELOS.....	88
4.4.1 Normativa chilena (D.S. N°4/2009).....	88
4.4.2 Normativa europea (86/278/EEC).....	91
4.4.3 Normativa EEUU (40 CFR Part 503).....	93
4.4.4 Normativas en América Latina.....	94
4.4.5 Comparación de normativas.....	95
4.4.6 Discusión de la normativa chilena sobre la aplicación de lodos en suelos.....	100
4.4.7 Recomendaciones al D.S. N°4/2009.....	103
4.5 SUPERFICIE APTA PARA APLICACIÓN DE LODOS EN LA PROVINCIA DE MEPILILLA.....	105
4.5.1 Superficie apta según exigencias legales.....	105
4.5.2 Superficie apta según información disponible.....	105
4.5.3 Superficie apta según Censo Agropecuario y Forestal....	106
4.5.4 Superposición de capas de información	107
4.5.5 Análisis de resultados.....	109
4.5.6 Cuantificación final.....	119
4.6 CÁLCULO DE COSTOS-FERTILIZANTES MINERALES VERSUS LODOS.....	122
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	128
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	131
APÉNDICE I.....	139
APÉNDICE II.....	144
SIGLAS.....	145

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1:	Algunas propiedades químicas típicas de lodos tratados o biosólido.....	19
Cuadro 2:	Acciones de la materia orgánica (MO) y sus efectos en el suelo.....	25
Cuadro 3:	Plantas de tratamiento, cobertura de alcantarillado, número de habitantes atendidos, caudal promedio y tratamiento secundario de las aguas servidas en la RM....	28
Cuadro 4:	Listado de PTAS en la RM, con datos sobre la RCA, tratamiento de lodos, sistema de secado, humedad, producción y destino del lodo.....	30
Cuadro 5:	Antecedentes de los ensayos realizados a través del Convenio SAG-Aguas Andinas S.A (2001-2004).....	45
Cuadro 6:	Propiedades físicas y químicas iniciales de algunos de los suelos sometidos a aplicación de lodos.....	46
Cuadro 7:	Propiedades químicas iniciales de los lodos utilizados en las aplicaciones para los estudios de SAG e INIA.....	48
Cuadro 8:	Propiedades físicas y químicas finales de los suelos después de dos y tres temporadas de aplicación de lodos, para el estudio SAG (2001-2004).....	49
Cuadro 9:	Rendimiento obtenido en trigo, tomate, avena y maíz choclero (kg ha^{-1}), del estudio INIA en tres temporadas...	55
Cuadro 10:	Tratamientos aplicados y rendimientos obtenido en maíz choclero expresado en porcentaje en relación al tratamiento 100%F en el sector de Chada (2001-2003).....	56
Cuadro 11:	Propiedades evaluadas en el suelo, en cultivos y frutales, luego de tres temporadas de aplicación de lodos (Estudio INIA).....	58
Cuadro 12:	Antecedentes del estudio de la Universidad de Chile. Proyecto FONDEF DO111034.....	63
Cuadro 13:	Propiedades de los lodos compostados y sin compostar provenientes de tres regiones (Valparaíso, O'Higgins y Maule).....	64
Cuadro 14:	Distribución del nitrógeno de los lodos compostados y sin compostar ($\text{g N}/100 \text{ g suelo}$).....	65
Cuadro 15:	Algunas propiedades químicas de los suelos con lodos con y sin compostaje.....	66
Cuadro 16:	Crecimiento medio en área basal por predio, rodal y tratamientos (período 2002-2005).....	67
Cuadro 17:	Planes de aplicación de lodos en las provincias de	

	Melipilla, Chacabuco y experiencias en bosques de eucaliptus.....	71
Cuadro 18:	Propiedades químicas de los suelos utilizados para aplicaciones de lodos en la provincia de Melipilla.....	74
Cuadro 19:	Caracterización química y microbiológica de los lodos utilizado en las aplicaciones entre 2006-2009.....	76
Cuadro 20:	Propiedades químicas de dos predios antes de la aplicación de lodos y al final de la cosecha de cada cultivo.....	78
Cuadro 21:	Composición de nutrientes en fertilizantes y lodo.....	82
Cuadro 22:	Aporte de diferentes nutrientes del lodo a distintas dosis de aplicación.....	83
Cuadro 23:	Aporte de ETM por el lodo a distintas dosis de aplicación.....	85
Cuadro 24:	Concentraciones máximas de ETM en suelo receptor.....	90
Cuadro 25:	Concentraciones máximas de ETM en lodos para aplicación al suelo.....	91
Cuadro 26:	Comparación de normas.....	96
Cuadro 27:	Límites máximos de concentración de ETM en lodos en distintas normativas.....	99
Cuadro 28:	Variables y criterios del D.S. N°4 usados para la obtención de áreas receptoras de lodos en la cartografía..	108
Cuadro 29:	Órdenes de suelos en la provincia de Melipilla.....	109
Cuadro 30:	Clases de drenaje de los suelos en la provincia de Melipilla.....	110
Cuadro 31:	Clases de capacidad de uso de suelos (CCUS) de la provincia de Melipilla.....	113
Cuadro 32:	Distribución del contenido de materia orgánica de los suelos de la provincia de Melipilla.....	116
Cuadro 33:	pH y rango, superficie y distribución de los suelos de la provincia de Melipilla.....	117
Cuadro 34:	Superficie de los suelos arenosos de la provincia de Melipilla según la clase textural.....	117
Cuadro 35:	Superficie apta para recibir lodos en la RM, según criterios anteriores al D.S. N°04/2009.....	121
Cuadro 36:	Cálculo de costos de producción de una hectárea de maíz grano con uso de fertilizante mineral.....	124
Cuadro 37:	Cálculo de costos de producción de una hectárea de maíz grano con aplicación de lodos.....	125
Cuadro 38:	Comparación de costos de producción de una hectárea de maíz grano con fertilizante versus lodos.....	126

INDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Área del estudio.....	10
Figura 2:	Aplicación teórica del sistema.....	15
Figura 3:	Flujos de energía, ciclo de nutrientes y pérdidas en un sistema.....	22
Figura 4:	Plantas de tratamiento de aguas servidas en la RM.....	27
Figura 5:	Precios de la urea, durante el período 2006-2010.....	34
Figura 6:	Precios del superfosfato triple, durante el período 2006-2010.....	35
Figura 7:	Series de suelos presentes en la provincia de Melipilla, RM.....	111
Figura 8:	Clases de drenaje de suelos de la provincia de Melipilla, RM.....	112
Figura 9:	Clases de capacidad de uso de suelos de la provincia de Melipilla, RM.....	114
Figura 10:	Vulnerabilidad de acuíferos en la provincia de Melipilla, RM.....	115
Figura 11:	Clases texturales gruesas de suelos de la provincia de Melipilla, RM.....	118
Figura 12:	Superficie apta para la aplicación de lodos en suelos de la provincia de Melipilla, RM.....	120

RESUMEN

Este estudio analiza la utilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) con un enfoque de sistema. Se entrega información relevante y resultados generados de experiencias de terreno por diferentes instituciones públicas (INIA, Universidad de Chile y SAG) sobre la aplicación de lodos en suelos, considerando al lodo tratado como un mejorador de suelos o como un complemento a la fertilización. Dichos estudios determinan su aplicabilidad en la agricultura.

El saneamiento de las aguas servidas en Chile con la consecuente implementación de PTAS, en especial en la Región Metropolitana (RM), ha provocado una elevada generación de lodos, los que en la actualidad han sido normados para permitir su aplicación en suelos. No obstante, al analizar la normativa chilena (DS N°4/2009) y compararla con otras, se detectan falencias importantes en algunos criterios empleados.

Las experiencias de aplicación de lodos en suelos evidencian efectos positivos sobre las propiedades físicas de los suelos, como la disminución de la densidad aparente y un incremento de la retención de agua. También se mejoran las propiedades químicas, por el aporte de materia orgánica y nutrientes.

No obstante, algunos estudios señalan efectos negativos por la aplicación de lodos, como una acumulación de elementos trazas metálicos (ETM), tanto en suelos (zinc y cobre) como en tejidos vegetales (zinc en granos de trigo). También, se señala un aumento de la conductividad eléctrica (salinidad) de los suelos.

Este estudio determina para la provincia de Melipilla una superficie potencialmente apta para la recepción de lodos de 140.000 hectáreas.

Se concluye que los lodos generados en PTAS pueden aplicarse en agrosistemas sin provocar efectos ambientales adversos, siempre y cuando se consideren criterios mínimos adicionales a los exigidos por la normativa vigente. Además, la aplicación es una alternativa económicamente beneficiosa en comparación a una disposición final en monorellenos o rellenos sanitarios.

Palabras claves: PTAS, lodos tratados, agrosistema.

SUMMARY

This study examines the utilization of sewage sludge coming from sewage water treatment plants (SWTP) with an emphasis on the system. It shows relevant information and results generated from field experiences carried out by different public institutions (INIA, University of Chile and SAG), regarding the application of sewage sludge on soils, considering the treated sludge as a soil amendment or as a fertilization complement. These studies determine its applicability in agriculture.

The sanitation of sewage water in Chile with the consistent implementation of SWTP, especially in the Metropolitan Region (MR) caused an elevated production of sewage sludge, which in actuality has been regulated to allow its use on soils. However, while analyzing the Chilean regulations (D.S.Nº4/2009) and comparing them with others, important shortcomings have been detected in some of the criteria that were used.

The experiences of application of sewage sludge in soils show positive effects on the physical properties of the soils, such as the decrease in bulk density and increased water retention. Chemical properties also improve with the contribution of organic matter and nutrients.

However, some studies suggest negative effects of sewage sludge application, such as an accumulation of trace metal elements (TME) both in soils (zinc and copper) and plant tissues (zinc in wheat grains). An increase of electrical conductivity (salinity) of soils is also being shown.

This study establishes a potentially suitable area for the reception of sewage sludge of 140,000 hectares (345.947 acres) for the province of Melipilla.

It is concluded that the sewage sludge generated in SWTP can be applied in agro systems without causing adverse environmental effects, as long as additional minimum criteria is being considered in addition to those required by current regulations. Furthermore, the application is an economically beneficial alternative to a final disposal in monofill or landfills.

Keywords: SWTP, treated sewage sludge, agrosystem.

CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

A comienzos de la década de los 90 se inició en Chile la construcción de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS). Este proceso se aceleró significativamente a partir del año 2000 con la publicación de la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales (DS.Nº90/2000), lo que ha traído como principal beneficio, la descontaminación de los cursos de aguas de los centros urbanos del país (Baraño y Tapia, 2004; Castro, 2007).

Chile cuenta con PTAS de alta tecnología, consideradas las más modernas del mundo y las más grandes de América Latina. De acuerdo a proyecciones de las propias empresas sanitarias, el índice de cobertura de tratamiento de aguas servidas a nivel nacional alcanzará prácticamente un 100% en los próximos años, dando solución definitiva a los problemas sanitarios de contaminación ambiental y de salud pública (SISS, 2008).

No obstante, una consecuencia no considerada en su momento fue la creciente generación de residuos o subproductos de este tratamiento que son los lodos urbanos, proyectada para el año 2012 en 1.000 Mg d^{-1} (en base húmeda) en la Región Metropolitana (RM), cuya adecuada disposición final no ha sido resuelta hasta ahora.

La experiencia internacional ha considerado diversas alternativas de disposición de los lodos, tal como la incineración, el depósito en rellenos sanitarios, monorellenos y la aplicación directa al suelo (Epstein, 2003). Mosquera-Losada, et al., (2008), señalan que la producción de lodos municipales se ha

incrementado en años recientes en Europa, resultando en un aumento del problema de disposición, la Unión Europea promueve el uso de lodos en agricultura a través del reciclaje de nutrientes. En Australia, según Munn *et al.*, (2000) el 80% de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas son utilizados para mejorar las condiciones de fertilidad de los suelos. Sin embargo, se sabe que existen restricciones de uso del lodo, las que se asocian a la presencia de elementos traza metálicos (ETM)¹ y a una alta carga de microorganismos patógenos (Alloway, 1995).

Por falta de regulación específica en Chile, los lodos han sido dispuestos principalmente en rellenos sanitarios y monorellenos, en ciertos casos con un alto contenido de humedad, lo que ha llevado a serios problemas en el funcionamiento de los rellenos, especialmente por su inestabilidad, y por la generación de biogás y lixiviados.

También han ingresado algunos proyectos de PTAS al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) para la aplicación de lodos en suelos, los que se han acotado a experiencias pilotos en condiciones controladas, restringiéndose sólo a suelos degradados y de bajo potencial productivo. De acuerdo a los criterios aplicados por las autoridades en su momento, no se permitía la aplicación de lodos en suelos de alta calidad agrícola (clases I, II y III).

No obstante, en abril del año 2010 entró en vigencia la normativa: “Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas” (D.S.Nº4/2009), que cambió las condiciones actuales de disposición. Por una parte, se restringe la disposición final en rellenos sanitarios, y por otra,

¹ Según Kabatas-Pendias (2010), el término metal pesado se ha reemplazado por elemento traza metálico (ETM).

se permite, además de la disposición en monorellenos, la aplicación en prácticamente todos los tipos de suelos.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las políticas de saneamiento de las aguas servidas han traído como consecuencia, un alto impacto sobre el desarrollo de tecnologías de tratamiento de las aguas servidas como también beneficios por la descontaminación de recursos hídricos continentales. No obstante, con estos avances, se han generado elevados volúmenes de lodos (Castro, 2007).

El manejo de los lodos exige una serie de consideraciones sanitarias, de restricciones, requisitos y de condiciones técnicas, las que son indicadas en la normativa vigente, sin embargo, surgen interrogantes en cuanto a la tasa de aplicación de lodos, los suelos y su variabilidad espacial entre otros aspectos.

Si bien, los lodos tienen un alto contenido de materia orgánica que favorecen las propiedades físicas intrínsecas del suelo, y mejoran la productividad, también aportan otros compuestos, tales como elementos traza metálicos (ETM) y altas cargas de microorganismos patógenos (Alloway, 1995, Epstein, 2003), los que limitan su uso. Las normativas extranjeras generalmente permiten una aplicación directa de los lodos al suelo, los que han sido utilizados durante décadas, pero se reconocen las restricciones señaladas anteriormente.

En este sentido, ahora Chile cuenta con una normativa específica vigente que permite un manejo y destino final de los lodos, entre éstos, su aplicación en suelos agrícolas, sin embargo, lo anterior podría generar conflictos y trabas en el contexto del modelo agroexportador chileno, dadas las restricciones de

exportación para ciertos productos con algunos países (Ministerio de Agricultura, 2006).

El presente estudio aborda la temática de la aplicación de lodos a través de un enfoque de sistema. Un sistema físico natural², está constituido por dos subsistemas: un subsistema urbano-periurbano, en el cual se generan los lodos como parte del servicio de tratamiento de las aguas servidas y el otro subsistema rural o agrosistema³, en el cual se pueden disponer los lodos. La opción de destino en suelos agrícolas, considera las propiedades químicas del lodo, y sus posibilidades de mejoramiento de algunos tipos de suelos como una alternativa integrada de gestión.

Se pretende profundizar entonces, en la evaluación de experiencias de campo realizadas con lodos en diferentes rubros tanto agrícola como forestal, poniéndose principal énfasis en aquellos factores que inciden en la aplicación de lodos tratados en el agrosistema de la Provincia de Melipilla, RM. Este agrosistema se ha seleccionado y acotado por sus condiciones agrícolas, ya que es una alternativa de disposición de lodos, dada la creciente producción de lodos en la RM, la presencia de componentes en los lodos que restringen su aplicación y las dificultades en su manejo y aplicación.

² Según Bifani (2007), un sistema natural está formado por una parte viva (biótica) y otra no viva (abiótica) que le sirve de base y de sustento. Los diferentes elementos tanto bióticos como abióticos están en un proceso permanente de interacciones mutuas. Así, lo que se conoce como ambiente natural es un conjunto de sistemas interactuantes físicos, químicos y biológicos, que se acostumbra a denominar sistema ecológico o ecosistema.

³ Según Labrador (1996), “un agrosistema corresponde a un sistema funcional de múltiples y complementarias relaciones entre los organismos vivos y su medio, delimitado por unos límites elegidos arbitrariamente y que en el espacio y en el tiempo parecen mantener un equilibrio.”

Se analiza la normativa chilena de lodos recientemente aprobada (D.S. N°4/2009), la que establece requisitos, condiciones y restricciones de manejo. Además se entrega información sobre el estado actual de la aplicación de lodos en la RM.

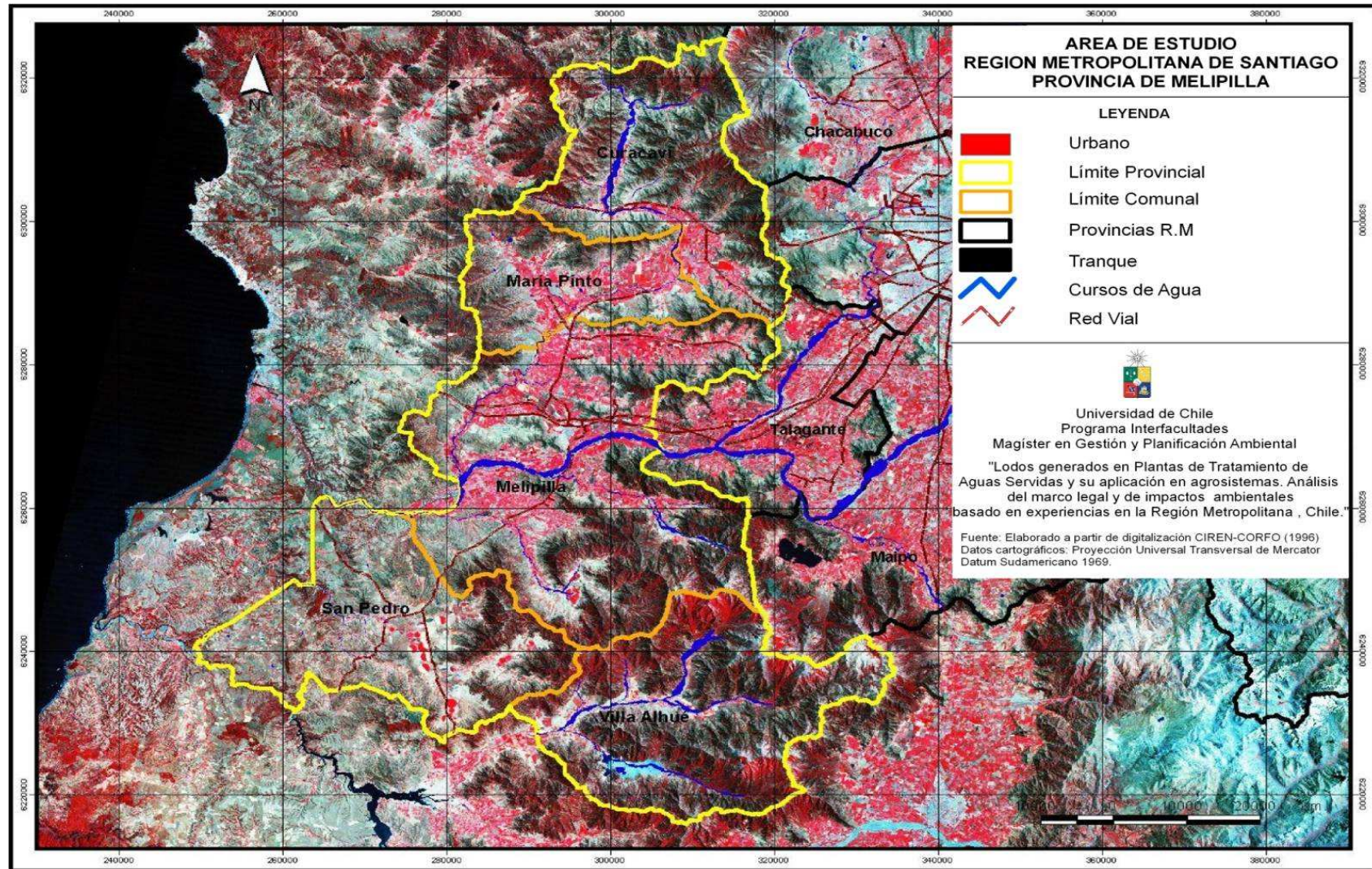
1.3 ÁREA DEL ESTUDIO

Previo a la promulgación de la normativa 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 próxima a las principales plantas de tratamiento de aguas servidas de la Región Metropolitana. Este agrosistema representa una extensa superficie con una zona de alta actividad agrícola con suelos de alta variabilidad y aptos para ser receptores de lodos, presenta una importante conectividad, es decir, es una alternativa de disposición final, de una cantidad relevante de lodos generados, la que debe otorgar sostenibilidad al sistema físico natural, debido a la imposibilidad de contar con sistemas de disposición confinados para estos lodos.

El área principal que se ha seleccionado para desarrollar esta investigación se presenta en la Figura 1 y que corresponde a la provincia de Melipilla, Región Metropolitana. Se encuentra ubicada a 80 km del Gran Santiago, centro urbano más importante y a la misma distancia de las principales plantas de tratamiento de aguas servidas de la región. La provincia de Melipilla presenta condiciones que a la fecha han permitido aplicaciones de lodos en forma controlada.

En esta área se determinará la superficie que puede ser receptora de lodos considerando las exigencias de la normativa.

Figura 1. Área del estudio



1.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Se ha estudiado y se sabe a nivel mundial que los lodos tratados provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) tienen ventajas tanto para los suelos como para los cultivos, dadas principalmente por su alto contenido de materia orgánica y algunos nutrientes. No obstante, dichos lodos también poseen desventajas para los suelos, cultivos y la cadena trófica, dadas por la presencia de metales pesados o elementos traza metálicos (ETM) y patógenos.

La hipótesis de este trabajo sostiene que la aplicación de lodos urbanos puede generar beneficios en agrosistemas sin provocar efectos adversos, siempre y cuando se consideren criterios técnicos y ambientales mínimos que permitan una sostenibilidad del sistema en el tiempo convirtiendo así este residuo en un subproducto de valor agrícola y ambiental.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo general

El objetivo general del presente estudio es analizar:

- 1) Las experiencias de campo con aplicaciones de lodos en agrosistemas principalmente en las provincias de Melipilla y Maipo, Región Metropolitana, las que se contrastan con estudios realizados en el extranjero, y
- 2) La normativa aprobada en Chile y la existente en el extranjero, a fin de determinar criterios técnicos bajo los cuales dicha aplicación sea beneficiosa y no genere efectos adversos para el agrosistema.

1.5.2 Objetivos específicos

- a) Analizar los resultados de investigaciones de aplicación de lodos en agrosistemas durante más de dos temporadas agrícolas en la provincia de Melipilla y de Maipo y una experiencia realizada en el ámbito forestal.
- b) Identificar los impactos o efectos generados en agrosistemas por aplicación de lodos.
- c) Cuantificar la superficie apta para la aplicación de lodos en la provincia de Melipilla, basada en la información existente y bajo los criterios técnicos de restricción de uso de los lodos establecidos en la normativa vigente.
- d) Determinar los costos de producción de una hectárea de maíz considerando como insumos el uso de fertilizante mineral y el lodo.
- e) Analizar la normativa chilena de aplicación de lodos, Decreto Supremo N° 4 de 2009 y normas extranjeras tal como la USEPA y europea y realizar una comparación entre ellas.
- f) Entregar, si corresponde, recomendaciones de criterios mínimos al D.S.N° 4/2009 para evitar riesgos ambientales de los agrosistemas.

CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL Y ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA

2.1 ENFOQUE DE SISTEMA EN EL TRATAMIENTO DEL PROBLEMA

La Universidad Autónoma de Madrid (1995), señala que la aplicación al suelo de lodos procedentes de depuradoras de aguas residuales urbanas, introduce apreciables mejoras en su productividad y en la recuperación de ecosistemas degradados. La gestión de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas, en este estudio será abordada a través del concepto de teoría de sistema, un sistema físico natural compuesto por dos subsistemas interrelacionados, esto es, un subsistema urbano y peri-urbano que genera lodos y un subsistema rural o agrosistemas que los recibe, es decir, un sistema físico natural que interrelaciona sociedad y naturaleza.

Un sistema, según Bertalanffy (2000), se define como un conjunto de elementos que se relacionan entre ellos y con el medio, permitiendo un enfoque global del objeto de estudio. El mismo autor señala que la teoría general de los sistemas afirma que las propiedades de los sistemas no pueden ser descritas significativamente en términos de sus elementos separados. La comprensión de los sistemas solamente se presenta cuando se estudian los sistemas globalmente, involucrando todas las interdependencias de sus subsistemas.

Según Chiavenato (2004), el término sistema es generalmente empleado en el sentido de sistema total y tiene muchas connotaciones. Los componentes necesarios para la operación de un sistema total son llamados subsistemas los que, a su vez, están formados por la reunión de nuevos subsistemas más detallados. Así, tanto la jerarquía de los sistemas como el número de subsistemas dependen de la complejidad intrínseca del sistema total.

Los sistemas pueden operar en serie o en paralelo. No hay sistemas fuera de un medio específico (ambiente), es decir los sistemas existen en un medio y

son condicionados por él. El medio (ambiente) es el conjunto de todos los objetos que, dentro de un límite específico pueden tener alguna influencia sobre la operación del sistema. Los límites (fronteras) son la condición ambiental dentro de la cual el sistema debe operar. El sistema se compone de subsistemas y éstos a su vez tienen las mismas funciones y características de los sistemas.

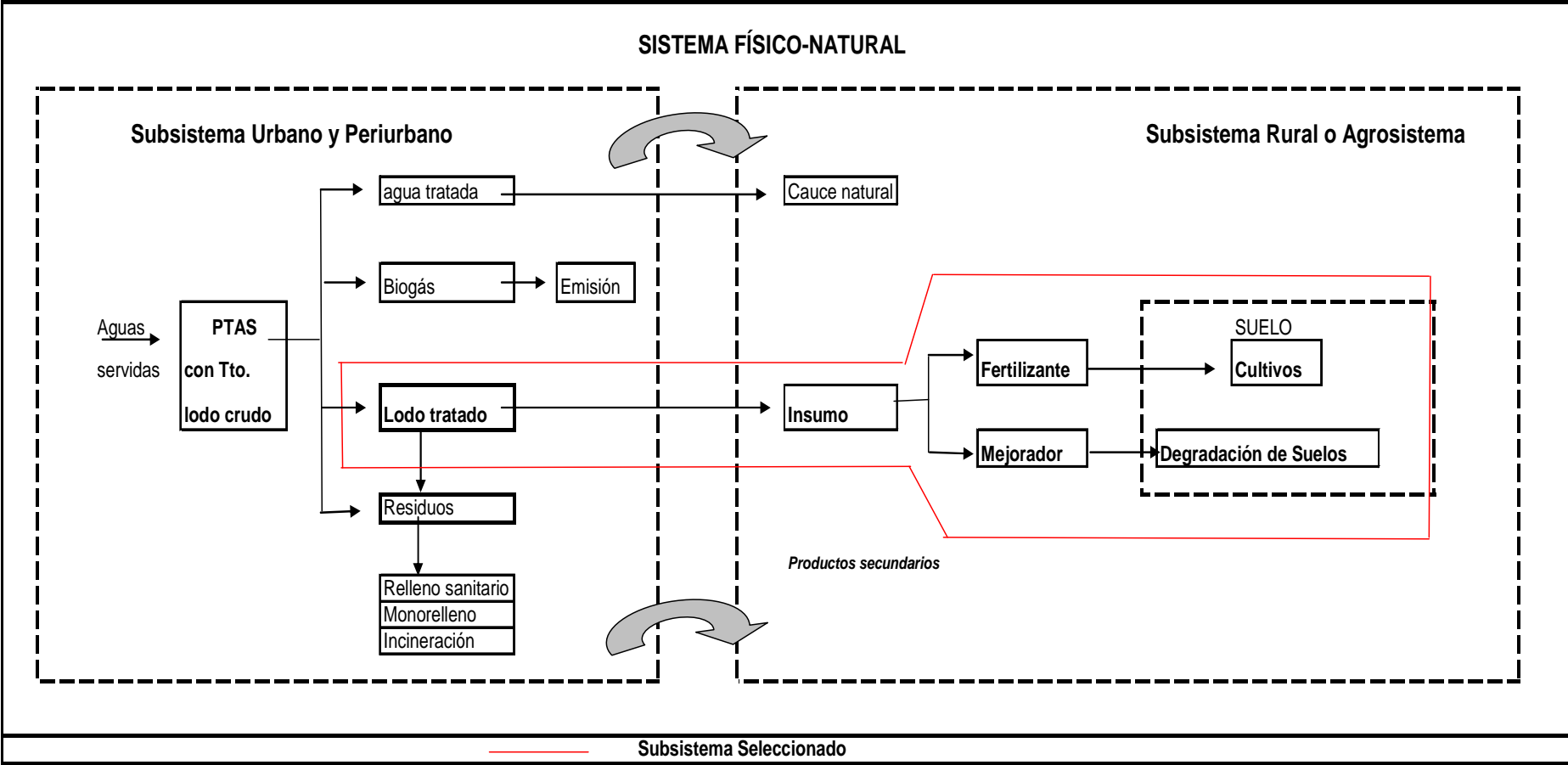
La gestión de los lodos puede ser abordada como una aplicación teórica de sistemas que comprende flujos de productos, y dependiendo de la decisión adoptada genera energía e información (Margalef, 2002).

Este concepto se representa en la Figura 2, como un esquema general del sistema escogido, abordado en este estudio. El lodo tratado, al ser considerado un *residuo urbano*, desde una perspectiva de seguridad sanitaria y de suelos, podría ser dispuesto en rellenos sanitarios, monorellenos o eliminado vía incineración, sin embargo, estas opciones no resuelven la problemática.

Se sabe que nuestro país tiene déficit de rellenos sanitarios (Sanfeliu, T., Jordán, M. y Boix, A. (2005), para enfrentar la gestión de los residuos sólidos domésticos, por una parte, los monorellenos requieren sofisticados pretratamientos y medidas constructivas y operativas para garantizar su estabilidad y por lo demás no se cuenta con plantas de incineración para este tipo de residuos.

Por otra parte, el lodo puede utilizarse como un *insumo*, ya sea como *mejorador de suelos y/o aportante de nutrientes* en el subsistema rural, que debe entenderse como una parte del sistema físico-natural, alternativa de reuso que puede mantener al suelo en un equilibrio dinámico y susceptible de intercambiar materia y energía con el medio circundante y que le otorga sostenibilidad al sistema.

Figura 2. Aplicación teórica del sistema



El enfoque de sistema es abierto ya que según Chiavenato (2005), presenta relaciones de intercambio con el ambiente, a través de entradas y salidas. Los sistemas abiertos intercambian materia y energía regularmente con el medio ambiente, son eminentemente adaptativos, esto es, para sobrevivir deben reajustarse constantemente a las condiciones del medio.

Los lodos urbanos constituyen un producto generado en las PTAS, es decir corresponden a salidas del subsistema urbano y periurbano; presentan características físicas y químicas que hacen posible su uso agrícola, es decir, se convierten en una entrada al subsistema rural o agrosistema. Para alcanzar un equilibrio en el sistema físico-natural, la utilización de los lodos en el subsistema rural o agrosistema debe ser acorde a la capacidad de adecuación de dicho agrosistema.

Epstein (2003), señala que debe hacerse una distinción respecto de la definición de lodo y biosólido, ya que el lodo es un término genérico que se usa para diferentes materiales tanto de tipo orgánico como inorgánico que están sometidos a un tratamiento; mientras que el biosólido es un término que se aplica a todos aquellos residuos biológicos que han sufrido un proceso de tratamiento.

2.1.1 Subsistema urbano y periurbano. Áreas de generación de lodos

Para Rueda (1997), la ciudad en el campo de la teoría de sistema abarca cualquier realidad conocida, desde el entorno hasta el universo, pasando por la molécula, la célula, el organismo, el bosque o la ciudad.

Un subsistema urbano corresponde al conjunto de componentes dinámicas que componen una ciudad y sus interrelaciones. Esta definición puede ser aplicada a un conjunto de ciudades o a una ciudad, que tienen una interrelación o flujos entre ellas que son importantes en función de las

distancias, de los servicios que ofrece, del número de habitantes y de las infraestructuras de transporte y comunicaciones que facilitan las relaciones sociales, económicas, entre otras.

Por su parte, el subsistema periurbano se define, según Solís y Brondolo (1999), como un espacio que no es rural ni urbano, una franja que presenta características de ambos, una zona de fricción permanente con intercambios muy activos que se encuentran regidos por la ciudad, lo que provoca un flujo totalmente asimétrico de materia y energía. Dicha zona de fricción es muy dinámica y compleja, y tiene todas las características de una inter fase ecológica y de una frontera socio-productiva.

Para Morello (1996) el concepto de periurbano se refiere a un espacio donde se acumulan discontinuidades de servicios urbanos y rurales, así como materiales de difícil y lenta digestión y dilución biológica.

El subsistema periurbano, corresponde a una interfase, porque allí disminuyen varios servicios del subsistema urbano, como los de agua potable, electricidad, desagües pluviales, recolección de basura, cloacas; y también se atenúan los "servicios ecológicos" que provee el medio rural como la capacidad de fijar energía solar en forma de energía química y transformarla en alimentos, de descomponer materia orgánica, reciclar nutrientes, regular el agua y formar suelo. Sin embargo, este espacio se carga continuamente de productos del metabolismo de la ciudad como efluentes, basura, escombros, residuos sólidos industriales, produciéndose un desequilibrio entre los aportes y la capacidad natural de resolución de los mismos. Esta situación genera degradación del sistema natural y espacios con altos costos de recuperación, para la consecución de sus funciones específicas (Solís y Brondolo, 1999).

2.1.1.1 Plantas de tratamientos de aguas servidas (PTAS)

Una planta de tratamiento de aguas servidas puede ser considerada un componente del subsistema urbano y periurbano, se relaciona con otros elementos o subsistemas y a través de la circulación de energía produce variaciones de estado de otros elementos. Es así que, el agua servida ingresa a este componente del subsistema urbano, es sometida a tratamientos físicos, químicos y biológicos, donde se le extraen distintos contaminantes y se obtienen otros productos tales como agua tratada, metano, lodos, los que a su vez son devueltos al subsistema urbano o periurbano o bien, al subsistema rural o agrosistema como un subproducto ó biosólido.

2.1.1.2 Los lodos urbanos

Se puede decir que el agua servida corresponde a un producto del metabolismo de la ciudad y que su tratamiento constituye un servicio del subsistema urbano (Solís y Brondolo, 1999). De este servicio se genera un producto residual, los lodos, fundamentándose en el aporte y concentración de materia y energía. El agua es consumida en la ciudad y es transformada, luego de su consumo, en el propio sistema urbano. Las áreas urbanas tienen una gran concentración de energía por unidad de superficie en comparación con áreas naturales. La magnitud de estos flujos energéticos comienzan a tener importancia cuando se alteran los equilibrios del sistema, en cualquier parte donde se concentren (Rueda, 1997).

El lodo por su parte, es un subproducto no peligroso, semisólido o líquido generado en las PTAS, dentro del subsistema urbano o periurbano. Presenta una composición química variable, atribuible a las diferencias considerables en clima, forma y uso del terreno, distribución de la población, problemas de calidad del agua y del estatus económico de la ciudad (Naidu, *et al.*, 2004). Epstein (2003) señala que las propiedades químicas de los lodos tratados o biosólidos son afectadas por varios factores entre ellos, la calidad de las

aguas servidas, la extensión del tratamiento, las modalidades de procesos y los métodos de estabilización. Según Metcalf y Eddy (1995), los lodos producidos en las operaciones y procesos de tratamientos de las aguas residuales suelen ser un líquido o líquido semisólido con un contenido en sólidos, dependiendo de las operaciones y procesos de tratamiento variable entre 0,25 y 12% en peso, sus características químicas están relacionadas con su contenido orgánico, nutrientes, concentración de metales y químicos orgánicos tóxicos, en el Cuadro 1 se presenta algunas propiedades.

Cuadro 1: Algunas propiedades químicas típicas de lodos tratados o biosólido

Propiedades	Unidad	Rango
Sólidos totales	%	0,83-1,16
Sólidos volátiles	%	59-88
Aceites y grasas	%	0,5-12
Proteínas	%	32-41
Nitrógeno	%	2,4-5
Fósforo	%	1,2-4,8
Potasio	%	0,4-0,5
pH		6,5-8,0
Alcalinidad	mg/l (Ca CO ₃)	580-1.100
Ácidos orgánicos	mg/l (HAc)	1.100-1.700
Contenido de energía	kcal/kg	18.500-23.000

Fuente: Metcalf y Eddy (1995)

2.1.2 Subsistema rural o agrosistema. Áreas de disposición de lodos tratados o biosólidos

Altieri (1999) define un sistema agrario, sistema agrícola, agroecosistema, como un sistema abierto que recibe insumos del exterior dando como resultado productos que pueden ingresar en sistemas externos. Por otra

parte, Labrador (2001), señala que un agrosistema o sistema agrícola es un ecosistema originado por la intervención humana, que presenta un equilibrio meta estable, una estructura simplificada y frágil, que especializa sus comunidades, y regula de manera particular sus poblaciones, que mantiene ciclos abiertos de materiales y dirige su flujo energético hacia la obtención de productos cotizados, dando como resultado, una coevolución integrada entre cultura, economía y medio ambiente. Algunos autores señalan que el concepto de agrosistema corresponde a una unidad ambiental en la que se desarrolla la actividad agrícola, ganadera y forestal.

En los sistemas agrícolas, el aporte de materia orgánica es discontinuo y depende del ser humano; el estiércol, los residuos de cosecha, la paja incorporada, los abonos verdes y las diversas enmiendas orgánicas, cuando se producen, sustituyen la hojarasca, siendo la descomposición activada por el enterramiento, el laboreo y el aporte simultáneo de abonos minerales. Por otra parte, los aportes suceden en épocas del año que no tienen coincidencia con la máxima actividad microbiana y no está relacionado lo extraído en calidad ni cantidad con lo aportado (Labrador, 1996).

Al hablar de agrosistemas, el valor absoluto del contenido de materia orgánica en el suelo es tan importante como, la velocidad con la que la materia orgánica evoluciona y el equilibrio al que tienden los procesos de humificación y mineralización, específicos de la heterogeneidad de los diferentes medios y cultivos (Labrador, 2001).

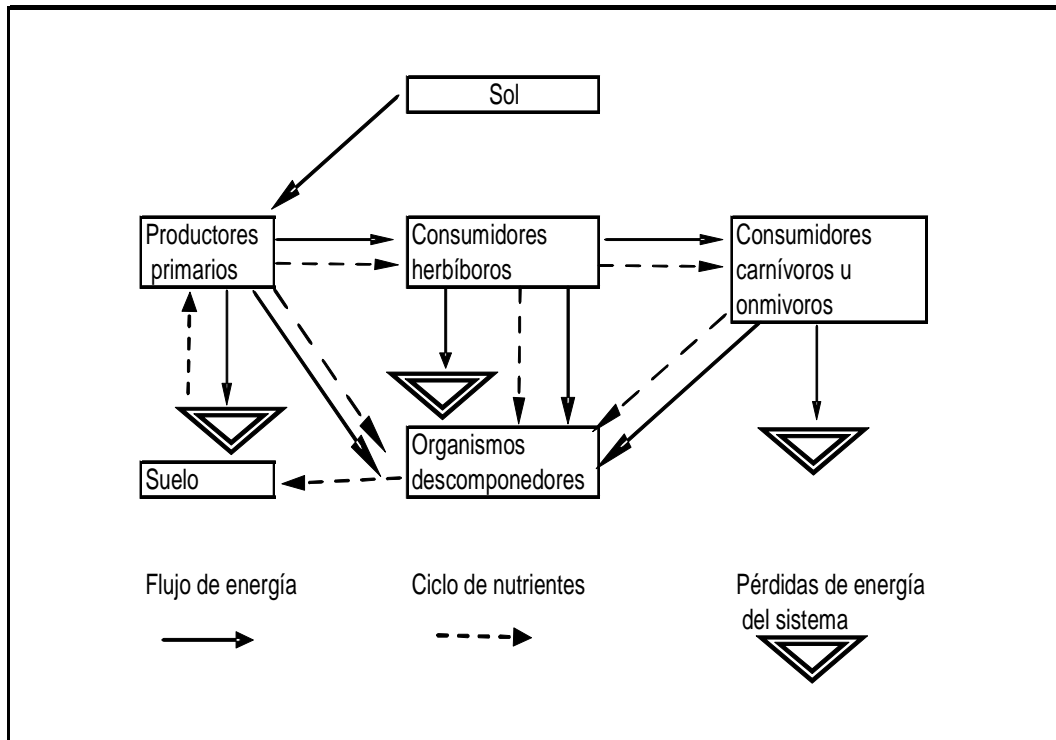
Los nutrientes del suelo pasan a lo largo del tiempo por los distintos compartimentos que integran el sistema, siguiendo un ciclo natural (ciclo biogeoquímico), que los dirige desde su absorción por las raíces, o su inmovilización durante un cierto período en la biomasa microbiana, hasta su vuelta de nuevo al suelo. Esta dinámica, puede contemplarse a mayor escala con múltiples ciclos que afectan a cada uno de los distintos elementos, condicionándose e interrelacionándose unos con otros y en los que los

microorganismos actúan, entre otras cosas, intercambiando elementos entre las partes bióticas y abióticas del sistema, asegurando el retorno del anhídrido carbónico a la atmósfera y evitando la acumulación indefinida de los restos orgánicos (Labrador, 2001).

Odum (1972) se refiere a los agrosistemas como ecosistemas domesticados cuya fuente de energía, al igual que los ecosistemas naturales, es el sol. Sin embargo, difieren de éstos en que las fuentes auxiliares de energía para aumentar la productividad son combustibles fósiles, además de la fuerza de trabajo humana, animal y de maquinaria. El control del sistema es externo y orientado a objetivos particulares, en contraste con el control interno de retroalimentación de los ecosistemas naturales.

Por otra parte, para Labrador (2001) en los agrosistemas, el flujo de energía es alterado con la intervención humana, rigiéndose las entradas de energía según necesidades externas al sistema y según su nivel de artificialización y teniendo que aportar además, en mayor o menor grado, fuentes auxiliares de energía que pueden ser humana, animal o combustible para aumentar su producción. Esto les convierte en sistemas abiertos no auto-sostenibles, donde considerable cantidad de energía, no se acumula en forma de biomasa para un consumo interno del propio sistema, sino que es exportada con cada cosecha, como se indica en la Figura 3.

Figura 3. Flujos de energía, ciclo de nutrientes y pérdidas en un sistema



Fuente: Labrador (1996), basado en Lambert (1981)

2.1.2.1. Suelos como componente del agrosistema

Según Sumner (2000), el suelo corresponde a una frágil y delgada capa producto de la meteorización y parcial descomposición de formaciones geológicas. A través de procesos de formación de suelo de tipo geológicos, topográficos, climáticos, físicos, químicos y biológicos se forma una entidad viviente compuesta de una asociación de partículas inorgánicas o minerales complejos vinculados con la materia orgánica, y perfundidos por los gases. Cuando ingresa agua al suelo se genera un transporte de nutrientes, y este complejo sistema se convierte en el sustrato fértil. La zona de la pedósfera, un soporte vital, es un medio biológicamente activo, poroso, y estructurado que integra y disipa los flujos de masa y energía.

Demolón (1965) define suelo como una formación natural de la superficie, de estructura suelta y espesor variable, resultante de la transformación de la roca madre subyacente bajo la influencia de diversos procesos físicos, químicos y biológicos. A su vez, Luzio (2010) señala que el suelo es el resultado de la acción acumulada de flujos de energía y materia a partir de un material de origen, procesos que tienen como efecto, entre otras cosas, la transformación progresiva de los materiales de partida en constituyentes secundarios.

Brady (1990) se refiere a los suelos como cuerpos naturales en el que crecen las plantas, ellos proporcionan el punto de partida para una próspera agricultura, pero también son utilizados para absorber los residuos procedentes de los sistemas de aguas residuales, desechos urbanos, industriales y de fuentes animales. Por su parte, Sumner (2000) señala que el suelo no sólo sirve para fomentar y sostener la vida en sus múltiples formas, también actúa como un filtro viviente de los residuos generados por actividades humanas y animales. En esta función, limpia, purifica y recicla el agua y desintoxica y vuelve inofensivos la mayoría de las toxinas y agentes patógenos que de otro modo irremediablemente contamina y degrada el medio ambiente.

2.1.2.2 La materia orgánica en los agrosistemas

Sumner (2000), señala que la fracción orgánica de los suelos a pesar de representar una proporción pequeña pero variable de la masa total del suelo, puede ejercer una profunda influencia en las propiedades del suelo y en el funcionamiento de los ecosistemas.

El tipo y cantidad de materia orgánica del suelo presentan una variabilidad espacial importante entre un ecosistema y otros y dentro de cada uno de ellos, tanto vertical como horizontalmente. Su dinamismo está determinado por la incorporación al suelo de restos de origen vegetal, animal y microbiano y la transformación y evolución de éstos, mediada por la interacción de

múltiples procesos, principalmente los procesos de mineralización (paso a formas inorgánicas) y la humificación (reorganización y neoformación de productos orgánicos). El retorno anual de la materia orgánica al suelo depende de la zona climática, tipo de vegetación y uso del suelo (Labrador, 1996; Porta *et al.*, 2003;).

Por otra parte, un suelo de cultivo que recibe periódicamente aportes de materia orgánica (y otras enmiendas compensadoras de posibles carencias o desequilibrios), que mantiene una actividad edáfica óptima, que presenta una activa mineralización de la materia orgánica y que al mismo tiempo genera significativas cantidades de humus, le permite mantener un adecuado dinamismo a su ciclo orgánico (Labrador, 1996).

2.1.2.3 Efectos de la materia orgánica en los suelos

La materia orgánica del suelo preferente humificada es un constituyente esencial del sistema edáfico ya que por su constitución y propiedades tiene influencia sobre las propiedades que definen la fertilidad global de suelos agrícolas y por ende el óptimo desarrollo de los cultivos. Es la responsable directa de la mayoría de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Labrador, 1996, Aguilera y Rodríguez, 2005).

Dentro de los beneficios en el suelo, la materia orgánica ayuda a la formación y estabilización de los agregados, al desarrollo de raíces, estimula la adsorción e intercambio catiónico, incrementa el poder tampón del suelo, reduce la acción de sustancias tóxicas, mejora la capacidad de retención de humedad y mejora la porosidad y aireación facilitando el laboreo (Brady, 1990, Munn, *et al.*, 2000).

Según Terrón (1988), las principales acciones atribuidas a la materia orgánica y sus efectos asociados en el suelo se señalan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Acciones de la materia orgánica (MO) y sus efectos en el suelo

Propiedades	Efectos de la MO
Físicas	Aumenta la capacidad calorífica, la estabilidad estructural, la estructuración, la capacidad de retención hídrica, la permeabilidad hídrica y gaseosa, presencia de suelos más calientes en primavera, reduce las oscilaciones térmicas, agrega partículas elementales, mejora estructura y porosidad en suelos arcillosos y cohesiona a los suelos arenosos, facilita el drenaje y las labores, reduce la erosión, la evaporación y mejora el balance hídrico.
Químicas	Aumenta la capacidad tampón, la capacidad de intercambio catiónico, regula el pH, mantiene los cationes en forma cambiante, forma fosfhumatos y quelatos, y mantiene las reservas de nitrógeno.
Biológicas	Favorece la respiración radicular, la germinación de las semillas, el estado sanitario de órganos subterráneos, regula la actividad microbiana, es fuente de energía para microorganismos heterótrofos. El CO ₂ desprendido favorece la solubilización mineral, contrarresta el efecto de algunas toxinas, modifica la actividad enzimática, activa la rizogénesis y mejora la nutrición mineral de los cultivos.

Fuente: Terrón (1988)

2.1.2.4 Ciclo de nutrientes

La dinámica de un ecosistema o agrosistema comprende dos procesos, uno de ellos es el ciclo de nutrientes. Los procesos biológicos y geoquímicos movilizan los nutrientes entre las partes orgánicas e inorgánicas del ecosistema. El otro proceso corresponde al flujo de energía, que fluye a través del ecosistema, entra como energía solar y sale como energía calórica. La energía y los nutrientes se reciclan de tal manera que pasan a los productores primarios (autótrofos) luego a los consumidores primarios (herbívoros) y después pasa a los consumidores secundarios (carnívoros), (Campbell y Reece, 2007; Glynn y Heinke, 1999).

Según Labrador (2001), a través de un complejo entramado de ciclos, los elementos circulan dentro del agrosistema; en esta dinámica el componente vivo del suelo tiene una gran importancia para determinar el movimiento de los nutrientes y su distribución. En el suelo, los microorganismos actúan como reactores, por lo que gracias a ellos tiene lugar una serie de procesos que evitan que los componentes orgánicos se acumulen indefinidamente. Esto hace posible la existencia de ciclos de elementos en la naturaleza (Porta *et al.*, 2003).

Dentro de la fracción orgánica del suelo se acumulan grandes reservas de nutrientes como por ejemplo nitrógeno (N) y fósforo (P), ambos experimentan ciclos de mineralización e inmovilización y dependiendo de la actividad del suelo, se tiende a uno u otro proceso (Labrador, 1996). Los microorganismos juegan un rol dentro de un ciclo al degradar y sintetizar compuestos orgánicos y cuando mueren liberan la energía de sus constituyentes, la que vuelve a estar disponible para otros microorganismos en el sistema (Porta *et al.*, 2003). Los distintos elementos químicos, vuelven a pasar por un mismo compartimiento del medio, considerado como un sistema global, después de cierto lapso de tiempo.

En la mayoría de los suelos, Labrador (2001) señala que el nitrógeno orgánico representa más del 95% del nitrógeno total, repartido en proteínas (34-50%), ácidos nucleicos (3-10%), amino azúcares (5-10%). El balance de nitrógeno del suelo, se equilibra más o menos a largo plazo según el régimen de aportes y pérdidas (Porta *et al.*, 2003).

Brady (1990) indica que el 20 al 80% del fósforo total en el suelo se encuentra en forma orgánica, mientras que Labrador (1996) restringe este contenido de 20 al 60%, el que se encuentra en el suelo como fitina, ácidos nucleicos, y de esta proporción el 90% lo constituyen complejos órgano-minerales.

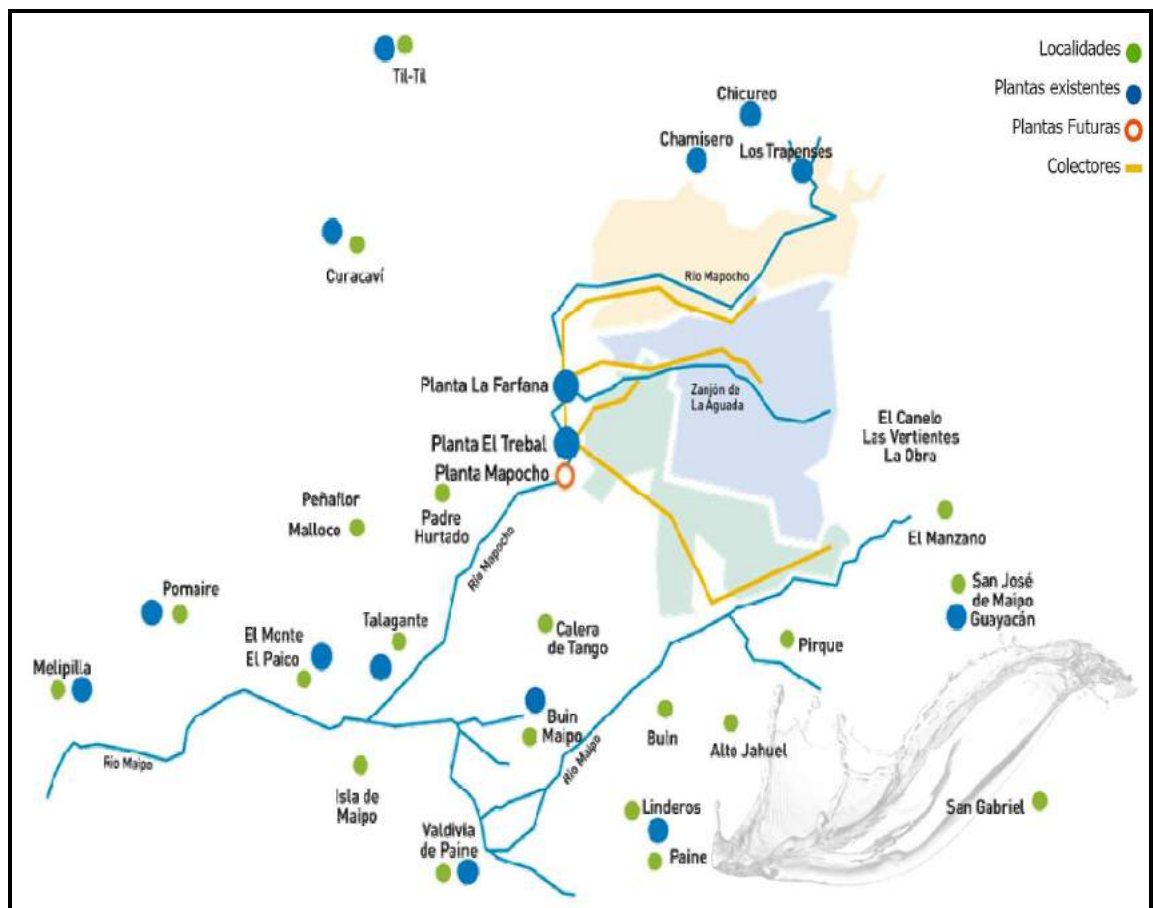
2.2 ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA

2.2.1 Antecedentes sobre la producción y destino de lodos en la RM

A fines de los años 80, en Chile se estableció una nueva forma de regulación para los servicios sanitarios, definida a través de un conjunto de leyes y reglamentos, que constituyen la Normativa Sanitaria, y que definen la actual organización institucional del sector sanitario basada en el régimen de concesiones bajo el cual los prestadores de servicios sanitarios deben operar.

En este contexto en la Región Metropolitana se han construido más de 10 PTAS, cuya ubicación se presenta en la Figura 4.

Figura 4. Plantas de tratamiento de aguas servidas en la RM.



Fuente: Aguas Andinas, Abril 2010

El Cuadro 3 presenta algunas características de las PTAS en la RM, correspondiente al Gran Santiago y localidades.

Cuadro 3. Plantas de tratamiento, cobertura de alcantarillado, número de habitantes atendidos, caudal promedio y tratamiento secundario de las aguas servidas en la RM.

PTAS	Cobertura alcantarillado (%)	Número habitantes atendidos	Caudal promedio aguas servidas (m ³ s ⁻¹)	Tratamiento secundario de aguas servidas
El Trebal	68,0	1.700.000	4,4	LAC ⁽²⁾
La Farfana	72,0	3.293.000 (2010) 3.780.000 (2027)	8,8 (2010) 9,4 (2027)	LAC
Mapocho	87,1	Etapa I=1.258.305 Etapa II=1.938.546	Etapa I= 4,4 Etapa II=2,2	LAC
Melipilla	92,4 (2006) 95,2 (2020)	67.964 (2006) 92.609 (2020)	0,21	SBR ⁽³⁾
San José de Maipo	s.i ⁽¹⁾	s.i.	0,02	LAC, ZO ⁽⁴⁾
El Monte, Lo Chacón, El Paico	70,9 (2002) 98,0 (2008)	17.013 (2003) 28.004 (2024)	0,04 (2003) 0,06 (2024)	SBR
Paine	s.i.	s.i.	0,09	LAC
Valdivia de Paine ^(*)	5,0 (2003) 95,0 (2023)	94 (2003) 3.020 (2023)	0,02 (2003) 0,01 (2023)	STP ⁽⁵⁾
Talagante	56,0	183.000 (2003) 280.000 (2009)	0,41 (2003) 0,61 (2009)	LAC
Curacaví	93,1 (2004) 100,0 (2025)	15.736 (2004) 24.867 (2025)	0,03 (2004) 0,05 (2025)	SBR
Buin-Maipo	89,0 (2005) 96,0 (2020)	53.358 (2014) 60.742 (2020)	0,12 (2014) 0,14 (2020)	LAC SBR
Til-Til	37,8 (2005) 100,0 (2020)	4.355 (2006) 6.100 (2020)	0,01 (2006) 0,01 (2020)	LAC AE ⁽⁶⁾
Isla de Maipo ^(#)	s.i.	8.000 (2014) 12.250 (2019)	Etapa I=0,01 Etapa II= 0,02	LAC

Fuente: Basado en información del SEIA (www.e-seia.cl)

(*) Hay infiltración de aguas subterráneas a la red de alcantarillado,

(#) Proyecto en proceso de calificación ambiental

(1) s.i. = Sin información, (2) LAC = Lodos activados; (3) SBR = Reactor Secuencial Tipo Batch, (4) ZO= Zanja de oxidación; (5) STP = Sistema de tratamiento preliminar destinado a la remoción de sólidos gruesos y finos, (6) AE = Aireación extendida.

Los datos del Cuadro 3 indican que las coberturas de alcantarillado son altas en todas las localidades, lo mismo que en el Gran Santiago, dado que las PTAS El Trebal, La Farfana y lo que se espera de la planta Mapocho, atenderán en su conjunto a más de siete millones de habitantes (correspondiente a 1.700.000; 3.780.000 y 1.938.546 habitantes atendidos por las PTAS El Trebal, La Farfana y Mapocho, respectivamente).

Respectos de los caudales de aguas servidas tratadas, los más altos se presentan en aquellas plantas ubicadas en el Gran Santiago, mientras que en localidades, los caudales de tratamiento son menores.

El sistema predominante de tratamiento de las aguas servidas corresponde a lodos activados convencionales (LAC)⁴, sistema que produce altos volúmenes de lodos en comparación con otros tipos de tratamiento (Metcalf y Eddy, 1995).

Por su parte, el Cuadro 4 aporta información contenida en las resoluciones de calificación ambiental (RCA), respecto del tratamiento de los lodos, contenido de agua (humedad) luego del secado, los volúmenes que se generan y finalmente su destino.

El principal sistema de tratamiento de los lodos considerado en prácticamente todas las PTAS, corresponde a un sistema de aireación seguido de etapas de espesamiento, almacenamiento y finalmente un proceso de deshidratación, principalmente centrifugación, comprometiendo de acuerdo a la RCA, una humedad final del lodo de a lo menos 60 a 70 %.

⁴ A nivel país (SISS, 2008), los sistemas del tipo lodos activados corresponden a los más utilizados; a abril de 2007 existían 177 PTAS convencionales del tipo lodos activados o lagunas de aireación, seguido por los sistemas no convencionales con 18 lagunas de estabilización, biofiltros y lombrifiltros.

Cuadro 4. Listado de PTAS en la RM, con datos sobre la RCA, tratamiento de lodos, sistema de secado, humedad, producción y destino del lodo.

PTAS	RCA	Tratamiento	Sistema de secado	Humedad (%)	Producción	Destino del lodo
El Trebal	081-A/1998	A+ES+AI ^(#)	Centrifugación	75	200 t d ⁻¹	Co-disposición en vertedero autorizado, monorelleno
La Farfana	458/2001	A+ES+DA+Des	Centrifugación	65	37 t d ⁻¹ (2010), 220 t d ⁻¹ (2027)	Monorelleno al interior de la PTAS, durante 5 años.
Mapocho	266/2009	A+ES+AI	Centrifugación	75	Etapa I=230 t d ⁻¹ Etapa II=340 t d ⁻¹	Se contempla trasladar los biosólidos a un lugar autorizado para su disposición temporal y posterior reuso benéfico o para su disposición final.
Melipilla	324/2006	A+ES+AI	Centrifugación	75	14 m ³ d ⁻¹ (2007); 18,7 m ³ d ⁻¹ (2020)	Relleno sanitario, sitio autorizado, y/o Planta de compostaje autorizada.
San José de Maipo	434/1999	A+ES+AI+Des	Filtro prensa	75	1,4 t d ⁻¹	Relleno sanitario Loma Los Colorados
Paine	278/1999	A+ES+AI+Des	Lechos de secado	75	2,0-4,4 t d ⁻¹	Vertedero autorizado
Valdivia de Paine	504/2002	s/l	s/l	s/l	s/l	s/l

Cuadro 4. Continuación

PTAS	RCA	Tratamiento	Sistema de secado	Humedad (%)	Producción	Destino del lodo
Talagante	145/2003	DA	Centrifugación	65	26,5 t d ⁻¹ (2009); 39,8 t d ⁻¹ (2024)	Relleno sanitario y traslado a monorelleno de PTAS El Trebal
Curacaví	475/2003	A+ES+Al+Des+ EN	Centrifugación	75	3 m ³ d ⁻¹ (2011), 3,2 m ³ d ⁻¹ (2025).	Traslado a monorelleno de PTAS El Trebal.
Buin-Maipo	651/2006	A+ES+Al+Des+ EN	Centrifugación	75	10 m ³ d ⁻¹ (2014), 12 m ³ d ⁻¹ (2020)	Relleno sanitario y/o planta de compostaje autorizada.
Til-Til	28/2007	A+ES+Al+Des+ EN	Centrifugación	75	1,4 m ³ d ⁻¹ (2020)	Relleno sanitario y disposición en sitio autorizado.
Isla de Maipo	(*)	A+ES+Al+Des	Centrifugación	75	3,4 m ³ d ⁻¹ (2020)	Relleno sanitario;monorelleno; planta de compostaje o a PTAS El Trebal.

Fuente: Elaborado con información del SEIA (www.e-seia.cl)

(*) Proyecto en proceso de calificación ambiental.

(#) A=Aireación

ES= Espesamiento

Al=Almacenamiento de lodos

DA= Digestión anaeróbica

Des= Deshidratación

s/l= Sin lodos

EN=Encalado

La generación de lodos resulta ser un aspecto clave ya que sólo en el Gran Santiago se estima en 1.000 Mg d^{-1} en base húmeda, mientras que en las localidades la mayoría de las plantas generan bajos volúmenes de lodos.

Como destino de los lodos, prácticamente todos los proyectos en la RM consideran en sus RCA una disposición en monorellenos, vertederos o rellenos sanitarios. No obstante, algunos proyectos han considerado opciones de compostaje y de reuso agrícola. Hasta la fecha, efectivamente, los lodos han sido dispuestos principalmente en rellenos sanitarios y monorellenos, parcialmente con muy alto contenido de humedad, lo que ha llevado a serios problemas en el funcionamiento de los rellenos, especialmente por su inestabilidad, además por la generación de biogás y lixiviados. Cabe recordar, que durante la implementación del plan de saneamiento de aguas servidas de la RM, no existía normativa vigente de manejo de lodos en Chile, en ese momento, tampoco se preveía ni pronosticaba la importante generación de lodos y los problemas de gestión asociados.

La normativa actual, el “Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas” (D.S.Nº4/2009), cambió las condiciones actuales del destino de los lodos. Por una parte, se restringe drásticamente la disposición final en rellenos sanitarios, y por otra, se permite expresamente la disposición en monorellenos y la aplicación en aquellos suelos que cumplan con los requisitos y características tal como pH, presencia de nivel freático, pendientes, clase textural, cercanía a fuentes de agua potable, entre otras.

2.2.2 Precio de los fertilizantes minerales

En los últimos años, los fertilizantes de mayor consumo (urea y superfosfato triple) han tenido un aumento en sus precios, lo que ha provocado efectos sobre los costos directos en la producción agrícola, generando una racionalización de su uso. Si bien estos fertilizantes tienen pocos sustitutos, dentro de los más utilizados para reemplazarlos son el salitre y el guano (ODEPA, 2008). No obstante, el lodo por sus constituyentes nutricionales podría sustituir a estos fertilizantes en determinadas condiciones (Tapia, 2005).

A continuación se realiza un breve análisis de las tendencias en los precios de los fertilizantes (urea y superfosfato triple), durante el período 2006-2010 en pesos reales sin IVA con el IPC de diciembre del 2010. En el caso de los lodos, no presentan valor económico en sí y no se comercializan.

2.2.2.1 Precios de la urea

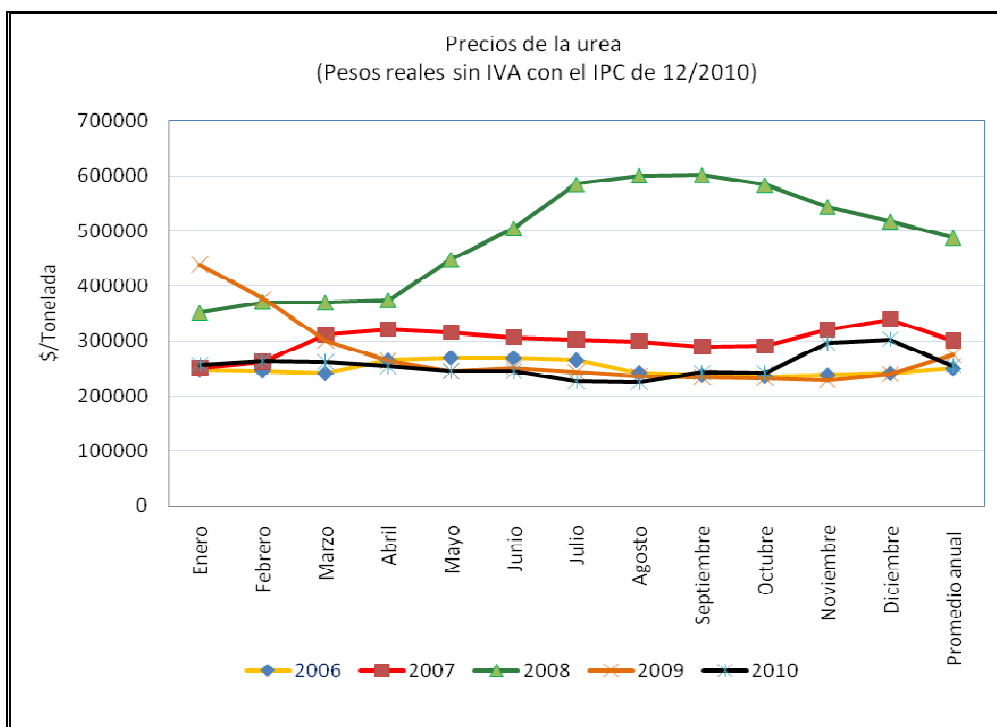
En el mes de enero del año 2006 la urea tuvo un valor de \$247.743 por tonelada, en mayo se obtuvo el precio más alto (\$269.666 por tonelada). La tendencia de ese año fue lineal, con un promedio de \$249.887 por tonelada.

A inicios del año 2007, el precio de una tonelada de urea tuvo un valor de \$250.946 el que se incrementó a \$321.522 y \$338.539 en abril y diciembre, respectivamente. La tendencia fue a un leve incremento al terminar ese año.

En el año 2008, se presentaron las mayores alzas, con un precio de \$601.352 por tonelada en septiembre. Durante el año 2009 se produjo una disminución del precio, con un valor promedio anual de la tonelada de

\$274.157, similar es la situación en el año 2010, que presenta un valor promedio anual de \$255.160 por tonelada. Estas variaciones se reflejan en la Figura 5.

Figura 5. Precios de urea durante el período 2006-2010



Fuente: www.odepa.gob.cl/servlet/sistemas.series_precios.combinadas.ServletCombinadasTrx;jsessionid=767EC31F7A82C885D0063958CF8C6400

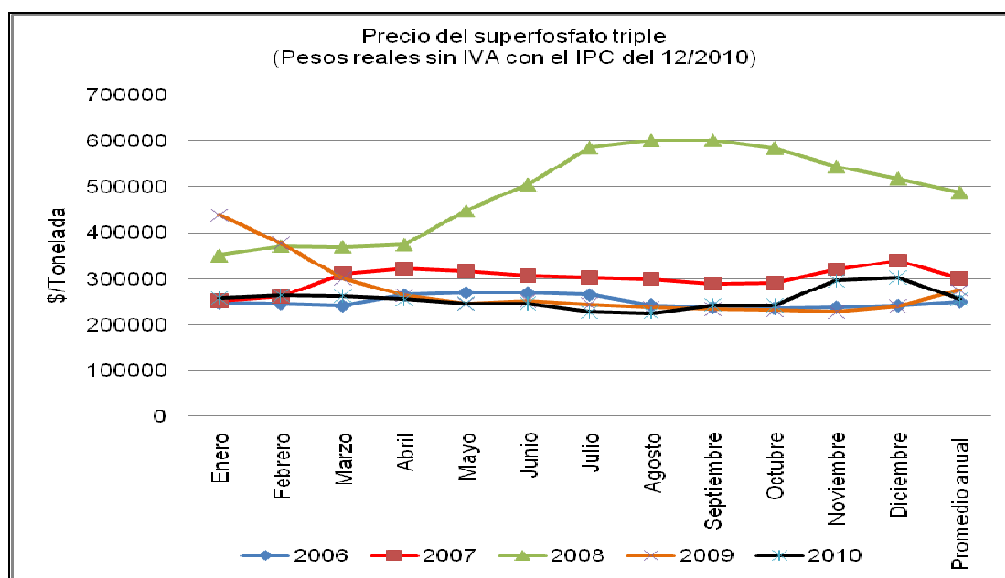
2.2.2.2 Precios del super fosfato triple (SFT)

El superfosfato triple (SFT) en enero del año 2006, tuvo un precio de \$212.575 por tonelada y terminó con un precio de \$211.577. En el año 2007, los precios se incrementaron sostenidamente para llegar en diciembre a un valor de \$336.499 por tonelada.

El año 2008 tuvo las mayores alzas en sus precios, duplicándose con un valor máximo en julio, con \$729.538 la tonelada, sin embargo, durante el año 2009 el precio bajó sostenidamente pasando de \$656.223 a \$236.851

en enero y noviembre, respectivamente. El promedio de precios del año 2010 fue de \$289.829 por tonelada. La Figura 6, refleja las variaciones en los precios de este fertilizante.

Figura 6. Precios del superfosfato triple, durante el período 2006-2010.



Fuente: www.odepa.gob.cl/servlet/sistemas.series_precios.combinadas.ServletCombinadasTrx;jsessionid=767EC31F7A82C885D0063958CF8C6400.

Cada vez que se producen alzas de estos insumos, se generan efectos en la producción agrícola especialmente en cultivos tradicionales como trigo y maíz.

Por ello, las autoridades han apoyado a los productores agrícolas desde hace años con programas tal como el “Programa de incentivos para la recuperación de suelos degradados”, en donde el financiamiento alcanza para menos fertilizantes, pues se mantiene un monto global, lo que ha generado un aumento de la presión de los agricultores.

En Chile, uno de los aspectos más relevantes que restringe el uso de lodos en suelos agrícolas, es la presencia de elementos traza metálicos. Sin embargo, el país no restringe el uso de fertilizantes con presencia de

elementos traza metálicos ni tampoco exige un etiquetado detallado sobre la composición química completa del fertilizante y no se ha dimensionado el efecto en la salud humana ni en el medio ambiente en el largo plazo (Villanueva, 2003).

Un aporte importante de cadmio en los suelos en Chile es a través del uso de fertilizantes fosfatados derivados de roca fosfórica (Valenzuela, 2001).

CAPÍTULO 3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

3.1 MATERIALES

Las fuentes de información relevantes sobre aplicación de lodos utilizadas en el presente estudio corresponden a las siguientes:

- a) Estudio: “Valoración de lodos provenientes de PTAS como mejorador de suelos degradados” realizado por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), a través de un convenio de colaboración técnica-financiera con la empresa sanitaria Aguas Andinas S.A., durante el período 2001-2004.

Este estudio experimental consideró aplicaciones con diferentes cargas de lodos urbanos en suelos (tasas de 0, 30, 60 y 90 Mg ha⁻¹ año) con cultivos durante tres temporadas agrícolas (maíz, trigo, papa) en la provincia de Melipilla, con el fin de determinar el efecto mejorador de los lodos, en las propiedades físicas de los suelos y las implicancias respecto de efectos en los rendimientos de los cultivos.

- b) Estudio: “Valoración de lodos como fertilizante”, ejecutado por González S., Tapia F., y Ruiz R., investigadores del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), en convenio con la empresa sanitaria Aguas Andinas S.A., realizado durante el período 2001-2004 en la provincia de Maipo.

Este estudio contempló experiencias de campo en distintas áreas de la RM, incorporando diferentes dosis de lodos y mezclas con fertilizantes minerales (testigo, 100% lodo; 50% lodo + 50% fertilizante; 100% fertilizante) para satisfacer total o parcialmente los requerimientos nutricionales de los cultivos (trigo, avena, tomate, maíz, poroto verde), para evaluar el efecto del lodo en la fenología de los cultivos, rendimiento,

incidencia de plagas y enfermedades, presencia de ETM en las estructuras vegetales, en el suelo y sobre el balance nutricional del suelo. También se evaluaron aplicaciones de lodos en especies frutales, duraznero y uva de mesa.

- c) Estudio: “Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales”, proyecto FONDEF DO111034, ejecutado por la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas y la Facultad de Ciencias Forestales, a cargo de los investigadores Silvia María Aguilera S., y Manuel Rodríguez R.

En este estudio se realizaron una serie de evaluaciones de los lodos o biosólidos (caracterización de la materia orgánica, contenido de carbono, nitrógeno y fósforo, y elementos traza metálicos). Se realizaron aplicaciones de biosólidos compostados y sin compostar en suelos forestales de las regiones de Valparaíso, O`Higgins y Maule para evaluar efectos en crecimiento en área basal, estado nutricional de las plantaciones, presencia de metales pesados o elementos traza metálicos en lodos, contaminación de aguas, actividad biológica y situación nutricional de las hojas. Se determinó la superficie regional apta para aplicaciones de lodos en el rubro forestal. Para efectos de esta tesis se tomaron algunos resultados.

Se seleccionaron estas tres experiencias de campo porque se desarrollaron por más de dos temporadas agrícolas, cuando el país recién comenzaba a generar lodos y no existían aún antecedentes del comportamiento de los lodos en los suelos en sitios específicos, ni de las especies vegetales más aptas. Fueron las primeras investigaciones nacionales en esta línea, lo que permitió la generación de los primeros resultados acerca de los efectos del lodo en los componentes suelo, agua, cultivos, especies frutales y forestales. Estos estudios se basaron

en el concepto del lodo como un insumo en el ámbito agrícola y forestal, ya sea como un mejorador de suelos o un fertilizante.

- d) Estudio: “Conformación de unidades espaciales en respuesta a la aplicación de biosólidos en la Región Metropolitana”, proyecto Fondecyt N°1050726, elaborado por la Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura, Departamento de Geografía a cargo de la investigadora, Sra. Carmen Paz Castro Correa, y donde la autora de esta tesis fue co-investigadora.

Este estudio determinó a través de una metodología de modelamiento de unidades homogéneas, la superficie apta para recibir lodos en la Región Metropolitana, usando dentro de los requisitos, el borrador de proyecto de reglamento (CONAMA, marzo 2001) y criterios geográficos de sustentabilidad.

- e) Información de las superficies censadas en la Región Metropolitana a partir del VII Censo Agropecuario y Forestal (INE, 2007) y las bases cartográficas del estudio agrológico CIREN CORFO (1996) para la identificación de la superficie apta para la aplicación de lodos en suelos de la provincia de Melipilla, RM. Se realizó una aplicación con el software Arc view para la visualización cartográfica.

Tanto la información del censo, las bases cartográficas del estudio agrológico CIREN CORFO (1996) y el proyecto Fondecyt N°1050726 fueron utilizados para determinar la superficie potencialmente disponible en la provincia de Melipilla-RM que puede ser apta para aplicaciones de lodos, utilizando las restricciones y prohibiciones definidas en la normativa vigente (D.S. N°4/2009).

- f) Revisión de literatura extranjera sobre uso de lodos en suelos agrícolas. Los principales artículos seleccionados con resultados de experiencias de terreno se indican a continuación:
- Glauser, R., Doner, H. E., Paul, E. A. 1988. Soil Aggregate Stability As A Function Of Particle Size In Sludge-Treated Soils. *Soil Science* 146 (1):37-43.
 - Hussein, A. H. A. 2009. Impact of sewage sludge as organic manure on some soil properties, growth, yield and nutrient contents of cucumber crop. *Journal of Applied Sciences*. 9(8):1401-1411 pp.
 - Lindsay, B., and Logan, T. 1998. Field response of soil physical properties to sewage sludge. *Journal environment Quality* (27): 534-542.
 - Munn, K., Evans, J. y Chalk, P. 2000. Mineralization of soil and legume nitrogen in soils treated with metal contaminated sewage sludge. *Soil Biology and Biochemistry* (32):2031-2043.
 - Mosquera-Losada, M. R. Santiago-Friejanes, I. I., Fernández-Nuñez, E., Rigueiro-Rodríguez, A. 2008. Effects of composted, pelletized and anaerobically digested sewage sludge on pasture production after sowing in a silvopastoral system. Biodiversity and animal feed: future challenges for grassland production. *Proceedings of the 22nd General meeting of the European Grassland Federation Uppsala Sweden, 9-12 june 2008* (287-289).
 - Singh R.P. y Agrawal M., 2007. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of *Beta vulgaris* plants. *Chemosfere* May; 76(11):2229-40.
 - Tsadila, E., Tsadilas C., Stamatiadis, S., Christodoulakis, N., 2009. Investigation of soil property changes and olive tree stress as caused by excessive sewage-sludge application. *Communications in Soils Science and plant analysis*, 40:514-525.

- g) Revisión de la Normativa chilena (D.S.Nº4/2009) recientemente promulgada y normas extranjeras, principalmente americana (CR 503/92) y europea (86/278/CEE), respecto de la clasificación y manejo sanitario y de la aplicación de lodos al suelo. Se efectuó una comparación de las normas respecto de criterios técnicos, requisitos sanitarios y ambientales.
- h) Base de datos de proyectos de plantas de tratamiento de aguas servidas sometidos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA-CONAMA), respecto de la generación de lodos, el destino final de los lodos y de los seguimientos ambientales de aquellos proyectos con planes de aplicación de lodos que operan actualmente en la provincia de Melipilla.
- i) Ficha de costos para la producción de una hectárea de maíz en la zona central, según lo establecido por ODEPA (2009) para realizar un ejercicio de costo de producir con fertilizante mineral y con lodos. El maíz es uno de los cultivos más comúnmente utilizado en experiencias de campo con aplicaciones de lodos, posee alta capacidad de extracción de macronutrientes y no se han observado efectos adversos al cultivo.

3.2 MÉTODOS

Los métodos que se han utilizado para cada uno de los objetivos específicos indicados en el punto 1.4.2, son los siguientes:

- a) Análisis descriptivo de los resultados de las investigaciones de aplicación de lodos en agrosistemas durante tres temporadas en las Provincias de Melipilla y Maipo, RM, obtenidos tanto en suelo como en los cultivos. Además se identificaron impactos a los componentes del agro sistema por aplicación de lodos. Los resultados de las

experiencias se contrastaron con otras investigaciones realizadas y con la literatura internacional.

b) Análisis técnico-ambiental de la normativa vigente, específicamente del D.S. N°4/2009, respecto a las restricciones y requisitos de la aplicación de lodos en agro sistemas, y comparación con la legislación extranjera, principalmente americana y europea.

c) Método de Superposición en SIG/ArcView, de capas de información de suelos proveniente del Estudio Agrológico de Suelos de la RM (CIREN-CORFO, 1996), con el fin de cuantificar la superficie agrícola apta para la aplicación de lodos en la provincia de Melipilla. Esto se realizó con la herramienta de SIG a través del software ARC VIEW 9.2. Lo anterior consideró las exigencias de la normativa vigente (D.S. N°4/2009), específicamente aspectos tales como: distancia a áreas residenciales, viviendas individuales y fuentes de agua potable; drenaje, materia orgánica, series de suelos, textura y clases de capacidad de uso de los suelos; uso y cobertura vegetal; acuíferos vulnerables y exigencias hidrológicas. Las capas de información generadas fueron sometidas a través de un proceso de exclusión y de superposición, adaptando diferentes escalas de trabajo que dieron como resultado final, el área factible de recibir lodos.

d) Cálculo de los costos de producir una hectárea de maíz, para ello se utilizaron como insumos, los fertilizantes minerales tradicionales, y lodos. Se utilizó una ficha técnica de los costos de producción de una hectárea de maíz (ODEPA, 2009), cultivo que ha sido probado en la mayoría de los planes de manejo controlados que operan actualmente y se han obtenido buenos resultados.

e) Se contó con la información respecto del alza de los precios de los fertilizantes nitrogenados (urea) y fosfatados (superfosfato triple) en el

período 2006-2010 y se incluyeron valores de mercado estimativos, respecto de los costos de transporte de lodo a relleno sanitario, transporte a monorelleno y transporte a suelo agrícola, bajo las restricciones que establece la normativa vigente.

- f) Posterior al análisis de la normativa vigente y de su comparación con otras normas, se han sugerido aspectos y criterios recomendables de abordar en la norma, que permita salvaguardar la calidad ambiental de los agrosistemas respecto de posibles efectos de aplicación de lodos.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 EXPERIENCIAS DE USO DE LODOS EN SUELOS

Los resultados de las diferentes experiencias realizadas dan cuenta de los efectos de las diferentes aplicaciones de lodos tratados en cultivos anuales (maíz, trigo, avena) y especies frutales (vid, duraznero) en diferentes áreas de la RM ejecutadas en el período 2001-2004, utilizando diferentes diseños experimentales y con diferentes tasas de aplicación de lodos (0-30-40-60 y 90 Mg ha⁻¹ año), según el objetivo buscado (lodo/biosólido como mejorador ó como fertilizante). Los estudios ejecutados en la RM se encuentran disponibles en la Comisión Regional del Medio Ambiente, RM.

Además se incorporó en este trabajo, experiencias de aplicación de lodos en plantaciones forestales en las regiones de Valparaíso, O'Higgins y Maule, disponibles en CONICYT.

4.1.1 Lodo como mejorador de suelos (Convenio SAG-Aguas Andinas)

El objetivo de esta investigación efectuada por el SAG fue evaluar el lodo como un *insumo mejorador* del suelo. Dado que el lodo presenta alto contenido de materia orgánica (45-51%) y la provincia de Melipilla presenta un 36% de su superficie con algún grado de erosión (IREN, 1979), con suelos localizados en valles y zonas costeras de bajo potencial productivo y bajo contenido de materia orgánica, asociados a una producción altamente extractiva, el lodo podría mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos.

Los suelos utilizados presentaron un manejo histórico deficiente y los ensayos correspondieron a aplicaciones de 0 (T1), 30 (T2), 60 (T3) y 90

(T4) Mg ha⁻¹ en base seca de lodos provenientes de la PTAS El Trebal, durante tres temporadas agrícolas. Las altas dosis aplicadas tuvieron como objetivo, obtener resultados en los suelos al corto plazo, dado que para modificar alguna propiedad física del suelo, se requiere, varias temporadas de evaluación.

El diseño experimental fue completamente aleatorio y la unidad experimental comprendió parcelas de 625 m², 12 unidades por predio, cada tratamiento contó con tres repeticiones. Se utilizaron cultivos de maíz, trigo y papa. El Cuadro 5 resume los antecedentes de los predios, series de suelos, dosis aplicadas, número de temporadas con aplicaciones de lodos y los cultivos.

Cuadro 5. Antecedentes de los ensayos realizados a través del Convenio SAG- Aguas Andinas S.A. (2001-2004)

Predio	Serie de suelo	Tasas aplicadas (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Número de temporadas de aplicación de lodos	Cultivo
Nº 1	Piedmont Lo Vásquez (PLV)	0, 30, 60 y 90	Dos temporadas con lodos, en la tercera temporada se modificó el diseño	Maíz
Nº 2	Piedmont Lo Vásquez (PLV)	0, 30, 60 y 90	Tres temporadas con lodo Dos temporadas sin cultivo	Papa
Nº 3	Popeta (PPT)	0, 30, 60 y 90	Dos temporadas con lodo	Trigo
Nº 5	Piedmont Lo Vásquez (PLV)	0, 30, 60 y 90	Tres temporadas con lodo	Maíz

La aplicación de lodos en las parcelas experimentales fue acumulativa, se repitió la dosis de cada tratamiento en cada temporada y se llegó a aplicar: 0, 90, 180 y 270 Mg ha⁻¹ de lodos en algunos suelos. Además de la dosis de lodos, todos los tratamientos en cada temporada tuvieron una fertilización mineral basal de nitrógeno, fósforo y potasio, que cubrió las necesidades nutricionales de cada cultivo.

Resumen de los resultados del Convenio SAG- Aguas Andinas S.A.

El estudio efectuado por SAG utilizó suelos correspondientes a sustratos de origen aluvial, moderadamente profundos y profundos, que ocupaban la posición de abanicos aluviales y terrazas aluviales en los sectores de la Cordillera de la Costa. El Cuadro 6 señala las propiedades físicas y químicas iniciales de los suelos, previo a las aplicaciones de lodos.

Cuadro 6. Propiedades físicas y químicas iniciales de algunos de los suelos sometidos a la aplicación de lodos.

Propiedades físicas iniciales	Unidad	Predios		
		Nº1	Nº2	Nº5
Textura superficial		FAa	FAa	Faf
Densidad aparente	g cm ⁻³	1,9	1,3	1,5
Capacidad retención agua a 33 kPa.	%	18,9	16,7	30,9
Humedad aprovechable	%	8,8	7,4	15,9
Capacidad retención agua a 1500 kPa.	%	10,2	9,3	15,0
Propiedades químicas iniciales	Unidad	Nº1	Nº2	Nº5
Materia orgánica	%	1,5	1,5	3,7
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	0,8	4,2	1,9
pH		8,4	8,4	8,7
Contenido total N	mg kg ⁻¹	0,8	1,4	1,7
Contenido total P	mg kg ⁻¹	s.i. ⁽¹⁾	1,2	0,7
CIC	cmol(+) kg ⁻¹	26,4	19,3	36,7
As total	mg kg ⁻¹	9,2	14,3	14,1
Cd total	mg kg	0,3	0,3	0,1
Cu total	mg kg	68,1	67,4	58,7
Hg total	mg kg	<0,5	0,3	0,4
Ni total	mg kg	12,3	11,4	10,3
Pb total	mg kg	13,2	12,3	12,8
Se total	mg kg	s.i. ⁽¹⁾	s.i. ⁽¹⁾	0,5
Zn total	mg kg	123,0	112,6	91,2

(1) s.i: Sin información

Según se señala en el Cuadro 6, dentro de las propiedades físicas iniciales estos suelos presentaron texturas superficiales finas, una densidad aparente en un rango de 1,5 a 1,9 g cm⁻³, valores considerados medios a altos ya que según Thompson y Thoeh (2002), en general, los horizontes superficiales en suelos minerales suele variar entre 1,0 a 1,6 g cm⁻³. Los valores de porosidad del suelo se consideran en rangos de muy bajos a medios (Casanova, *et al.*, 2006).

De las propiedades químicas de interés se destaca el contenido de materia orgánica, presente en un rango de 1,5 a 3,7%, que puede considerarse en un rango deseable en los suelos del país (Casanova, *et al.*, 2006). Por su parte, los suelos presentaron una conductividad eléctrica de ligera a moderada según la clasificación dada por Wild (1992) y no salina a ligeramente salino según Schoeneberger (2002). El pH de los suelos utilizados en los ensayos se encontró en el rango moderadamente alcalino, en la Región Metropolitana es común encontrar suelos con pH mayores a 7,8 (Sadsawka, 2006).

Respecto de la concentración total de ETM, los suelos estudiados inicialmente presentaron contenidos de cobre total normal, que variaron entre 58,7 a 68,1 mg kg⁻¹, dado que Alloway (1995), señala que la concentración de cobre total en el suelo puede variar en el rango de 2,0 a 100 mg kg⁻¹. Por otra parte, González (1994) señala que en Chile, el cobre es el elemento en mayor cantidad en los suelos, el que se extiende desde la I Región hasta el Maule, concentrándose los mayores yacimientos en la Cordillera de los Andes o en áreas precordilleranas.

El zinc total se constató en un rango de 91,2 a 123,0 mg kg⁻¹, en los suelos normales se pueden encontrar rangos de concentración de zinc entre 10 y 300 mg kg⁻¹ (Alloway, 1995), según esto las concentraciones de zinc total encontradas no serían altas. Del Cuadro 6 se puede deducir que los suelos presentaron un contenido normal de materia orgánica, pH

moderadamente alcalino, texturas finas, alta densidad aparente, y un contenido de metales o elementos traza metálicos por debajo de lo indicado en el proyecto de reglamento, con esas características estos suelos fueron seleccionados para realizar las aplicaciones de lodos.

Las características de los lodos utilizados tanto para las experiencias de SAG como de INIA son las mismas dado que se utilizaron lodos provenientes del mismo monorelleno de la PTAS El Trebal. El Cuadro 7 señala las características químicas de los lodos utilizados para estas aplicaciones.

Cuadro 7. Propiedades químicas iniciales de los lodos utilizados en las aplicaciones, para los estudios del SAG e INIA.

Propiedades químicas iniciales	Unidad	Valores	
		mínimos	máximos
Materia orgánica	%	41,4	45,0
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	4,8	15,2
pH		6,6	7,1
Contenido total N	g kg ⁻¹	18,5	30,2
Contenido total P	g kg ⁻¹	0,3,	1,7
As total	mg kg ⁻¹	8,5	23,5
Cd total	mg kg ⁻¹	1,0	4,9
Cu total	mg kg ⁻¹	360,0	558,0
Hg total	mg kg ⁻¹	1,0	3,3
Ni total	mg kg ⁻¹	32,8.	80,5
Pb total	mg kg ⁻¹	45,9	72,5
Se total	mg kg ⁻¹	10,3	13,1
Zn total	mg kg ⁻¹	1594	1984

Según Epstein (2002) las características de los lodos juegan un papel muy importante para su uso en los suelos. El Cuadro 7 entrega información de los diferentes componentes que aportó el lodo en las experiencias realizadas (macronutrientes, micronutrientes, elementos traza metálicos). Su alto contenido de materia orgánica lo hace interesante como enmienda orgánica al suelo, no obstante, su alta conductividad eléctrica en algunos casos (15,2 dS m⁻¹), puede producir efectos de salinización en el suelo.

Los contenidos totales de elementos traza metálicos son bajos al compararlos con los valores máximos establecidos en la normativa nacional. A continuación se presentan los resultados de las propiedades físicas y químicas de los suelos, al final de la tercera temporada luego de ser sometidos a las aplicaciones de lodos (Cuadro 8).

Cuadro 8. Propiedades físicas y químicas finales de los suelos después de dos y tres temporadas de aplicaciones de lodos, para el estudio SAG (2001-2004).

Propiedades físicas finales	Unidad	Predios		
		Nº1 ⁽¹⁾	Nº2 ⁽²⁾	Nº5 ⁽²⁾
Textura superficial		FAa	FAa	Faf
Densidad aparente	g cm ⁻³	1,5	1,8	1,4
Capacidad retención agua a 33 kPa.	%	27	22	22,7
Humedad aprovechable	%	12	13	12,8
Capacidad retención agua a 1500 kPa.	%	13	8,8	11,0
Propiedades químicas finales	Unidad	Nº1	Nº2	Nº5
Materia orgánica	%	3,7	3,8	4,5
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	3,5	6,5	7,7
pH		7,5	6,5	7,3
Contenido total N	mg kg ⁻¹	2,3	0,3	3,7
Contenido total P	mg kg ⁻¹	1,5	2,3	s.i.
CIC	cmol(+) kg ⁻¹	28,1		69,7
As total	mg kg	7,0	10,8	11,9
Cd total	mg kg	1,6	0,5	0,8
Cu total	mg kg	111	101	127,7
Hg total	mg kg	0,6	s.i. ⁽³⁾	0,4
Ni total	mg kg	22	15,1	16,8
Pb total	mg kg	17	17,8	22,9
Se total	mg kg	s.i.	s.i.	s.i.
Zn total	mg kg	190	270	242,5

(1)= Dos temporadas de aplicación de lodos (cantidad acumulada de lodos por tratamiento: 0, 60, 120, 180 Mg ha⁻¹),

(2)= Tres temporadas de aplicación de lodos (cantidad acumulada de lodos por tratamiento: 0, 90, 180, 270 Mg ha⁻¹),

(3)= s.i.= Sin información

El estudio del SAG señala los efectos de la aplicación de lodos, la comparación se realizó entre el tratamiento testigo (0 Mg ha^{-1}) con las diferentes tasas de aplicación de lodos (30, 60 y 90 Mg ha^{-1} año). La aplicación de lodos generó efectos favorables en las propiedades físicas en la mayor parte de los suelos con diferentes dosis de lodos, en algunos casos los efectos se vieron con dosis de 30 Mg de lodos, en otros casos con la dosis mayor. En la literatura se mencionan características benéficas al suelo con la aplicación de lodos, se favorecen las propiedades físicas intrínsecas tal como estructura, porosidad y capacidad de retención de agua (Munn *et al.*, 2000, Díaz Burgos, 1990).

En la investigación del SAG, una de las propiedades físicas del suelo que se modificó fue la estabilidad de los agregados cuando se comparó el tratamiento testigo con los demás tratamientos al final de la tercera temporada, el efecto positivo de estabilidad se observó con las dosis más altas. La capacidad de retención de agua a 33 kPa aumentó en casi todos los predios, al igual que la humedad aprovechable.

Se concluyó que la aplicación de lodos en altas dosis (90 Mg) disminuye la densidad aparente del suelo, en algunos suelos. Este resultado se corrobora con lo indicado por Glauser *et al.*, (1988), quienes al aplicar lodos obtuvieron disminución en la densidad aparente, implicando un incremento en la porosidad del suelo. Cuevas *et al.*, (2006) indican que en evaluaciones de la densidad aparente, ésta disminuye, ya que se generan espacios dentro de la matriz del suelo por efecto de material orgánico adicionado.

Los resultados del estudio SAG también se corroboran con el estudio de INIA (2005), en donde las aplicaciones de lodo, en forma localizada al suelo, mejoraron las propiedades físicas de los suelos, con evidencias de incrementos en la retención hídrica y la macroporosidad, en el entorno de la aplicación, lo que favoreció una mayor proliferación radicular. En ambas

investigaciones, a medida que aumentó la dosis aplicada de lodo, hubo tendencias de aumento en los contenidos de la materia orgánica, en el contenido de fósforo total y nitrógeno total, en la mayor parte de los predios estudiados.

Estudios realizados por Álvarez (2004) y Pedreros (2006) corroboran lo anterior, observando un aporte significativo de nitrógeno mineral y fósforo disponible al incubar suelos con lodos en dosis de 30 Mg ha^{-1} , lo que confirma la rápida transformación y disponibilidad de estos nutrientes esenciales.

Por otra parte, el estudio del SAG demostró que el pH de los suelos disminuyó significativamente con el aumento de las dosis y que lo contrario ocurrió con la salinidad de los suelos, que aumentó significativamente en todas las localidades con dosis de 90 Mg ha^{-1} . Álvarez (2004) confirma que la conductividad eléctrica aumenta al aplicar lodo, por lo que es importante analizar las dosis de lodo que se aplica y limitar su uso en cultivos sensibles a la salinidad.

En cuanto a los cultivos analizados en el estudio del SAG, cabe señalar que tanto el maíz como el trigo fueron resistentes a la salinidad del lodo, sin presentarse efectos nocivos durante el período de experimentación.

Respecto a los contenidos de nitrógeno y fósforo en el suelo, experiencias realizadas por Aguilera y Rodríguez (2005), en la determinación de tipos de nitrógeno presentes en lodos, demostraron que un 45 a 59% corresponde a una fracción soluble, dentro de ellas, el N-orgánico hidrolizable, que constituye la fracción más disponible en la dinámica de uso de nitrógeno aportado por los lodos. Algo similar ocurre con el fósforo en cuanto a que la fracción soluble corresponde también a la fracción orgánica hidrolizable.

La capacidad de intercambio catiónico aumentó significativamente en el predio 5, mientras que en el resto de predios no hubo grandes variaciones. La Universidad Autónoma de Madrid (1995), señala que cuando el lodo actúa como un acondicionador del suelo, además de favorecer la asimilación de nutrientes como el nitrógeno y fósforo, aumenta la capacidad de intercambio catiónico (CIC) debido fundamentalmente a su aporte de materia orgánica.

En cuanto al contenido total de elementos traza metálicos, se observó un incremento para Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en la mayoría de los suelos evaluados, no obstante, en concentraciones bajas, en rangos que no superan los límites definidos en la normativa. El contenido de elementos traza metálicos y su efecto de acumulación tanto en los suelos como en cultivos, es una de las mayores preocupaciones para el uso de los lodos en el ámbito silvoagrícola y que ha sido ampliamente estudiada en otros países. Maricán (2006) señala que la aplicación de biosólido al suelo en dosis de 15 y 30 Mg ha⁻¹ incrementa el contenido total de elementos traza metálicos y es principalmente significativo para el cobre y zinc.

En uno de los ensayos desarrollados por el SAG se midieron efectos incrementales de zinc en granos de trigo, y que se debió a la aplicación de lodos con las dosis de 90 Mg ha⁻¹año.

En la generalidad de los casos, el rendimiento de los cultivos no se afectó por la tasa de lodo aplicada, considerando tasas de aplicación de 90 Mg ha⁻¹ año⁻¹. A excepción del maíz, que aumentó en aquellas unidades experimentales que tuvieron tres temporadas de aplicación en el mismo sitio. Cuevas, *et al.*, (2006) señalan que los lodos son aplicados en altas cantidades al suelo intencionalmente para obtener respuestas sobre el rendimiento de los cultivos y como enmiendas, para mejorar las propiedades físicas del suelo, modificándolas.

La carga patogénica en los suelos también fue evaluada y los resultados indicaron que luego de recibir las distintas dosis de lodos en todos los tratamientos, hubo una baja población de bacterias (*E. coli* y salmonellas). No se encontraron ovas de helmintos en el suelo en ningún tratamiento, por cuanto el impacto en términos bacteriológicos, es bajo. Estudios realizados por Castillo, *et al.*, (2003) señalan que la aplicación de lodos en el suelo aún a tasas superiores a las recomendadas, no presenta riesgos sanitarios, de contaminación por elementos traza metálicos, ni efectos ecotóxicos globales en el corto plazo.

Las experiencias realizadas por el SAG también contemplaron pruebas de respiración de suelos para determinar la actividad microbiana, la que no fue afectada con las dosis aplicadas. Respecto de la actividad microbiana del suelo, Smith (2009), asevera que el zinc es un elemento en los lodos de aguas residuales tratadas que en suelos agrícolas se identifica como la principal preocupación en relación con los impactos potenciales sobre esta actividad.

Según Hernández (2009), la actividad biológica de un suelo enmendado con diferentes dosis de lodos (0, 30, 60 Mg ha⁻¹) se ve influenciada por la dosis de lodos aplicada, observándose que a mayores dosis aplicadas, mayor es la biomasa del suelo.

El estudio SAG entregó antecedentes respecto del comportamiento de los lodos en distintos suelos y cultivos, a diferentes dosis de aplicación de lodos en el tiempo. Las propiedades físicas del suelo que se vieron afectadas positivamente con aplicaciones de lodos fueron la capacidad de retención de agua a 33 kPa y la estabilidad de agregados y otras que no fueron afectadas como la textura, capacidad de retención de agua a 1500 kPa. También las propiedades químicas del suelo fueron modificadas en la mayor parte de los suelos estudiados, a mayor dosis aplicada de lodos (90 Mg ha⁻¹ por temporada), se observó mayor contenido de materia

orgánica, de fósforo total y nitrógeno total, no obstante, aumentó el contenido salino en el suelo y disminuyó el pH.

4.1.2. Lodo como fertilizante (Convenio INIA-Aguas Andinas)

El estudio “Valorización de lodos como fertilizante” de INIA que se desarrolló durante el período 2001-2004, partió de la premisa de que los lodos presentan macro y micronutrientes de importancia. Por lo tanto, el lodo se evaluó como un insumo fertilizante para satisfacer total o parcialmente los requerimientos nutricionales en diferentes cultivos (tomate, trigo, poroto verde, maíz choclero y avena). Se evaluó el efecto del lodo en la fenología de estos cultivos, rendimiento, incidencia de plagas y enfermedades, presencia de ETM en las estructuras vegetales y el balance nutricional del suelo. Se realizaron aplicaciones en especies frutales (uva y duraznero). Los tratamientos se aplicaron sistemáticamente durante tres temporadas.

Para las fertilizaciones de cada cultivo se aplicó una dosis basal recomendada de nitrógeno y fósforo y se aplicaron cuatro tratamientos: testigo (T), 100% lodos (L); 50% lodo+50% fertilizante (L+F); 100 % fertilizante (F); con tres repeticiones cada tratamiento. En aquellas parcelas con el tratamiento 100% lodos, se aplicó una dosis acumulada de 40 Mg ha⁻¹ de lodo. Los cultivos anteriormente señalados fueron seleccionados según su demanda de nitrógeno.

Los frutales, duraznero y uva de mesa se evaluaron con tres y dos temporadas de aplicación, respectivamente. Las dosis totales de lodo en base seca, aplicadas según la demanda de nitrógeno fue de 21,1 Mg ha⁻¹ para duraznero y 11 Mg ha⁻¹ en uva de mesa, considerando los mismos cuatro tratamientos que se indicaron para los cultivos (testigo (T), 100% lodos (L); 50% lodo+50% fertilizante (L+F); 100 % fertilizante (F)). El lodo, el primer año fue aplicado en una zanja vecina a los árboles, al año

siguiente en una zanja en la entre hilera y el tercer año se descartó la zanja pero se hicieron hoyos cilíndricos para no perjudicar el enraizamiento logrado en la entre hilera del año anterior.

Resumen de los resultados (Convenio INIA- Aguas Andinas)

Del estudio de INIA se concluye que el lodo puede ser utilizado como un insumo fertilizante. Los cultivos respondieron positivamente a las diferentes dosis de aplicación de lodos, especialmente en relación al aporte de dos de los nutrientes más importantes en cantidad para las plantas, como son el nitrógeno y el fósforo. En el Cuadro 9 se entregan resultados de los rendimientos obtenidos en los diferentes cultivos analizados por el Estudio de INIA dentro de las temporadas de evaluación 2001-2004.

Cuadro 9. Rendimiento obtenido en trigo, tomate, avena y maíz choclero (kg ha^{-1}) del estudio INIA en tres temporadas.

Tratamiento	Trigo (kg ha^{-1})		Tomate (kg ha^{-1})		Avena (kg ha^{-1})		Maíz choclero (kg ha^{-1})		
	2001	2002	2001	2002	2002	2003	2001	2002	2003
Testigo	4.670	1.290	16.483	15.259	1.350	1.640	11.446	12.442	12.000
100%F	4.160	2.100	28.397	29.874	4.640	3.690	21.101	16.974	22.250
50%F-50%L	4.390	2.770	26.854	28.982	4.070	2.530	16.252	15.532	21.190
100%L	4.460	2.620	24.185	35.986	2.500	2.800	13.645	12.845	23.872

Fuente: Serie Actas INIA N°27.

Del Cuadro 9 se obtiene que en el trigo no hay evidencia de un efecto positivo en el rendimiento en la primera temporada. A partir de la segunda temporada se aprecian efectos en todos los tratamientos. En tanto, en tomate y avena, se observa un efecto similar ya que todos los tratamientos que incluyeron la adición de algún tipo de fertilizante superaron al testigo en ambas temporadas.

En el Cuadro 10 se presenta la respuesta de maíz choclero a los tratamientos a través de las tres temporadas estudiadas, el que se expresó en porcentaje en relación al tratamiento 100% fertilizante .

Cuadro 10. Tratamientos aplicados y rendimiento obtenido de maíz choclero, expresado en porcentaje en relación al tratamiento 100%F en el sector de Chada (2001 a 2003).

Tratamiento	Rendimiento de Maíz choclero (qq m ⁻¹)		
	2001	2002	2003
Testigo	54,2	73,3	53,9
100%F	100	100	100
50%F-50%L	77,0	91,5	95,2
100%L	64,7	75,7	107,3

Fuente: Serie Actas INIA N°27.

Del Cuadro 10 se deduce que mientras el tratamiento 100% F alcanzó una productividad equivalente al 100%, el testigo se mantuvo en un 60%. Por su parte, el tratamiento 50%F-50% L, al primer año se ubica en un nivel de productividad de un 80% respecto al 100% F, superando al testigo en un 50%. Por lo tanto, se evidencia que al primer año el lodo prácticamente no aporta al rendimiento del maíz, por tanto el N y el P quedan en la fracción orgánica. En el segundo año, el tratamiento 50%L-50%F logra un rendimiento equivalente a un 90% respecto del tratamiento 100%F, es decir que el 10% más, se debería al lodo. Esto indicaría que el lodo comienza a liberar nutrientes en forma disponible para el cultivo al segundo año.

Según González (2005), el lodo entrega los nutrientes en forma absorbible por las raíces de los cultivos en forma lenta, ya que se requiere un tiempo para que la microflora del suelo logre mineralizar la fracción orgánica del lodo. Particularmente para el maíz choclero, luego de tres temporadas consecutivas de aplicación de lodos, ya sea sólo o en mezcla,

se logra la entrega del nitrógeno contenido en forma disponible para este cultivo.

Al tercer año de aplicación consecutiva de lodo es posible esperar un aporte de un 100% de los fertilizantes nitrogenados y fosforados aplicados, de acuerdo al requerimiento del cultivo, por lo tanto los rendimientos se hacen interesantes luego del tercer año de aplicación de lodos.

Las experiencias de campo señalan que en los primeros años, las mezclas de lodos con fertilizantes minerales y las de fertilizantes minerales puros, dan mejores resultados agronómicos debido posiblemente a una satisfacción de las necesidades nutricionales de los cultivos durante el período vegetativo; ello debido a la mayor solubilidad y disponibilidad de los nutrientes mayores (N y P) aportados por los fertilizantes minerales (González, 2005). En este sentido, Aguilar *et al.*, (1999), señalan que la concentración de nitrógeno en la especie rye-grass presenta una clara tendencia descendente a lo largo del tiempo, dando una idea de que una parte del nitrógeno en los lodos es fácilmente disponible para la planta.

En el Cuadro 11 se presentan algunos resultados obtenidos en forma resumida del Estudio de INIA ejecutado durante las temporadas 2001-2003.

Cuadro 11. Propiedades evaluadas en el suelo, en cultivos y frutales, luego de tres temporadas de aplicación de lodos (Estudio INIA).

Resultados	Componente	Efectos
Elementos traza metálicos	Suelo	C/efecto ^(*) (+) se incrementa el Cu y Zn en el caso de suelos con maíz y avena. S/efecto ^(&) (As, Cd, Hg, Mo, Ni y Pb)
	Tejido Vegetal	S/efecto, no hay evidencia de incremento de ETM en hojas, tallos ni granos.
	Duraznero	S/efecto (sin incremento en pulpa)
Producción de fruta	Duraznero	S/efecto el primer año, no hay caída de rendimientos.
	Uva de mesa	S/efecto.
Peso Poda	Duraznero y uva	C/efecto (+) en todos los tratamientos respecto del testigo.
Análisis foliar	Duraznero	C/efecto (+) se modificó en nivel de N con diferencias entre el tratamiento (F) y (L)
	Uva de mesa	C/efecto (+) se modificó en nivel de P con diferencias entre (F), (F+L) y (L).
Nivel de Clorofila	Duraznero y Uva	C/efecto (+) entre (F), (F+L) y (L).
Resultados	Componente	Efectos
Fertilidad de suelos	pH	C/efecto (-) leve baja del pH (L).
	CE	S/efecto entre los tratamientos aplicados
	MO	C/efecto (+) se incrementa en tratamiento (L) y (F+L)
	N disponible	S/efecto entre los tratamientos aplicados
	P disponible	C/efecto (+) se incrementa en tratamiento (L) y (F+L)
Patógenos en el suelo	Ovas viables de Helmintos	Sin presencia en los suelos con y sin lodo
	Coli fecales	Sin lodo (1,3-7,5), Con lodo (1,7-58)

(*) C/efecto = hay cambio significativo en el suelo tras tres temporadas de aplicación
 (&) S/efecto = no hay un cambio significativo,
 (+)= se incrementa el valor de la propiedad
 (-)=disminuye el valor de la propiedad

Cabe señalar que respecto del contenido total de elementos traza metálicos en los lodos, la literatura es extensa en señalar que en la utilización de los lodos se debe tener en cuenta este aporte, considerando el cadmio, plomo, mercurio, y el talio debido a su incorporación a los suelos e ingreso a la cadena trófica con el consecuente daño a la salud humana y animal (Berti y Jacobs, 1998, Alloway, 1995, Mac Laughlin y Singh, 1999).

El Cuadro 11 señala que el contenido total de elementos traza metálicos en el tejido vegetal de trigo, poroto verde, tomate, avena y maíz choclero después de las tres temporadas de aplicación de lodos, no evidenció movilidad de elementos traza metálicos hacia las estructuras vegetales tales como hojas, tallos, y estructuras comestibles (Tapia, 2005).

Según Carrasco, *et al.*, (2008), los micronutrientes Zn y Mn evaluados a partir de experiencias en laboratorio, indican un aumento del riesgo de movilidad hacia hojas de lechuga y ballica, mientras que Cu y Fe presentan menor nivel de riesgo, ya que se concentran principalmente en las raíces de dichas especies.

Otro ensayo determinó a través de metodologías de extracción secuencial, la distribución de Cu y Zn en los distintos componentes de suelos agrícolas, pertenecientes a suelos de las Regiones L. B. O'higgins y Región Metropolitana, los que fueron tratados con un biosólido en una dosis de 0 y 30 Mg ha⁻¹. Los suelos fueron cultivados en invernadero con plantas de ballica (*Lolium perenne* cv nui) y trébol subterráneo (cv Trikkala). La aplicación del biosólido incrementó el contenido total de ambos elementos traza metálicos, observándose un aumento de las formas lábiles tanto de Cu como de Zn. La absorción de ambos metales fue mayor en el trébol que en la ballica (Ahumada, *et al.*, 2004).

Otra investigación en la misma línea efectuada en laboratorio, en macetas con trébol subterráneo y aplicaciones de lodos de 30 Mg ha⁻¹ en suelos del seco costero de la cordillera de la Región del L.B. O'Higgins, da cuenta de un incremento significativo de las concentraciones de Ni, Cu, Mg y Zn en la materia seca aérea, mientras que el Mn, Zn, Cd y Cu tienden a moverse a la parte aérea, Fe y Ti se concentran en la raíz, pese a ello, el trébol subterráneo responde positivamente a la aplicación de lodo y no se vería afectado por los elementos traza metálicos. El estudio concluye que el trébol responde positivamente a aplicaciones de lodo, sin embargo, sucesivas aplicaciones de lodos podrían incrementar las concentraciones de Cd, Cu Mn y Zn, en el tejido vegetal a niveles no deseables en un sistema sustentable (Carrasco, *et al.*, 2008).

Por otra parte, Hussein (2009), realizó ensayos con dos tipos de suelos (arenoso y calcáreo) bajo condiciones de invernadero con dosis de 0 (control), 25, 50, 75, 100 y 125 Mg ha⁻¹, para determinar los efectos de las diferentes dosis de lodos sobre crecimiento, rendimiento y estado de nutrición de hojas y frutos de pepino. Los resultados arrojaron un mejoramiento de los contenidos de macro y microelementos en hojas y frutos en suelos arenosos y calcáreos. Además, se incrementó el número de frutos y rendimiento de pepino con el aumento de las dosis de aplicación de lodos. El nivel más alto de aplicación de los lodos tiene un mayor efecto sobre el rendimiento de las plantas de pepino.

González (2005) señala que el lodo aporta prácticamente, la totalidad de los nutrientes que requieren los cultivos, pero también incluye otros macro-nutrientes (S, Ca, Mg, Na) y la totalidad de los micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn), aunque no necesariamente balanceados según las demandas vegetales, lo que podría alcanzarse al constituir mezclas con productos minerales específicos.

Utria, *et al.*, (2008), señalan que aplicaciones de lodos o biosólidos al suelo aumentan el contenido de materia orgánica, el fósforo asimilable y calcio cambiante, aspecto que se refleja positivamente en la producción por planta, la cual es superior a la obtenida con la aplicación de fertilizante mineral.

Andrade *et al.*, (2000) compararon el efecto de la aplicación de 5, 10, 20, 40 toneladas de lodo en base seca por hectárea y de un fertilizante inorgánico, más un testigo sin aplicaciones, sobre la concentración de N en el tiempo, encontrando que al final de la temporada del cultivo de maíz, el suelo que recibió lodos contenía mayor concentración de N total respecto al testigo y al fertilizado inorgánicamente. Estos autores señalan que hay una menor pérdida del N y P debido a que estos elementos se encuentran ligados a la fracción orgánica en el lodo, por lo tanto, la mineralización de esta fracción permite un aporte gradual a los cultivos y así se evitan pérdidas por lixiviación que normalmente ocurren con la aplicación de fertilizantes inorgánicos. En cuanto al P, estos autores señalan que presenta un comportamiento similar al N en el tiempo. Estas conclusiones corroboran lo obtenido en los ensayos de INIA.

En relación a las especies frutales evaluadas en el estudio de INIA, Ruiz (2005), señala que el rendimiento en duraznero y uva de mesa, no fue afectado con las dosis aplicadas (21,1 y 11 Mg ha⁻¹ de lodos, respectivamente) y en general no se observaron efectos perjudiciales, ni incrementos en la concentración total de elementos traza metálicos en la pulpa de durazno.

Experiencias acerca del impacto de una sola aplicación de 300 Mg ha⁻¹ en suelos en Grecia Central, evaluados química e isotópicamente, en huertos de olivos, dan cuenta de que después de varios años al comparar áreas enmendadas con lodos y no enmendadas, los resultados arrojaron que en los suelos tratados con lodos se incrementó el contenido total de

elementos traza metálicos en la superficie del suelo y en la zona de las raíces del perfil (Tsadila *et al.*, 2009).

Respecto de la carga patogénica los valores encontrados en los suelos con aplicación de lodos se detectan en un número muy por debajo de lo establecido en la normativa, por lo que se deduce que no se presenta riesgo para la salud humana (INIA, 2005).

Los resultados del estudio abordado por INIA utilizando el lodo como un insumo fertilizante, mostraron que el lodo logra entregar nutrientes a las especies vegetales con dosis de 40 Mg ha⁻¹ luego de tres temporadas, pero también se detectan incrementos de cobre y zinc en los suelos por estas aplicaciones.

4.1.3. Lodo en plantaciones forestales (Universidad de Chile-FONDEF DO111034)

Para efectos de esta tesis se han considerado algunos de los resultados del proyecto Fondef N°DO111034 “Desarrollo de prácticas de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales”, que fue realizado por las Facultades de Ciencias Químicas y Farmacéuticas y de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile, en el año 2005. Este proyecto tuvo por objetivo la caracterización de lodos de diferentes PTAS en tres regiones del país (Valparaíso, L.B. O’Higgins y Maule) y se evaluó el lodo como una enmienda forestal. Además se realizaron ensayos en plantaciones forestales jóvenes y adultas de *Pino radiata* en las regiones de L.B. O’Higgins y Maule y en plantaciones de *Eucaliptos globulus* en la región de Valparaíso.

Se realizaron análisis de lodos respecto del aporte de nutrientes, del contenido total de elementos traza metálicos presentes en los lodos, en el suelo, del tejido foliar y de aguas superficiales. Adicionalmente se

identificaron áreas potenciales para aplicación de lodos en estas tres regiones. El Cuadro 12 entrega algunos antecedentes acerca de las aplicaciones.

Cuadro 12. Antecedentes del estudio de la Universidad de Chile Proyecto FONDEF DO111034.

Región	Predio	Plantación forestal	Tratamientos	
			Rodal joven	Rodal adulto
Valparaíso	Jaururo	<i>Eucaliptos globulus</i> (Rodal adulto)		T1; T2, T3
L.B. O'Higgins	Tanumé	<i>Pino radiata</i> (Rodal joven y rodal adulto)	T1; T2, T3, T4,T5	T1; T2, T3
Maule	San Pedro	<i>Pino radiata</i> (Rodal joven y rodal adulto)	T1; T2, T3, T4,T5	T1; T2, T3

T1= testigo sin lodo; T2= lodo sin compostar equivalente a 400 kg N seco/ha; T3= lodo sin compostar equivalente a 800 kg N seco/ha; T4= lodo compostado equivalente a 400 kg N seco/ha; T5= lodo compostado equivalente a 800 kg N seco/ha).

Resumen de los resultados (Universidad de Chile-FONDEF DO111034)

Este estudio efectuó una caracterización de los lodos de PTAS de diferentes ciudades encontrándose variaciones en los contenidos totales de metales en los lodos de todas las PTAS, una de las razones de tal heterogeneidad correspondió a los procesos de tratamiento al que han sido sometidos los lodos, ya que algunos provenían de digestores, otros de sedimentadores secundarios y otros de lagunas de decantación (Apéndice II, Cuadro I).

Se seleccionaron lodos, los que fueron compostados, en el Cuadro 13 se indican algunas propiedades evaluadas de lodos sin compostar y lodos compostados de algunas PTAS de regiones.

Cuadro 13. Propiedades de los lodos compostados y sin compostar provenientes de tres regiones (Valparaíso, O'Higgins y Maule).

Propiedad	Lodos sin compostar			Lodos compostados		
	Región Valparaíso	Región O'Higgins	Región Maule	Región Valparaíso	Región O'Higgins	Región Maule
pH	5,6	5,2	5,6	7,8	6,1	5,3
C total (%)	31,3	39,2	36,5	36,0	31,0	23,7
N total (%)	5,2	5,9	6,1	2,4	2,0	1,5
C/N	6,0	6,6	6,0	15,0	15,0	16,0

Fuente: Proyecto FONDEF D0111034 (2005).

El estudio señaló que el pH de lodos con y sin compostaje fue adecuado para ser utilizado en los suelos, ligeramente ácido en lodos sin compostaje y neutros en el caso de lodos compostados. En cuanto a la evaluación del contenido de carbono total, éste fue cercano al 30% para ambos tipos de lodos, mientras que el contenido de nitrógeno total fluctuó entre un 5,2 y 6,1% en los lodos sin compostaje, valores que dan cuenta de un buen aporte de N y en los lodos compostados varió entre 1,5 y 2,4% (Aguilera y Rodríguez, 2005) indicando una pérdida importante de nitrógeno.

La relación C/N en los lodos sin compostaje es del orden de 6 y en lodos compostados esta relación es de 15 y 16, valor que implica un producto más estable.

En el Cuadro 14 se presenta el análisis de nitrógeno en los lodos, en sus diferentes formas. El nitrógeno en los lodos compostados disminuye a menos de la mitad del contenido en los lodos sin compostar, esto dado por la dilución en el proceso, sin embargo, la cantidad de N estable aumenta lo que asegura una mayor permanencia en el suelo, prolongando su biodisponibilidad (Aguilera y Rodríguez, 2005)

Cuadro 14. Distribución de nitrógeno de los lodos compostados y sin compostar (g N/100 g suelo).

Propiedad	Lodo sin compostar (g N/100 g suelo).			Lodo compostado (g N/100 g suelo).		
	Valparaíso	Región O'Higgins	Maule	Valparaíso	Región O'Higgins	Maule
N total (%)	5,2	5,9	6,1	2,4	2,0	1,5
N-hum	1,856	1,458	1,618	0,635	0,608	0,427
N-HA	0,033	0,613	0,274	0,224	0,385	0,288
N-FA	0,39	0,39	0,7	0,35	0,12	0,05
N-NO ₃ ⁻	0,0006	0,0003	0,0005	0,0009	0,0149	0,0288
N-NH ₄ ⁺	0,35	0,42	0,54	0,09	0,19	0,0003
N estable (%)	50	48,8	51,3	54,6	64,7	54,3
N-sol	2,6	3,0	2,97	1,09	0,72	0,67

Fuente: Proyecto FONDEF D0111034 (2005), N-hum=Nitrógeno-huminas, N-HA= Nitrógeno-ácidos húmicos, N-FA= Nitrógeno-ácidos fúlvicos, N-NO₃⁻= Nitrógeno-nitrato, N-NH₄⁺= Nitrógeno-amonio, N-sol= Nitrógeno soluble.

El Cuadro 14 presenta la distribución de nitrógeno en lodos compostados y sin compostar de diferentes regiones, estos datos dan cuenta de la disponibilidad de este nutriente y de su calidad como aporte en el suelo. Las fracciones estables de nitrógeno correspondieron aproximadamente al 50% en los dos tipos de lodos.

Algunos estudios han demostrado que la materia orgánica presente en los lodos juega un rol fundamental en la movilidad de los ETM, ya que los compuestos orgánicos estables como los ácidos húmicos pueden formar quelatos, dejándolos en formas no disponibles, disminuyendo la toxicidad a las plantas (Alloway, 1995; Chicón, 2000).

En cuanto al acondicionamiento de los suelos con lodos con y sin compostar, en el Cuadro 15 se presentan algunas propiedades químicas.

Cuadro 15. Algunas propiedades químicas de los suelos con lodos con y sin compostaje

Propiedad	Unidad	Suelo inicial		Suelo con lodos sin compostar		Suelos con lodos compostados	
		Región		Región		Región	
		O'Higgins	Maule	O'Higgins	Maule	O'Higgins	Maule
MO	g kg ⁻¹	52,0	126,0	54,5	127,5	57,9	136,2
N total	g kg ⁻¹	2,0	2,0	2,3	2,4	2,1	2,1
C/N		15,1	36,7	13,7	30,8	16,0	37,6
pH		6,0	6,1	5,6	6,4	5,8	6,4
CE	dS m ⁻¹	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Fuente: Proyecto FONDEF D0111034 (2005)

Se apreciaron incrementos en los contenidos de materia orgánica y nitrógeno total del suelo. El aporte inicial de materia orgánica de lodos compostados en los suelos fue mayor que el de lodos sin compostar. Prácticamente no hubo efecto en el pH ni en la conductividad eléctrica, estos tratamientos presentaron características similares a los suelos testigos (Aguilera y Rodríguez, 2005).

Los lodos con y sin compostar aumentaron la cantidad de nitrógeno mineral de los suelos, sin embargo, la mayor rapidez con que se mineraliza el nitrógeno de suelos acondicionados con lodos frescos, implicaría una mayor preocupación por establecer límites idóneos para el acondicionamiento de distintos tipos de suelos, con el objeto de prevenir el riesgo de lixiviación de nitratos a las napas freáticas en los suelos enmendados (Aguilera y Rodríguez, 2005).

En este estudio se aplicó lodos en plantaciones forestales y de acuerdo a lo señalado en el Cuadro 16, en el predio Tanumé (Región del L.B. O'Higgins), no hubo evidencias positivas en el crecimiento de los árboles transcurrido el período de evaluación. A diferencia del predio San Pedro (Región del Maule), que respondió significativamente a la aplicación de lodos y las plantaciones jóvenes tuvieron un incremento en el área basal.

Cuadro 16. Crecimiento medio en área basal por predio, rodal y tratamientos (período 2002-2005)

Predio	Rodal	T1 ⁽¹⁾	T2 ⁽²⁾	T3 ⁽³⁾	T4 ⁽⁴⁾	T5 ⁽⁵⁾
		(m ² ha ⁻¹)				
Tanumé	Jóven	19.681	18.566	20.808	19.949	18.511
	Adulto	11.321	9.821	9.964	s.i. ⁽⁶⁾	s.i.
San Pedro	Jóven	15.471	18.545	17.102	14.606	15.301
	Adulto	7.538	8.348	9.665	s.i.	s.i.
Jaururo		-1.568	-1.134	-0.140	s.i.	s.i.

Fuente: Proyecto FONDEF D0111034 (2005)

(1)=T1: Testigo sin lodo;

(2)=T2: Lodo sin compostar equivalente a 400 kg N seco/ha;

(3)=T3: Lodo sin compostar equivalente a 800 kg N seco/ha;

(4)=T4: Lodo compostado equivalente a 400 kg N seco/ha;

(5)=T5: Lodo compostado equivalente a 800 kg N seco/ha).

(6)= s.i: Sin información

Por su parte el predio Jaururo, presentó valores negativos de incremento del área basal, tal situación no tuvo relación con la aplicación de lodos sino por un caso de estrés hídrico de la plantación junto con un ataque de plaga. Respecto de las evaluaciones de posible contaminación de aguas subterráneas por aplicación de lodos en los predios forestales, los datos arrojaron que las concentraciones totales de Cd, Fe, Zn, Ni, Mn, Pb, Cu fueron bajas, por cuanto no hubo riesgos de contaminación.

Este estudio determinó que existen a lo menos 298.347 ha potencialmente aptas o muy aptas para la utilización de lodos en suelos forestales en estas regiones.

4.1.4. Discusión sobre las experiencias de uso de lodos en suelos

Conforme a los estudios realizados y antecedentes expuestos, el lodo en las distintas experiencias de evaluación ha sido utilizado como un recurso mejorador y como un fertilizante. Se comprueba a través de los estudios del SAG que posee propiedades de mejorador de suelos, dado su contenido de materia orgánica y según el estudio de INIA presenta

propiedades fertilizantes ya que en su composición aporta diversos nutrientes, esto se corrobora con los incrementos en los contenidos de nitrógeno en el estudio de la Universidad de Chile.

Los estudios analizados (SAG, INIA, Universidad de Chile) han demostrado la factibilidad del uso de los lodos y los resultados apuntan a su utilización en la agricultura y silvicultura, no obstante, con restricciones dadas la presencia de elementos traza metálicos y su carga patogénica.

En países desarrollados, los lodos se han utilizado desde hace muchos años y han sido ampliamente estudiados, existiendo un vasto conocimiento de sus ventajas y desventajas. En Chile, si bien se producen lodos sólo desde hace una década, se ha generado evidencia científica a través de evaluaciones de campo y de laboratorio que han permitido conocer acerca de su comportamiento; se han realizado aplicaciones en el ámbito agrícola y forestal, en forma controlada y bajo supervisión de las autoridades en distintas zonas de la Región Metropolitana y también en otras regiones del país.

Las experiencias analizadas demuestran que los lodos pueden otorgar beneficios a los componentes del agrosistema, como mejorador de suelos, los efectos más evidentes y positivos se advierten particularmente en el mejoramiento de la estabilidad de agregados, el aumento de la capacidad de retención de agua a 33 kPa y la disminución de la densidad aparente a lo largo de las tres temporadas de aplicación y con altas dosis de lodos. Todos estos resultados se han corroborado con la literatura.

En cuanto a los cambios observados en las propiedades químicas en los suelos se observó un mayor contenido de materia orgánica, de fósforo total y de nitrógeno total, lo que produciría un mejoramiento de la fertilidad de estos suelos. No obstante, disminuye el pH de los suelos y aumenta la salinidad en todas las localidades.

El lodo como un aporte de nutrientes según las experiencias efectuadas por INIA evidencian resultados positivos ya que el lodo entrega prácticamente todos los nutrientes que requieren los cultivos, incluyendo macro-nutrientes tales como S, Ca, Mg, Na y la totalidad de los micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn), aunque no necesariamente balanceados según las demandas vegetales. Los nutrientes son aportados en formas absorbibles por las raíces de los cultivos. Dicha entrega se realiza en forma rápida al comienzo (fracción mineral) y luego lentamente dado que debe producirse una mineralización previa de la fracción orgánica del lodo.

De las experiencias de INIA, se demuestra también que aplicaciones que consideran el uso de lodo y fertilizante a la vez tienen mejores resultados agronómicos, en la etapa inicial del cultivo, supuestamente porque hay una satisfacción de las necesidades nutricionales durante el período vegetativo, y esto debido a la mayor solubilidad y disponibilidad de los macronutrientes aportados por los fertilizantes minerales.

Si bien, los lodos aportan ETM al suelo en cantidades muy variables, la acumulación que se produce en los suelos, sólo en algunos casos reporta absorción de elementos traza metálicos, tal como la presencia de zinc en granos de maíz, no obstante, en otros órganos reproductivos como granos de avena, trigo y frutos de tomate no se detectan metales.

En el ámbito forestal las aplicaciones de lodos analizadas en las dosis indicadas, (T1= testigo sin lodo; T2= lodo sin compostar equivalente a 400 kg N seco ha⁻¹; T3= lodo sin compostar equivalente a 800 kg N seco ha⁻¹, T4= lodo compostado equivalente a 400 kg N seco ha⁻¹; T5= lodo compostado equivalente a 800 kg N seco ha⁻¹), no revisten riesgos a la salud humana dado que los bosques no entran en el ciclo trófico de los seres vivos.

4.2 PLANES DE APLICACIÓN DE LODOS EN SUELOS DE LA PROVINCIA DE MELIPILLA RM

Las experiencias de aplicación de lodos en suelos agrícolas analizadas en esta tesis, abarcaron parte del período 2006-2009. El proyecto "Optimización y mejoramiento en la gestión de la PTAS El Trebal", calificado ambientalmente según la RCA N° 659/2007, y la RCA N° 130/2006 que aprobó el Plan de manejo de lodos de la PTAS La Farfana, incorporaron otras alternativas de gestión del lodo, tal como; el secado biológico⁵, el reuso o disposición final de lodos de la PTAS considerando actividades silvo-agropecuarias, compostaje, recuperación de pasivos de la minería, planes de cierre de rellenos sanitarios, valorización térmica, disposición final en rellenos sanitarios y otras experiencias de investigación, todo esto previo a la oficialización de la normativa actual.

Cada plan de aplicación de lodos ejecutado en la provincia indicó previamente la aptitud de cada suelo a través de estudios agrológicos detallados. Se realizaron muestreos iniciales de los suelos para la determinación de los contenidos totales de ETM, según lo dispuesto en las RCAs señaladas anteriormente.

La ejecución de los planes pilotos de aplicación de lodo, se realizaron a diferentes escalas, tanto en el ámbito agrícola como forestal, principalmente en diferentes zonas de la provincia de Melipilla, detalle que se indica en el Cuadro 17.

⁵Secado biológico= proceso de secado que se ha utilizado en la planta de tratamiento de aguas servidas de El Trebal para reducir el contenido de humedad de los lodos que salen del sistema de centrifugado. Se utilizan residuos vegetales, los que actúan como un material absorbente de la humedad del lodo.

Cuadro 17. Planes de aplicación de lodos en las provincias de Melipilla, Chacabuco y experiencias en bosques de Eucaliptus.

Año de aplicación	Provincia/ localidad	Sector	Predio	Superficie (ha)	Cultivo	Dosis lodo Mg ha-1 (M.S.)
Septiembre a Octubre 2006	Melipilla/ Codigua	Fdo. Las Lomas Don Sergio	El Bosque	6,0	Pradera ballica	10,9
			Las abejas	6,8	Maíz silo	
			Los carolinos	9,6	Maíz silo	
	Melipilla/Sn Pedro	Hijuela N° 2 Fundo Las Arañas	Pivote	20,6	Maíz grano	10,8
	Melipilla/Codigua	San Rafael de Codigua	Potrero 1	10,0	Maíz grano	12
Abril a Mayo 2007		Parcela N° 18, Los Guindos	Potreo 1	21,7	pradera	5
			Potrero 2	10,2	trigo	22,6
	Melipilla	Hijuela N° 3 Lote B Fundo San Diego	Potrero La Cruz	41,7	Pradera	10,6
		Hijuela N° 2 Fundo Las Arañas	Potrero Avena	30,6	Avena	10,5
Agosto 2007 a Mayo 2008	Melipilla	Fdo. Las Lomas Don Sergio	Bodega	6,0	Maíz	13,3
			Desague	10,8	Maíz	21,1
			Carolinos Norte	5,0	Maíz	46,8
		Fdo. Sta. Rosa Huechún	Habas	13,2	Maíz	30
Diciembre 2007	Melipilla	Fundo Buraleo	El Morado	7,6	Pradera	1,8
			El avellano	10,7	Pradera	
			Los corrales	1,9	Pradera	
			El Pascual	2,7	Pradera	
			Parcela El Fundito	Potrero 1	5,3	

Cuadro 17. Continuación

Año de aplicación	Provincia/ localidad	Sector	Predio	Superficie (ha)	Cultivo	Dosis lodo Mg ha-1 (M.S.)	
Diciembre 2007	Chacabuco	Fundo El Rutal	T2 y T3	2,5	Pradera	26,5	
	Melipilla	Lote 1 Hijuela Las Encinas	Limonos	13,2	Barbecho	30,4	
	Melipilla	Parcela N° 18 Los Guindos	Potrero 2	10,2	Trigo	29,0	
	Melipilla	Parcela N° 10 Los Guindos	Potrero 4	8,4	Trigo	26,1	
			Potrero 5	9,0	Trigo	27,4	
			Fundo Lomas Don Sergio	Las Abejas	6,8	Avena	29,8
	Melipilla/Codigua	Fundo Lomas Don Sergio	Los Carolinos	9,6	Avena		
			El Bosque	6,0	Maíz Silo	33,6	
			Melipilla/San Pedro	Fundo Las Peñuelas	Las Peñuelas	21	Eucapiltus
	Melipilla/San Pedro	Fundo El Patagual	El Patagual	23	Eucaliptus		
Agosto 2008 a Enero 2009	Melipilla/Codigua	Fundo Santa Marta	Potrero 2	3,5	Maíz	43,9	
			Potrero 3	4,4	Maíz		
			Potrero 4	1,9	Maíz		
	Melipilla/Codigua	Fundo Ostolazas	El bajo	18,1	Maíz	31,6	
			El Molle	26,3	Maíz	37,2	
	Melipilla/Codigua	Parcela San Rafael de Codigua	Potrero 1	10,0	Maíz	33,2	
	Melipilla/San Pedro	Fundo Santa Tatiana	Potreros 1,2, 3.	17,5	Maíz	35,2	
	Melipilla/San Pedro	Parcela 6 El Cardal	Potrero 1	12,5	Pradera	34,4	
			Lote 3 Huechún Alto	Potrero Corral	7,9	Pradera	31,8
			Fundo Buraleo	Potrero 1	8,6	Pradera	46,1
Potrero 1 y 2	12,3	Pradera		50			

Fuente: Seguimiento ambiental de planes de aplicación de lodos en la RM. La M.S. de lodos considera un 25% de sólidos totales.

Del Cuadro 17, cabe destacar que del total de 39 planes de aplicación de lodos ejecutados durante dicho período, el cultivo de maíz se estableció en el 41% de los planes, otro 33% de los planes consideró uso de lodos en praderas, un 10% se aplicó en trigo, un 8% se destinó a la avena, un 3% se usó en suelos en barbecho y un 5% de los planes se ha utilizado en el rubro forestal con bosques de eucaliptus. Las tasas máximas de aplicación variaron entre 30-50 Mg ha⁻¹ de lodo en base a materia seca.

4.2.1 Caracterización del suelo como receptor de lodos

Actualmente, no se cuenta con un catastro a nivel nacional o regional de la caracterización química de los suelos en términos de contenido total de elementos traza metálicos, sólo existen estudios puntuales.

Una fuente de información que se ha generado en este contexto, ha sido el monitoreo del contenido total de elementos traza metálicos de aquellos suelos que han tenido más de una temporada de aplicación de lodos.

El Cuadro 18 presenta un resumen de las propiedades químicas de algunos suelos de la provincia de Melipilla que han sido muestreados para determinar si cumplen o no con los requisitos exigidos en la normativa para ser receptores de lodos, en cuanto a sus características químicas relacionadas con pH, CE, MO, NPK totales y la concentración de elementos traza metálicos.

Los suelos han sido descritos taxonómicamente, caracterizados, además se han asociado a las series de suelos existentes en esas áreas y se entrega información respecto del número de muestras, las que fueron caracterizadas.

Cuadro 18. Propiedades químicas de los suelos utilizados para aplicaciones de lodos en la provincia de Melipilla

Taxonomía		Andisoles con Hardpan Si	Mollisoles aluviales	Alfisoles coluviales			
Serie asociada		AHE+PUD	CDG+HCH+PMR	LVZ+QLM			
Nº Muestras		15	31	7			
Propiedad	Unidad	Valor		Valor		Valor	
		Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
pH		6,90	7,80	7,60	8,40	7,00	7,60
CE	dS m ⁻¹	1,00	4,53	0,56	5,10	0,46	3,86
MO	%	3,10	7,80	1,60	4,60	1,50	3,10
N total	%	0,15	0,70	0,08	0,43	0,09	0,18
P total	g kg ⁻¹	0,31	1,39	0,59	1,32	0,48	0,78
As total	mg kg ⁻¹	2,710	5,26	6,38	28,40	2,77	6,89
Cd total	mg kg ⁻¹	<0,25	<0,25	<0,25	0,37	<0,25	<0,25
Cu total	mg kg ⁻¹	15,90	67,50	33,30	76,90	30,60	92,70
Hg total	mg kg ⁻¹	<0,05	<0,05	<0,05	0,10	<0,05	0,09
Ni total	mg kg ⁻¹	<3,50	11,50	6,68	38,06	3,57	8,62
Pb total	mg kg ⁻¹	8,10	13,10	8,90	24,10	3,40	12,30
Se total	mg kg ⁻¹	<0,15	0,29	<0,15	0,35	<0,15	0,22
Zn total	mg kg ⁻¹	34,70	90,00	52,50	182,00	37,00	67,60

Fuente: Información de planes de aplicación de lodos presentados por Aguas Andinas a la autoridad ambiental.

Si bien, estas características químicas no son representativas de los suelos de toda la provincia de Melipilla, los muestreos fueron efectuados en diferentes sectores de la misma y proporcionan por lo tanto, una tendencia general de las características de los suelos de la zona.

Comparando los resultados de los muestreos de suelos con el Decreto Supremo N° 4/2009, se puede deducir lo siguiente:

- Los suelos presentan pH mayores a 6,5 por lo cual aplicarían las concentraciones máximas menos exigentes para los elementos traza metálicos en los suelos (Apéndice III, D.S. N° 4/2009).
- Si bien, algunos suelos Andisoles y Mollisoles presentan valores de conductividad eléctrica superior a 4 dSm^{-1} , que clasifican como salinos, igualmente pueden ser considerados como receptores de lodos. Si bien esta propiedad se solicita en un plan de aplicación de lodos, no tiene restricciones aunque debiera tenerla ya que la aplicación de lodos, según lo analizado, aumenta la CE de los suelos.
- En cuanto al contenido de materia orgánica se observa un amplio rango (1,5 a 7,8%), valores considerados normales a altos. Estos valores son referenciales ya que la materia orgánica del suelo no constituye un criterio para excluir un suelo de la aplicación de lodos.
- Respecto de los macronutrientes, estos suelos presentan un contenido de N total en rangos de 0,09 a $0,7 \text{ g kg}^{-1}$, lo que indica la gran variabilidad en estos valores y lo mismo ocurre con el P total, cuyo rango varía de 0,31 a $1,39 \text{ g kg}^{-1}$
- La mayoría de las concentraciones de elementos traza metálicos en los suelos muestreados están por debajo de los límites del reglamento, sólo se han observado que en algunos suelos del orden Mollisoles, se sobrepasa el contenido de arsénico y de zinc.
- Asociado a lo anterior es factible de acuerdo a la normativa, aplicar la tasa máxima de aplicación de lodos de 90 Mg ha^{-1} anual, en suelos de la provincia de Melipilla.

4.2.2 Caracterización de lodos tratados aplicados en suelos

Los datos presentados en el Cuadro 19, corresponden a valores promedios de muestreos que se han realizado en distintas temporadas de aplicación de lodos (2006-2009).

Cuadro 19. Caracterización química y microbiológica de los lodos utilizados en las aplicaciones entre 2006-2009

Propiedad	Unidad	Expresión	Valores	Normativa vigente
pH			6,4-6,5	NR ⁽¹⁾
CE ⁽²⁾	dS m ⁻¹		9,1-11	NR
MO	%		40-50,5	NR
N total	g kg ⁻¹	N	26,8-28,5	NR
P total	g kg ⁻¹	P ₂ O ₅	52,4-61,5	NR
K total	g kg ⁻¹	K ₂ O	2,7-3,3	NR
Ca total	g kg ⁻¹	CaO	66,3-98,5	NR
S total	g kg ⁻¹	S	2,7	NR
As total	mg kg ⁻¹	As	15,9	20-40
Cd total	mg kg ⁻¹	Cd	2,0	8-40
Cu total	mg kg ⁻¹	Cu	526,7	1000-1200
Hg total	mg kg ⁻¹	Hg	2,2	10-20
Ni total	mg kg ⁻¹	Ni	61,1	80-420
Pb total	mg kg ⁻¹	Pb	59,3	300-400
Se total	mg kg ⁻¹	Se	2,8	50-100
Zn total	mg kg ⁻¹	Zn	1218	2000-2800
Coli fecales	NMP g ⁻¹	<2	2*10 ⁻⁶	Clase A<1000; Clase B<2.000.000
Ovas helmintos	U/10 g	0	1	NR
Ovas viables	U/10 g	0	0	Clase A=<1/4 g; Clase B= sin restricción

Fuente: Seguimiento ambiental de proyectos evaluados ambientalmente (SEIA).

(1) NR= No regulado

(2) CE= Determinado en extracto de saturación

Del Cuadro 19, se destaca que los lodos correspondientes a lotes producidos en la PTAS El Trebal, tienen pH ligeramente ácido, son lodos salinos ya que la conductividad se encuentra en valores de 9,1 a 11 dS m⁻¹. Presentan alto contenido de materia orgánica y un buen nivel de N y P totales. Para Smith (2009), la composición de los lodos de depuradora no sólo es una función del material de origen, es decir, de las entradas a la depuradora, sino también del método de tratamiento de lodos.

Los resultados del análisis de elementos traza metálicos totales señalan valores que se encuentran por debajo de lo requerido en la normativa. Los valores concuerdan con los rangos que se han obtenido en otras caracterizaciones.

Cabe señalar la alta calidad microbiológica que presentan estos lodos, ello debido a que fueron sometidos a un proceso de biosecado. Según Epstein (2003), las características de los lodos tratados o biosólidos juegan un papel muy importante para su aplicación agrícola. Si bien, contienen una amplia variedad de microorganismos, muchos de ellos muy benéficos pero otros pueden ser peligrosos para la salud humana, animal o para las plantas.

4.2.3 Información de algunos planes de aplicación de lodos

Se han seleccionado dos predios con información de suelos luego de una temporada de aplicación de lodos.

El Cuadro 20 entrega algunos resultados de dos predios de la provincia de Melipilla antes y después de una aplicación de lodos. Un predio con una superficie de 10 ha de trigo y el otro con 31 ha de avena. Las dosis de lodos correspondieron aproximadamente a 40 Mg ha^{-1} en base seca. En estos predios además se evaluaron las propiedades del suelo y también las aguas de infiltración, sin embargo no se ha evaluado efectos de elementos traza metálicos en los cultivos.

Cuadro 20. Propiedades químicas determinadas en dos predios antes de la aplicación de lodos y al final de la cosecha de cada cultivo.

Propiedades químicas	Unidad	Predio 1 (Trigo)		Predio 2 (Avena)	
		Inicio	Final	Inicio	Final
pH		6,1	5,6	6,3	6,6
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	0,2	0,8	0,2	0,8
Materia orgánica	%	1,5	2,3	2,1	3,4
N total	g kg ⁻¹	0,09	0,10	0,09	0,2
P total	g kg ⁻¹	0,86	0,6	0,28	0,8
As total	mg kg ⁻¹	2,1	2,9	1,6	2,1
Cd total	mg g ⁻¹	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25
Cu total	mg kg ⁻¹	67,3	65,9	12,0	34,7
Hg total	mg kg ⁻¹	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Ni total	mg kg ⁻¹	7,8	7,8	6,8	10,1
Pb total	mg kg ⁻¹	13,8	14,4	5,3	9,5
Se total	mg kg ⁻¹	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15
Zn total	mg kg ⁻¹	93,5	96,5	29,4	71,1

Fuente: Planes de aplicación de lodos en suelos (Aguas Andinas S.A)

Del Cuadro 20 se observa que el predio 1 tuvo una disminución del pH del suelo al final de la temporada, similar a lo que ocurre en otras experiencias de aplicación de lodos, no así en el predio 2 que aumentó. En los dos sitios aumentó la conductividad eléctrica, el contenido de materia orgánica y el N total.

Respecto de elementos traza metálicos especialmente el Cd, Hg y Se, se encontraban por debajo de los límites de detección, tanto en situación de línea base (inicio) como con aplicación de lodos (final). Si bien, las concentraciones de elementos traza metálicos son bajas en los dos predios, se ha producido un incremento de Zn en los suelos.

El Zn es el metal más abundante en los lodos, por lo tanto, es el elemento que con mayor probabilidad puede detectarse en el suelo tratado con lodo y puede ser analizado sin problemas. En este sentido cabe señalar que los

laboratorios existentes en el país que efectúan caracterizaciones de suelos y lodos, tienen dificultades para determinar algunos metales (Hg, Se) con buena confiabilidad, lo que se ha comprobado tras una serie de rondas interlaboratorios⁶ realizadas por el Servicio Agrícola y Ganadero del Ministerio de Agricultura.

Cabe mencionar que los planes de aplicación de lodos analizados no consideran la determinación de elementos traza metálicos disponibles antes ni después de la aplicación de lodos.

4.2.4. Discusión sobre planes de aplicación de lodos en suelos en la provincia de Melipilla

Los planes de aplicación de lodos han tenido buenos resultados tanto en el suelo como en los cultivos.

Desde el punto de vista de la fertilidad de suelos, los datos dan cuenta del aporte nutricional de los lodos. Es decir, el nitrógeno y el fósforo pasan a constituir el pool de nutrientes orgánicos de reserva en el suelo, lo que incide finalmente en el rendimiento de los cultivos. No obstante, falta un análisis más profundo de los riesgos de contaminación por fosfatos por escorrentía y por lixiviación de nitratos a aguas subterráneas,

Se evidencia el aporte de elementos traza metálicos en el suelo, principalmente los metales Cu y Zn, y secundariamente también Cd, Hg y Ni, en algunos planes.

⁶ La División de Protección de Recursos Naturales Renovables del Servicio Agrícola y Ganadero (Ministerio de Agricultura) ha efectuado una serie de rondas interlaboratorios con objeto de cumplir con las exigencias del D.S. N°4/2009 respecto de la validación de los análisis y mediciones que efectúen los laboratorios que presten servicios de caracterización de lodos y suelos (Art. 27).

Dados los efectos en los predios se ha producido un aumento del número de agricultores en la provincia, interesados en utilizar lodos como alternativa para mejorar sus suelos y para complementar y reducir el uso de fertilizantes minerales. En efecto, hay agricultores en la provincia de Melipilla que han incorporado lodos en sus predios en más de una temporada agrícola.

Los planes de aplicación de lodos, a la fecha han generado información detallada y puntual del contenido total de elementos traza metálicos en diferentes suelos de la provincia.

También se ha evaluado la calidad microbiológica de las aguas subsuperficiales, dando cuenta de una baja carga patogénica, también se ha evaluado el contenido de elementos traza metálicos en dichas aguas y los datos indican valores bajos de concentración.

Finalmente, se aconseja que los planes de manejo debieran incorporar mayores estudios respecto al comportamiento de los nutrientes, de su incorporación a los suelos, de sus migraciones y acumulaciones, de sus efectos sobre aguas superficiales y subterráneas, y las consecuencias en la salud humana y animal, para lo cual debiera considerar la realización de algunos ensayos experimentales en donde se determine la concentración de elementos traza metálicos en los tejidos vegetales.

4.3. IMPACTOS ASOCIADOS A LA APLICACIÓN DE LODOS EN AGROSISTEMAS

Uno de los mayores impactos benéficos que se ha registrado con el plan de saneamiento de aguas servidas de la Región Metropolitana, ha sido el mejoramiento de la calidad de las aguas superficiales, pero también se ha generado otro impacto, que es la importante producción de lodos, los que inicialmente han sido llevados en su totalidad a rellenos sanitarios y monorellenos o a sitios autorizados.

Dadas las experiencias analizadas, las aplicaciones de lodos han sido una alternativa de reutilización en suelos y en general las evaluaciones de estas aplicaciones han generado impactos positivos en la calidad química del suelo (aumento de la materia orgánica, del nitrógeno total y del fósforo total), como también, en la calidad física de los suelos (mejor agregación de partículas de suelo, aumento en la capacidad de retención de agua del suelo).

Otro impacto benéfico que se ha observado con las aplicaciones de lodos tiene relación con la posibilidad de disponer de nutrientes provenientes del lodo en forma gradual, y a partir de un determinado tiempo (tres temporadas de aplicación), se logran incrementos mayores en los rendimientos respecto al testigo y al de un cultivo con fertilización mineral, éstos resultados son de especial interés para la sostenibilidad del agrosistema.

Los beneficios se contraponen con impactos negativos que se producen por la aplicación de lodos, los que tienen relación con el aumento de la salinidad del suelo, la disminución del pH y la acumulación en el suelo de algunos elementos traza metálicos, particularmente cobre y zinc, y de exceso de nutrientes.

4.3.1. Impactos ambientales por nutrientes

Dado que el lodo presenta un contenido de N de tipo orgánico y su entrega es gradual al suelo y luego al cultivo, ello implicaría un bajo riesgo de lixiviación de nitratos y consecuentemente un bajo riesgo de contaminación de acuíferos; situación similar ocurre con el P presente en el lodo respecto a la eutrofización. Sin embargo, al aplicar una dosis alta de lodos durante varias temporadas sucesivas, la experiencia demuestra que se generan impactos ambientales por los excesos de N y P.

A continuación, en el Cuadro 21, se presenta una comparación de la composición de nutrientes entre los fertilizantes minerales habitualmente utilizados en la producción agrícola y el lodo.

Cuadro 21. Composición de nutrientes en fertilizantes y lodo

Insumos	Nitrógeno (N)	Fósforo (P)	Potasio (K)	Calcio (Ca)	Azufre (S)	Materia orgánica
	kg t ⁻¹					
Urea ⁽⁺⁾	460	0	0	0	0	0
SFT ⁽⁺⁾	0	460	0	210	0	0
K ₂ SO ₄ ⁽⁺⁾	0	0	500	0	180	0
Mezcla maicera	290	140	80	40	5	0
Lodo^(*)	27,7	57,0	3,0	82,4	2,7	452

(+) Formulaciones químicas de fertilizantes.

(*) Según la caracterización química del lodo (Cuadro 19), se usó el valor promedio.

Del cuadro 21 se obtienen los distintos aportes de nutrientes, pudiendo observarse que la mezcla maicera y el lodo contienen un espectro más amplio de nutrientes, a diferencia de la urea que sólo aporta N, o del SFT que sólo aporta P y Ca.

El Cuadro 22 entrega el aporte de diferentes nutrientes presentes en el lodo a diferentes dosis de aplicación (se utilizó el contenido promedio de los

nutrientes, según lo indicado en el Cuadro 19). Se observa que a las dosis señaladas en la normativa de 30 y 90 Mg ha⁻¹, los contenidos totales de todos los macronutrientes requeridos por aquellos cultivos de alta extracción, tales como maíz y trigo, superan ampliamente sus requerimientos nutricionales.

Cuadro 22. Aporte de diferentes nutrientes del lodo a distintas dosis de aplicación.

Lodo (Mg ha ⁻¹)	Nitrógeno (N)	Fósforo (P)	Potasio (K)	Calcio (Ca)	Azufre (S)	Materia orgánica
kg						
1	27,7	57,0	3,0	82,4	2,7	452
15	415,5	855,0	45,0	1236,0	40,5	6.780,0
30^(*)	831,0	1.710,0	90,0	2.472,0	81,0	13.560,0
90^(*)	2.493,0	5.130,0	270,0	7.416,0	243,0	40.680,0

(*)=Dosis de aplicación de lodos señaladas en la normativa vigente.

Comparando los valores de la tabla anterior con lo que demanda nutricionalmente el maíz por año y hectárea (404 kg de N y 100 kg de P), en teoría para este tipo de cultivo y de acuerdo a las características de lodos al aplicar 15 Mg ha⁻¹ de lodos se satisface la demanda nutricional. Sin embargo, los estudios de INIA han demostrado que el aporte de nutrientes minerales del lodo durante la primera temporada de aplicación es ínfimo, no superando el 6% de contenido del nitrógeno. Recién al segundo año de aplicación hace un aporte del 50% y al tercer año es del 100% de su contenido de nitrógeno.

Esto quiere decir que los valores de nitrógeno total como de fósforo total, no se mineralizan totalmente al primer año de aplicación, por cuanto se debiera considerar el nitrógeno y fósforos inorgánicos más la tasa de mineralización.

Como un ejercicio teórico para el caso anterior, para satisfacer la demanda de nitrógeno y de los otros nutrientes, si se aplica una dosis anual de 15 Mg ha⁻¹, de lodos durante las primeras dos temporadas se debe complementar con

fertilizantes minerales. Durante la primera temporada se aplicaría una dosis completa de fertilizante mineral y durante la segunda temporada la mitad. A partir de la tercera temporada se sostendría el agrosistema sólo con lodos a la misma dosis de 15 Mg ha^{-1} . Sin embargo, este ejemplo debe ser validado con un mayor número de suelos.

Lo anterior evitaría una sobrecarga del agrosistema con nitrógeno, pero aún con esta baja dosis se aportarían otros nutrientes en cantidades muy superiores a la demanda de este tipo de cultivo, especialmente el P, lo que puede generar efectos perjudiciales en el agrosistema.

Cabe mencionar que la normativa de manejo de lodos no considera aspectos de la demanda nutricional de los cultivos ni los excedentes de nutrientes en los suelos. Además, queda en evidencia que la dosis máxima de 90 Mg ha^{-1} estipulada en dicha normativa es muy elevada, pudiendo generar impactos adversos en los agrosistemas.

4.3.2. Impactos ambientales por elementos traza metálicos

En la agricultura, la principal entrada de elementos traza metálicos al suelo es por el uso de fertilizantes fosfatados; éstos contienen cadmio. Se ha constatado que la acumulación progresiva de elementos traza metálicos en los suelos y especialmente el cadmio tiene efectos negativos en la salud humana (Valenzuela, 2001).

En Chile, la aplicación de fertilizantes fosfatados en los cultivos estaría generando una acumulación de algunos ETM en el suelo, lo que puede provocar deterioro del recurso y efectos perjudiciales para la salud humana (Villanueva, 2003). El mismo autor señala que el uso de estos fertilizantes con las mayores concentraciones de cadmio así como la máxima tasa de fertilización recomendada para el cultivo del maíz, estaría provocando contaminación de los suelos en un plazo de 38 a 40 años usando como

referencia la concentración límite de cadmio de $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ de suelo seco, pese a ello su uso en Chile no tiene restricciones. Aún a bajas concentraciones de Cd, las plantas absorben Cd (Carrasco, *et al*, 2008).

Por otra parte, es sabido que una de las mayores preocupaciones y restricciones al uso de lodos en la agricultura es su contenido de elementos traza metálicos. Las experiencias analizadas (INIA, SAG) demuestran que a mayores dosis de aplicaciones de lodos al suelo se incrementan los contenidos de As, Cu, Pb y Zn.

Si se consideran las concentraciones promedio de metales determinadas en el Cuadro 19, se puede obtener el aporte con diferentes dosis de aplicación de lodos. En el Cuadro 23 se indica el aporte de elementos traza metálicos al suelo.

Cuadro 23. Aporte de ETM por el lodo a distintas dosis de aplicación.

Parámetro	Concentración promedio de metales en lodo (mg kg^{-1}) ^(&)	Dosis de aplicación de lodos (Mg ha^{-1}) ^(*)			
		1	15	30	90
		Concentración de metal en suelo (mg kg^{-1})			
As total	15,9	0,01	0,09	0,17	0,51
Cd total	2,0	0,00	0,01	0,02	0,06
Cu total	526,7	0,19	2,82	5,64	16,93
Hg total	2,2	0,00	0,01	0,02	0,07
Ni total	61,1	0,02	0,33	0,65	1,96
Pb total	59,3	0,02	0,32	0,64	1,91
Se total	2,8	0,00	0,02	0,03	0,09
Zn total	1218	0,44	6,53	13,05	39,15

(&)= Valores en base a materia seca

(*)= Para calcular el aporte de ETM al suelo, se consideró una masa de suelo de 2.800 kg correspondiente a una densidad aparente de suelo de $1,4 \text{ kg m}^{-3}$ con una capa arable de 20 cm.

Observando el Cuadro 23, al aplicar 15 Mg ha^{-1} de lodos, se adicionan aproximadamente $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$ de cadmio al suelo. Esta cantidad de Cd aplicado al suelo corresponde a la mitad de lo que aporta el SFT⁷. Estudios demuestran que aplicaciones periódicas de SFT y su contenido de Cd, no ha sido abordado suficientemente y no se ha dimensionado su efecto en el largo plazo (Villanueva, 2003; Valenzuela, 2001).

Por otro lado, los resultados del Cuadro 23 demuestran que tras aplicaciones sucesivas de lodos con la máxima dosis que señala la norma, se genera acumulación de elementos traza metálicos en el suelo. Aunque los potenciales impactos ambientales resultantes están controlados ambientalmente por las restricciones que establece la normativa respecto de los elementos traza metálicos. Sin embargo, existen estudios que detectaron incrementos de zinc en trigo (SAG, 2004) y de Ni, Cu, Mg, Zn en hojas de trébol (Carrasco et al., 2008).

4.3.3. Impactos ambientales por patógenos

Tanto en los estudios de SAG y de INIA, como resultado de la aplicación de lodos, no se observaron efectos sobre la población de coliformes fecales ni ovas viables de helmintos. Lo anterior, sólo es válido si hay tratamiento previo de los lodos mediante biodigestión o sistemas similares.

4.3.4. Impacto al Cambio Climático

Otro aspecto que se relaciona con la tasa máxima de aplicación de lodo indicada en la norma, es respecto al calentamiento global, cabe mencionar que la disposición de lodos en monorellenos o rellenos sanitarios provoca una importante generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), dado que las

⁷ Aclaración: SFT contiene 267 mg de Cd. Al aplican 100 kg de P proveniente del SFT, se aporta $0,021 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd al suelo (Villanueva, 2003).

condiciones anaeróbicas dentro de los depósitos fomentan la producción de metano (CH₄). De acuerdo al IPCC (2007), el metano es 25 veces más dañino que el dióxido de carbono (CO₂).

Lo anterior es especialmente relevante en depósitos sin adecuado sistema de captación y tratamiento del biogás. La emisión de estos GEI se evita con la aplicación de lodos en suelos, dadas las condiciones aeróbicas asociadas a la incorporación.

4.4 ANÁLISIS DE LA NORMATIVA ASOCIADA A LA APLICACIÓN DE LODOS EN SUELOS

A continuación, se realiza un análisis de la normativa asociada específicamente a la aplicación de lodos en suelos, especialmente del reglamento chileno recientemente promulgado. Además, se efectúa una comparación con los principales criterios técnicos, sanitarios y ambientales de la normativa americana y europea y de algunas de América latina.

4.4.1 Normativa chilena (D.S.Nº4/2009)

El Decreto Supremo Nº 4, MINSEGPRES, del 30/01/2009, “Reglamento para el Manejo de Lodos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas”, fue oficializado en octubre de 2009 y entró en vigencia el 28 de abril de 2010. Este reglamento, de acuerdo a su artículo 1, tiene por objeto regular el manejo de los lodos provenientes de plantas de tratamientos de aguas servidas, y establece la clasificación sanitaria de lodos y las exigencias mínimas para su manejo, además de restricciones, requisitos y condiciones técnicas para la aplicación de lodos en determinados suelos. Es decir, este reglamento resalta, ya en su primer artículo, la temática de aplicación en suelos. Esta norma aplica una serie de requisitos de tratamiento para la reducción del potencial de atracción de vectores y la presencia de patógenos para definir la clasificación sanitaria de los lodos. Se clasifica a los lodos en clases A y B, y se indican condiciones de operación de procesos de higienización para obtener cada categorización.

En relación al manejo sanitario de los lodos se establece que toda PTAS debe contar con un proyecto de ingeniería aprobado por la Autoridad Sanitaria, el que deberá dar cuenta del almacenamiento, tratamiento, transporte, disposición final y de los aspectos sanitarios de la aplicación de los lodos al suelo. Se exige que no existan riesgos para la salud de la población y para el medio ambiente entre otros aspectos.

Se permite en forma restrictiva la disposición de lodos en relleno sanitario considerando determinadas cantidades de lodos a disponer diariamente, no superior a un 6% del total de los residuos dispuestos diariamente, pudiendo autorizarse, en condiciones técnicas justificadas hasta un 8%, con humedades específicas, así también se permite la disposición en monorellenos.

Respecto de la aplicación de lodos al suelo, se requiere la elaboración previa de un plan de aplicación, el que debe contener, además de los datos que identifiquen al generador y en forma individual los predios o potreros donde se efectuará la aplicación, información sitio específica del área de aplicación, caracterización tanto del suelo como de los lodos, del manejo agronómico, entre otros. Además, se señalan los distanciamientos de la zona de aplicación.

Esta norma prohíbe el esparcimiento de lodos en aquellos suelos con: pH inferior a 5; en aquellos suelos de texturas gruesas (con más de un 70% de arena); en zonas con riesgo de inundación; en suelos saturados la mayor parte del tiempo (vegas, bofedales, ñadis); en suelos cubiertos con nieve; en aquellos suelos que se encuentren a menos de 15 m de riberas de ríos y lagos y que cuenten con recurso para bebida animal; prohíbe el uso de lodos en suelos ubicados en pendientes superiores al 15%, con la excepción de que a mayores pendientes, el área de aplicación debe presentar una cobertura vegetal arbustiva o arbórea, y la aplicación propiamente tal debe ser localizada.

Por otra parte, establece concentraciones máximas para ocho elementos traza metálicos en los suelos (As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Se y Zn) en función del pH y de las macrozonas para el país, según se indica en el Cuadro 24.

Cuadro 24. Concentraciones máximas de ETM en suelo receptor

Metal	Concentración máxima en mg kg^{-1} (en base materia seca) ⁽¹⁾		
	Macrozona norte		Macrozona sur
	pH>6,5	pH≤6,5	pH>5
As	20	12,5	10
Cd	2	1,25	2
Cu	150	100	75
Hg	1,5	1	1
Ni	112	50	30
Pb	75	50	50
Se	4	3	4
Zn	175	120	175

Fuente: D.S. N° 4/2009

(1) =Concentraciones expresadas como contenidos totales de elementos traza metálicos.

Se establece una tasa máxima de aplicación de lodos de 90 Mg ha^{-1} anual, en aquellos suelos que cumplan con los requisitos de concentración de elementos traza metálicos, no obstante, en aquellos casos en que el suelo posea una concentración de cualquier metal pesado superior a lo señalado en el Cuadro 24, se podrá aplicar por una única vez, una tasa de 30 Mg ha^{-1} .

Por otra parte, la normativa indica que en aquellos suelos destinados a cultivos hortícolas o frutícolas menores, que estén en contacto directo con el suelo y que se consuman normalmente sin proceso de cocción, los lodos clase B deberán aplicarse con a lo menos 12 meses de antelación a la siembra. Se prohíbe la aplicación de lodos durante el ciclo vegetativo de estos cultivos. En el caso de praderas y cultivos forrajeros, podrá procederse al pastoreo o a la cosecha transcurridos 30 días desde la última aplicación de lodos clase B. En suelos de uso forestal la aplicación de lodos clase B podrá efectuarse sólo si se cuenta con un control de acceso al área durante los 30 días posteriores a la aplicación.

Se indican los límites máximos de concentración de los elementos traza metálicos en los lodos, en función de las condiciones y características de los suelos, según lo indicado en el Cuadro 25.

Cuadro 25. Concentraciones máximas de ETM en lodos para aplicación al suelo

Concentraciones máximas en mg kg⁻¹ de sólidos totales (base materia seca)⁽¹⁾		
Metal	Suelos que cumplen los requisitos establecidos en este título	Suelos degradados que cumplen los requisitos establecidos en este título
As	20	40
Cd ^(*)	8	40
Cu	1000	1200
Hg ^(*)	10	20
Ni	80	420
Pb ^(*)	300	400
Se ^(*)	50	100
Zn	2000	2800

Fuente: D.S. N° 4/2009

(1)= Concentraciones expresadas como contenidos totales de elementos traza metálicos
 (*)= Cuando las concentraciones totales de cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb) y selenio (Se) superen los valores de 20, 4, 100 y 20 mg kg⁻¹, respectivamente se deberá demostrar que estos lodos no son peligrosos de acuerdo a lo establecido en el DS 148/2003 del Ministerio de Salud

Por otra parte, la norma señala los procedimientos de medición y control de los lodos, de informes anuales que deben ser presentados por el generador de lodos y acerca de la fiscalización de los organismos del Estado.

4.4.2 Normativa europea (86/278/EEC)

En 1986, el Consejo de las Comunidades Europeas dictó la Directiva 86/278/CEE, que tiene por objeto regular la utilización de los lodos de depuradora en agricultura de modo que se eviten efectos nocivos en los

suelos, en la vegetación, en los animales y en el ser humano, al mismo tiempo que se estimula su utilización correcta. Es válida para todos los países miembros de la unión, no obstante, cada uno puede fijar condiciones más estrictas.

Reconoce que los lodos presentan propiedades agronómicas útiles y toma en cuenta la utilización de las necesidades de nutrición de las plantas (art. 8), y fomenta el uso de lodos en agricultura en condiciones adecuadas. Los lodos deben tratarse antes de utilizarse en la agricultura.

En sus anexos fija valores límites máximos de concentración de elementos traza metálicos en los suelos expresados en mg kg^{-1} de materia seca de una muestra representativa de los suelos, cuyo pH sea de 6 a 7, valores límite de concentración máxima de elementos traza metálicos en los lodos destinados a su utilización en agricultura expresados en mg kg^{-1} materia seca, valores límite máximos para las cantidades anuales de elementos traza metálicos que se podrán introducir en las tierras cultivadas basándose en una media de 10 años en $\text{kg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$.

Se debe prohibir la utilización de los lodos cuando la concentración de uno o de varios elementos traza metálicos en los suelos supere los valores límites fijados. Además, se deben adoptar las medidas necesarias para garantizar que estos valores límite no se superen por la utilización de los lodos.

Respecto a la tasa de aplicación de lodos, ésta varía en una escala amplia de 1 a 10 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. No obstante, el aporte promedio usado por algunos países está en el rango de 2 a 3 Mg ha^{-1} y no supera un lapso de 10 años.

Los Estados Miembros deben prohibir la utilización de lodos: en pastos o en cultivos, si se procede al pastoreo o a la cosecha de los cultivos en esas tierras antes de la expiración de un determinado plazo establecido (mínimo tres semanas); en cultivos hortícolas y frutícolas durante el período de

vegetación, con la excepción de árboles frutales; en suelos destinados a cultivos hortícolas o frutícolas que estén normalmente en contacto directo con el suelo y que se consuman normalmente en estado crudo, durante un período de diez meses antes de la cosecha y durante la cosecha misma.

La Directiva no propone ningún límite respecto del contenido de contaminantes orgánicos en lodos, pero algunos países como Alemania lo han introducido. Tampoco hace mención específica a concentraciones de patógenos, pero países como Italia, Francia, Luxemburgo, Dinamarca y Austria han incluido límites respectivos.

4.4.3 Normativa EEUU (40 CFR, Part 503)

Durante los años 1988 a 1991, la Environmental Protection Agency (EPA) efectuó una intensa investigación que abarcó 208 PTAS y el análisis de 419 contaminantes para identificar los potenciales riesgos asociados a distintas opciones de uso de los lodos tratados. Paralelamente y durante varios años se desarrollaron otros estudios de riesgo y una serie de muestreos en todo el país, los que en su conjunto llevaron a obtener la regulación “The Standards for the use or disposal of sewage sludge (title 40 of the Code of Federal Regulation [CFR, Part 503]”, publicada en 1993. Esta regulación establece las normas nacionales para el manejo y uso de lodos derivados del tratamiento de aguas servidas domiciliarias para asegurar la protección de las personas y el medio ambiente.

La regulación 503 incorpora estándares para el uso, disposición superficial e incineración, y requisito para la reducción de patógenos. Establece lodos de clases A y B. Los lodos clase A aseguran altos niveles de protección y requieren métodos avanzados de higienización, por tanto pueden ser utilizados sin restricciones en jardines, bosques, cultivos agrícolas y áreas públicas. Los lodos clase B contemplan mínimos de protección y pueden ser aplicados con restricciones locales en bosques, zonas agrícolas y áreas de

mínimo contacto con el público. Otras restricciones sanitarias que impone la EPA para aplicar lodos al suelo son: la reducción de la atracción de vectores, para lo cual entrega diversas alternativas y una frecuencia de monitoreo de acuerdo a la cantidad anual de lodos dispuesta.

La aplicación de lodos al suelo incluye un uso benéfico a tasas agronómicas, es decir, tasas para proveer la cantidad de nitrógeno necesaria para los cultivos o vegetación, minimizando la cantidad que pasa más allá de la zona de raíces.

Se definen límites para la concentración de nueve contaminantes inorgánicos (As, Cd, Cu, Hg, Ni, Mo, Se, Pb y Zn).

Esta regulación prohíbe el uso de lodos en zonas inundables y humedales, a menos de 10 m de aguas superficiales o cuando exista exceso de nitrógeno en el suelo. Se permite el destino de los lodos a monorellenos exclusivos para lodos, estableciendo requisitos de diseño, clausura y post clausura, límites de contenido de Cr, NO_3^- , As y Ni para la protección de aguas subterráneas. Además, controla la incineración de los lodos señalando límites para Pb, As, Cd, Cr y Ni e hidrocarburos y CO_2 en los gases emitidos.

4.4.4. Normativas en América latina

En América Latina (AL) países tales como Argentina, Brasil, México cuentan con regulaciones para el manejo de lodos y biosólidos. En tanto, Colombia presenta una normativa, pero que no es específica para lodos y Ecuador tiene una normativa en desarrollo. El resto de países a la fecha no han implementado una regulación respectiva. En todas las normas vigentes se definen criterios para aplicación agrícola (Mena, 2008).

Algunos países, tienen restricciones ligeras respecto a la aplicación de lodos en suelos. Por ejemplo en Colombia, la normativa define a los lodos como

productos orgánicos que puedan ser usados como abonos o fertilizantes, o como enmiendas (acondicionadores) del suelo. Por otra parte, la regulación mexicana establece límites poco restrictivos y sólo para algunos elementos traza metálicos.

No obstante, hay que considerar que muchos países de AL todavía no cuentan con PTAS o sólo con una cobertura baja del servicio de saneamiento básico, por lo que sólo se están generando reducidas cantidades de lodos.

En todo caso, la utilización de lodos en la agricultura en AL, a pesar de ser una práctica relativamente conocida en algunos países antes de los años 90, no representa un gran porcentaje del destino de los lodos, ya que la gran mayoría es dispuesto en rellenos sanitarios (Mena, 2008).

4.4.5 Comparación de normativas

De acuerdo a las normas descritas existen puntos en común, así por ejemplo, el objeto de protección para todas ellas, es la protección del medio ambiente, con algunos énfasis ya que la normativa europea, releva la protección de los suelos, mientras que la americana y la chilena protegen la salud de la población (Cuadro 26).

Las regulaciones europeas están basadas en límites precautorios de los contaminantes en el suelo, reconociendo la persistencia por contaminantes; el objetivo es prevenir la acumulación de contaminantes inorgánicos en el suelo por sobre los valores establecidos, similar a lo indicado en la norma chilena.

Sin embargo, en la norma de EEUU, los límites de compuestos inorgánicos están basados en la evaluación de los riesgos potenciales a los humanos, animales y plantas debido a contaminantes en los lodos. El límite se establece como aquella concentración mínima, que representa un riesgo aceptable para las vías de exposición evaluadas.

Cuadro 26. Comparación de normas

Variables	D.S. N° 4/2009 (Chilena)	40 CFR Part 503 (EEUU)	86/278/EEC (Unión Europea)
Objeto de protección	Salud humana , medio ambiente y suelo	Salud humana, medio ambiente	Suelos y medio ambiente
Disposición (residuo)	Monorelleno/Relleno sanitario/Suelo	Monorelleno/Incineración/Suelo	Monorelleno/Relleno sanitario/Incineración/Suelo
Clasificación sanitaria lodos	Reducción de patógenos Clase A y Clase B	Reducción de patógenos Clase A y Clase B	(*)
Prop. físicas en suelos	Clase textural (%arena gruesa)		
Prop. químicas en suelos	As/Cd/Cu/Hg/Ni/Pb/Se/Zn/pH/CE/MO	As/Cd/Cu/Cr/Hg/Mo/Ni/Pb/Se/Zn	Cd/Cu/Hg/Mn/Ni/Pb/Se/Zn
Prop. químicas en lodos	As/Cd/Cu/Hg/Ni/Pb/Se/Zn/pH/CE/MO/%H ₂ O	As/Cd/Cu/Cr/Hg/Mo/Ni/Pb/Se/Zn	Cd/Cu/Hg/Mn/Ni/Pb/Se/Zn/pH/CE/MO
Tasa de aplicación	90 Mg ha ⁻¹ si cumple requisito de ETM en suelo. 30 Mg ha ⁻¹ por única vez cuando no cumple ETM en suelo.	Demanda nutricional según el cultivo o vegetación.	Demanda nutricional según el cultivo o vegetación (1-10 Mg ha ⁻¹ * 10 años)
Limitación al pastoreo	Igual o superior a 1 mes.	No propone	Superior a 3 semanas
Limitación cultivo hortícola	Aplicar 12 meses antes de la siembra	No propone	10 meses antes de cosecha.
Limitación cultivo frutícola	En frutales menores antes de 12 meses.	No propone	10 meses antes de cosecha.
Prohibiciones de uso	Suelos con pH<5. En zonas inundables o con riesgo de inundación. A menos de 15 m de riberas de ríos, lagos y área que cuente con recurso para bebida animal.En suelos cubiertos de nieve, suelos saturados la mayor parte del año y con arena igual o mayor a 70%	En zonas inundables a menos de 10 m de agua superficial Cuando hay exceso de N en el suelo.	Suelos con pH<5, en zonas inundables. A menos de 15 m a cursos de agua. Cuando se superan los límites de MP en el lodo.

(*) = Algunos países además han puesto límites respecto a patógenos (Francia, Italia, Dinamarca, Austria, Luxemburgo).

La prohibición de uso de lodos se presenta en todas las normativas, con criterios que se refieren a: zonas de inundación, distanciamiento a cursos de aguas. Las normas chilena y europea prohíben el uso de lodos en suelos con acidez inferior a 5, además se restringe el uso de lodos según el contenido de elementos traza metálicos en suelos en función del pH, mientras que en la norma americana lo exige para los lodos.

Todas las normas mencionan que los lodos deben ser tratados. La norma americana y chilena señalan una clasificación sanitaria de los lodos (Clase A y B). La normativa europea y chilena establece períodos de aplicación de lodos con antelación para pastoreo, frutales y especies forestales.

Tanto la normativa europea como americana toman en cuenta la demanda nutricional de los cultivos para la aplicación de lodos, a diferencia de la norma chilena que no lo contempla, esto constituye un atributo esencial que debería ser considerado en una futura revisión de la normativa.

La normativa europea también contempla una tasa de aplicación de lodos y la establece en un rango de 1 a 10 Mg ha⁻¹ en un período promedio de 10 años, mientras que la normativa chilena establece una tasa de 90 Mg ha⁻¹, sin restricción de tiempo en suelos que cumplen con el contenido de ETM y en caso de no cumplir alguna concentración de dichos metales, igualmente se pueden aplicar 30 Mg ha⁻¹ por una única vez. Estas tasas pueden constituir en el tiempo un problema ambiental ya que las experiencias de INIA con aplicaciones de 40 Mg ha⁻¹ en tres años arrojan incrementos de elementos traza metálicos en los suelos.

La normativa chilena establece concentraciones máximas totales de elementos traza metálicos en los suelos y en los lodos, no hay referencias respecto a la

determinación de concentraciones disponibles de elementos traza metálicos y cuál sería su fitodisponibilidad para los cultivos, por cuanto debiera ser un aspecto a considerar al momento de la revisión de la normativa.

Por otra parte, la norma chilena no señala ni entrega elementos para el control de los lodos si fuesen incinerados, mientras que la norma europea y americana, sí establecen requisitos, tampoco se especifica una carga máxima de elementos traza metálicos a aplicar al suelo que la norma europea y americana si consideran. En todas las normativas se permite la disposición en monorellenos. En este contexto, la EPA define criterios para la protección de las aguas subterráneas, esto último no se encuentra previsto en la norma chilena.

El Cuadro 27 muestra los límites de concentración máxima de elementos traza metálicos exigidos en los lodos, para distintos países. Los rangos de concentración de elementos traza metálicos definidos por la norma chilena son más exigentes que las demás norma.

Cuadro. 27. Límites máximos de concentración de ETM en lodos en distintas normativas

ETM	Concentración permitida en lodos (mg kg ⁻¹)							
	Directiva Europea ⁽¹⁾	UE ⁽²⁾	USA EPA	Francia	Chile		Brasil	Argentina
					A ⁽³⁾	B ⁽⁴⁾		
As	Nn ⁽⁵⁾	Nn	41 a 75	Nn	20	40	41	
Ba	Nn	Nn	Nn	Nn	Nn	Nn	1.300	Nn
Cd	20 a 40	10	39 a 85	20	8	40	39	20 a 40
Cr	Nn	Nn	3.000	1.000	Nn	Nn	1.000	1.000 a 1.500
Cu	1.000 a 1.750	1.000	1.500 a 4.300	1.000	1.000	1.200	1.500	1.000 a 1.750
Hg	16 a 25	10	17 a 57	10	10	20	17	16 a 25
Mo	Nn	Nn	75	Nn	Nn	Nn	50	Nn
Ni	300 a 400	300	420	200	80	420	420	300 a 400
Pb	750 a 1.200	750	300 a 840	800	300	400	300	750 a 1.200
Se	Nn	Nn	100	Nn	50	100	100	Nn
Zn	2.500 a 4.000	3.000	2.800 a 7.500	3.000	2.000	2.800	2.800	2.500 a 4.000
Fuente	Directiva 867 278/ EEC	EEC	EPA, 2000	Kaemmerer, 2001	CONAMA, 2009		CONAMA, 2006	Res. 97/01 (MDS y MA)

(1)=Normativa año 1996

(2)=Normativa en revisión

(3) A= Suelos que cumplen los requisitos establecidos en este título

(4) B= Suelos degradados que cumplen los requisitos establecidos en este título

(5) Nn=No normado.

4.4.6 Discusión de la normativa chilena sobre la aplicación de lodos en suelos

La normativa chilena vigente regula el manejo de los lodos y protege los suelos a través de concentraciones máximas de elementos traza metálicos en lodos y suelos. Presenta similitud con la norma europea ya que reconoce el principio de protección de suelos y al comparar los límites de concentración de contaminantes de ambas normas, la chilena es más restrictiva.

En la normativa el lodo sólo se considera un acondicionador de suelos, por su alto contenido de materia orgánica, pero no se reconoce su aporte de nutrientes.

La norma chilena restringe el destino de lodos a monorelleno y relleno sanitario y exige a los suelos condiciones y características para ser receptores. Según esto último para aplicar lodos al suelo, se debe elaborar un plan de aplicación, documento que debe informar en detalle de los antecedentes sitio específicos de las áreas receptoras de lodos, condiciones de aplicación, características físicas y químicas tanto de los suelos y lodos.

Se presentan imprecisiones tales como dividir el país en dos macrozonas (art.4 letra l y m del DS N°4), situación que debe ser replanteada, ya que según Castro (2007), esta distinción parece extremadamente genérica si se considera la alta variación espacial de los suelos y las condiciones climáticas, por lo que, no se justifica la división actual, más bien se sugiere dejar como criterio el pH del suelo, ya que es quizás la propiedad más determinante de analizar en el suelo antes de la aplicación del lodo, ya que es condicionante de la mayoría de los procesos químicos y biológicos que ocurren en el sistema suelo-agua-planta. Además, el pH, influye en la disponibilidad de elementos traza metálicos y en las formas en que éstos se encuentran en el suelo, en el comportamiento del fósforo, en la

mineralización de nitrógeno, capacidad de intercambio iónico y reacciones de hidrólisis (Álvarez, 2004).

La norma chilena también se asemeja a la normativa EPA 503, especialmente en la definición de criterios sanitarios de los lodos, de los requisitos para conseguir su estabilidad, de los diferentes tipos de tratamiento a los que pueden ser sometidos y también clasifica los lodos en dos clases (A y B).

Si bien, la norma indica valores de concentración de elementos traza metálicos que deben cumplirse tanto en el lodo como en los suelos, existe la posibilidad de aplicar lodos por una única vez, en suelos en los que se sobrepasa el contenido de algún metal pesado.

La norma no considera cargas máximas de elementos traza metálicos en suelos por año, a diferencia de lo que se reglamenta en las normas EPA, europea, brasilera y argentina, que sí incorporan esta restricción como una manera de proteger los suelos, tampoco considera una tasa de aplicación agronómica en función de la demanda nutricional de las especies vegetales asociadas.

Es así que, la tasa de aplicación de lodos de $90 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ se puede considerar extremadamente alta, si se compara con los rangos que plantea la norma europea de entre 1 a 10 Mg ha^{-1} en un período de 10 años. Las normas extranjeras analizadas han considerado que el uso benéfico del lodo se promueve considerando tasas agronómicas según la especie vegetal, por cuanto se suministra la cantidad de nitrógeno necesaria para los cultivos o vegetación, minimizando fenómenos de lixiviación de nitratos que pasan más allá de la zona de raíces.

Cabe señalar que con la tasa de $90 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ se excede completamente la demanda nutricional del cultivo de maíz, especie que fue seleccionada por su alta tasa de extracción de nutrientes especialmente de N y P. Experiencias desarrolladas con altas tasas de aplicación de lodos (300 Mg ha^{-1}) por única vez en un huerto de olivos, mostraron un serio riesgo de contaminación por arrastre de fosfatos y por lixiviación de nitratos a aguas subterráneas, además se incrementó el contenido de elementos trazas (Tsadila *et al*, 2009), por tanto, la tasa de aplicación de lodos debiera definirse incluyendo posibles daños ambientales.

Por otra parte, la normativa chilena no contempla un período máximo de aplicación de lodos, es así que la aplicación queda prohibida cuando se alcanzan los valores máximos de concentración de elementos traza metálicos en el suelo luego de una o de varias aplicaciones. En este sentido, el requisito de caracterización de los suelos, previo a cada aplicación, es fundamental para evitar una acumulación de elementos traza metálicos en los suelos con el consiguiente impacto negativo sobre el agrosistema.

El reglamento no contempla medidas ambientales asociadas a una remediación de suelos por una sobre acumulación de elementos traza metálicos, ni tampoco aborda aspectos relacionados con la protección de hábitats naturales, ni resguardo de la flora y fauna silvestre cuando se ven insertos en áreas enmendadas con lodos.

Un aspecto que no se encuentra considerado en la normativa corresponde a la concentración de elementos traza metálicos disponibles, o fitodisponibilidad que mide la peligrosidad actual para las plantas. Los valores de concentración de elementos traza metálicos se expresan como concentración total, que es válida para evaluar la peligrosidad potencial o futura y solo representa el grado de

contaminación. En general, los elementos traza metálicos son poco móviles en el suelo y tienden a acumularse en la parte superficial.

4.4.7 Recomendaciones al D.S.Nº4/2009

Luego de la revisión del texto del DS Nº4/2009 se han detectado imprecisiones, inconsistencias y omisiones que se exponen y que podrían ser consideradas y evaluadas como recomendaciones técnicas en una futura revisión de la norma:

1. El documento señala que el lodo puede contribuir a mejorar las condiciones físicas de los suelos, en una connotación de mejorador de suelos y no le confiere ninguna propiedad fertilizante.
2. Respecto a las disposiciones generales y definiciones, se han incorporado conceptos que debieran ser analizados con mayor profundidad dada su ambigüedad, como a) el término lodo y b) la división del país en dos macrozonas. Lo último, dado la alta variabilidad espacial y diversidad de los suelos sólo en la provincia de Melipilla, recomendándose fijar el pH del suelo como criterio de aplicabilidad de lodos.
3. El reglamento señala en su Título IV que previo a la incorporación de lodos al suelo se debe elaborar un plan de aplicación con una serie de requisitos sitio específicos de caracterización del suelo y lodos y de su manejo. Se recomienda que el plan incluya algunos de los siguientes criterios mínimos:
 - Un objetivo de uso, por ejemplo como complemento a la fertilización para mejorar la productividad de los cultivos en suelos de buen potencial productivo ó como un mejorador de suelos en alguna condición de degradación.
 - El seguimiento de la calidad de aguas superficiales y subterráneas.

4. La tasa de aplicación de lodos debe calcularse en función del objetivo adoptado:
 - Si se realiza una fertilización, o un complemento a la fertilización, se debe calcular en función de la demanda de nitrógeno y fósforo del cultivo y de los contenidos de éstos en el suelo, a objeto de evitar migración de los macronutrientes.
 - Si se considera efectuar un mejoramiento de suelos, la tasa de aplicación debiera calcularse en función del aporte de materia orgánica calculado, según el nivel basal que tiene el suelo degradado y el nivel que se quiere alcanzar.
 - Se debe considerar la conductividad eléctrica del lodo para evitar una salinización del suelo, especialmente en la aplicación de la dosis máxima de lodo permitida por la normativa.
5. Incorporar aspectos respecto del desprendimiento de olores molestos que se evidencia notoriamente en las áreas de aplicación, que se pueden evitar con la incorporación inmediata del lodo al suelo luego del esparcimiento.
6. Considerar la fitodisponibilidad de los elementos traza metálicos que se señalan en la en la norma, tanto en el lodo como en los suelos receptores.
7. Aumentar el porcentaje de disposición de lodos en relleno sanitario ya que dicho porcentaje (6-8%) del total de los residuos dispuestos es restrictivo.
8. Establecer especificaciones para la construcción y operación de monorellenos, para lo cual no se entrega antecedentes. Este aspecto es crítico, dada la inestabilidad de la masa de lodos.

4.5 SUPERFICIE APTA PARA LA APLICACIÓN DE LODOS EN LA PROVINCIA DE MELIPILLA

4.5.1 Superficie apta según exigencias legales

Para determinar la superficie apta para la aplicación de lodos en agrosistemas, se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros detallados especialmente en los artículos 19 a 21 del D.S. N°4/2009:

1. Mapa básico de suelos caracterizados por unidades homogéneas
2. Pendiente (expresada como porcentaje)
3. Profundidad efectiva del suelo
4. Caracterización física y química del suelo (clase textural, porcentaje de arena en suelos de textura gruesa, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, elementos traza metálicos)
5. Distancias a áreas residenciales y viviendas individuales
6. Distancias a captación de agua subterránea para agua potable
7. Otros: suelos saturados con agua, riesgos de inundación, distancia a ríos y fuentes de bebida animal.

4.5.2 Superficie apta según información disponible

Para la cuantificación de la superficie apta para aplicación de lodos en la provincia de Melipilla, se consideró principalmente la siguiente información:

Estudio: “Conformación de unidades espaciales en respuesta a la aplicación de biosólidos en la Región Metropolitana”, proyecto FONDECYT N°1050726, elaborado por la Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura, Departamento de Geografía. Este estudio determinó a través de una metodología de modelamiento de unidades homogéneas una superficie apta en algunas

comunas de la Región Metropolitana para la utilización de biosólidos, usando como requisitos para la aplicación de lodos, entre otros, el borrador de “Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas”, CONAMA, versión enero 2006.

Información de las superficies censadas en la Región Metropolitana a partir del VII Censo Agropecuario y Forestal (INE, 2007).

Bases cartográficas del estudio agrológico CIREN CORFO (1996).

Mapas de vulnerabilidad de acuíferos, información aportada por el Servicio Agrícola y Ganadero, Subdepartamento de Sistemas de Información Geográfico.

Diversos estudios sobre la caracterización física y química de suelos en Chile y planes de manejo y seguimiento de aplicación de lodos.

4.5.3 Superficie apta según el Censo Agropecuario y Forestal

Los resultados del Censo Agropecuario y Forestal llevado a cabo a nivel país por el Instituto de Estadísticas (INE) en el año 2007, abarcó una superficie equivalentes a 36.439.533 ha, de las cuales 1.302.419 ha, correspondieron a la Región Metropolitana, y 360.618 ha en la provincia de Melipilla. En relación a las explotaciones agropecuarias con tierra y con actividad agrícola, la provincia registró 292.582 ha., con 36,7% que se encuentran en la comuna de Melipilla, le siguen en importancia la comuna de Alhué con un 22,6% y San Pedro con un 21%.

Respecto del uso del suelo relativo a suelos de cultivos, la Región Metropolitana presenta un total de 113.270 ha, de cultivos anuales y permanentes, con un total

provincial de 42.437 ha, de esta superficie el 50% se ubica en la comuna de Melipilla. Las explotaciones forestales que incluyen plantaciones forestales, viveros forestales y ornamentales, en la provincia de Melipilla correspondieron a 67.764 ha, de las cuales el mayor porcentaje se presenta en la comuna de Melipilla con un 31,6% y le sigue en importancia la comuna de Alhué con un 26,8%.

Las superficies totales sembradas o plantadas por grupos de cultivos enfocados a cereales presentan un total provincial de 9.859 ha, por su parte, las plantaciones en la provincia alcanzan las 4.145 ha.

Del censo se desprende que existe una importante superficie en la provincia de Melipilla que puede ser receptora de lodos y presenta una importante diversidad de rubros agrícolas (cultivos anuales, frutales, forrajeras permanentes) y rubro forestal.

4.5.4 Superposición de capas de información

Para determinar la superficie apta para la aplicación de lodos en suelos de la provincia de Melipilla, RM, se trabajó con el sistema de información geográfica, SIG, programa ArcView. Sobre las bases cartográficas del estudio agrológico CIREN CORFO (1996) y de FONDECYT N°1050726, disponibles en diferentes escalas de trabajo, se efectuó una superposición de capas de información, aplicando criterios de exclusión basado en las restricciones de la norma vigente (DS N°4/2009).

La información cartográfica del Estudio CIREN CORFO (1996) permitió identificar los suelos existentes a nivel de órdenes y atributos como clase de capacidad de uso (CCUS), clases de drenaje y pendientes, variables químicas como pH,

contenido de materia orgánica, además de aspectos asociados al distanciamiento de áreas urbanas y cuerpos de agua. No obstante, no existe información o cartografía acerca de concentraciones de elementos traza metálicos en los suelos. Basado en la información disponible y las exigencias del reglamento, se adaptaron las siguientes variables de exclusión de áreas, en la cartografía del SIG y se exponen en el Cuadro 28

Cuadro 28. Variables y criterios del DS N°4 usados para la obtención de áreas receptoras de lodos en la cartografía

Variables de suelo	Criterio
Pendiente	< 15 %
Clase textural	< 70 % arena
pH	> 5
Suelos saturados	Prohíbe la aplicación
Suelos cubiertos de nieve	Prohíbe la aplicación
Suelos con riesgo de inundación	Prohíbe la aplicación
Suelos con cobertura arbustiva ó arbórea	Pendientes > 15 %
Variables físicas	Distanciamiento (m)
Conjunto viviendas, villorrios	> 300
Viviendas aisladas	> 100
Captación de aguas subterráneas/agua potable	> 300
PTAS	< 80.000
Suelos a ríos/lagos	> 15
Áreas con recursos para bebida animal	> 15
Suelos con napa freática	> 1
Variables clima	Criterio
Precipitación media anual > a 100 mm	Aplica en suelos arenosos

Fuente: D.S. N°4/2009

4.5.5 Análisis de resultados

Los resultados de las variables aplicadas en cartografía, se presentan en las siguientes Figuras, los que se resumen a continuación.

Respecto de los órdenes de suelos existentes en la provincia, existe un 66,3% en el orden alfisoles, le sigue en importancia los mollisoles con un 18%. Según Luzio y Casanova (2006), en Chile los alfisoles tienen una amplia distribución, entre la Región de Valparaíso y la Región del Bío-Bío, tanto en la depresión intermedia como en la cordillera de la costa y la precordillera. En la depresión intermedia pueden ser suelos planos, casi planos o con un relieve moderado, han sido utilizados intensamente en la agricultura, mientras que en la cordillera de la costa presentan un relieve más fuerte y su aptitud es más bien forestal. En el Cuadro 29 se presentan las superficies de órdenes de suelos más comunes en la provincia.

Cuadro 29. Órdenes de suelos en la provincia de Melipilla

Orden	Superficie en la provincia de Melipilla (ha)
Mollisoles	69.088
Alfisoles	255.476
Entisoles	4.709
Inceptisoles	55.955
Total	385.228

Fuente: Basado en el Estudio Agrológico CIREN CORFO (1996)

Respecto a las series de suelos, la provincia presenta un gran número de series, las que dan cuenta de la gran variabilidad de suelos existentes en la provincia (Figura 7). La serie Lo Vásquez es una de las de mayor extensión en la

provincia, representa a aquellos suelos que se han originado a partir de materiales de la cordillera de la costa, los que presentan susceptibilidad a la erosión.

En relación a las clases de drenaje (Figura 8), los suelos bien drenados predominan con un 58,5% del total en la provincia y le siguen en importancia los suelos excesivamente drenados con un 38,8%, como lo indica el Cuadro 30.

Cuadro 30. Clases de drenaje de los suelos en la provincia de Melipilla

Clases de Drenaje	Superficie en la provincia de Melipilla (ha)
Pobremente drenado (2)	1.099
Imperfectamente drenado (3)	8.239
Bien drenado (4)	212.180
Excesivamente drenado (6)	141.004
Total	362.522

Fuente: Basado en el Estudio Agrológico CIREN CORFO (1996)

Figura 7. Series de suelos presentes en la provincia de Melipilla, RM

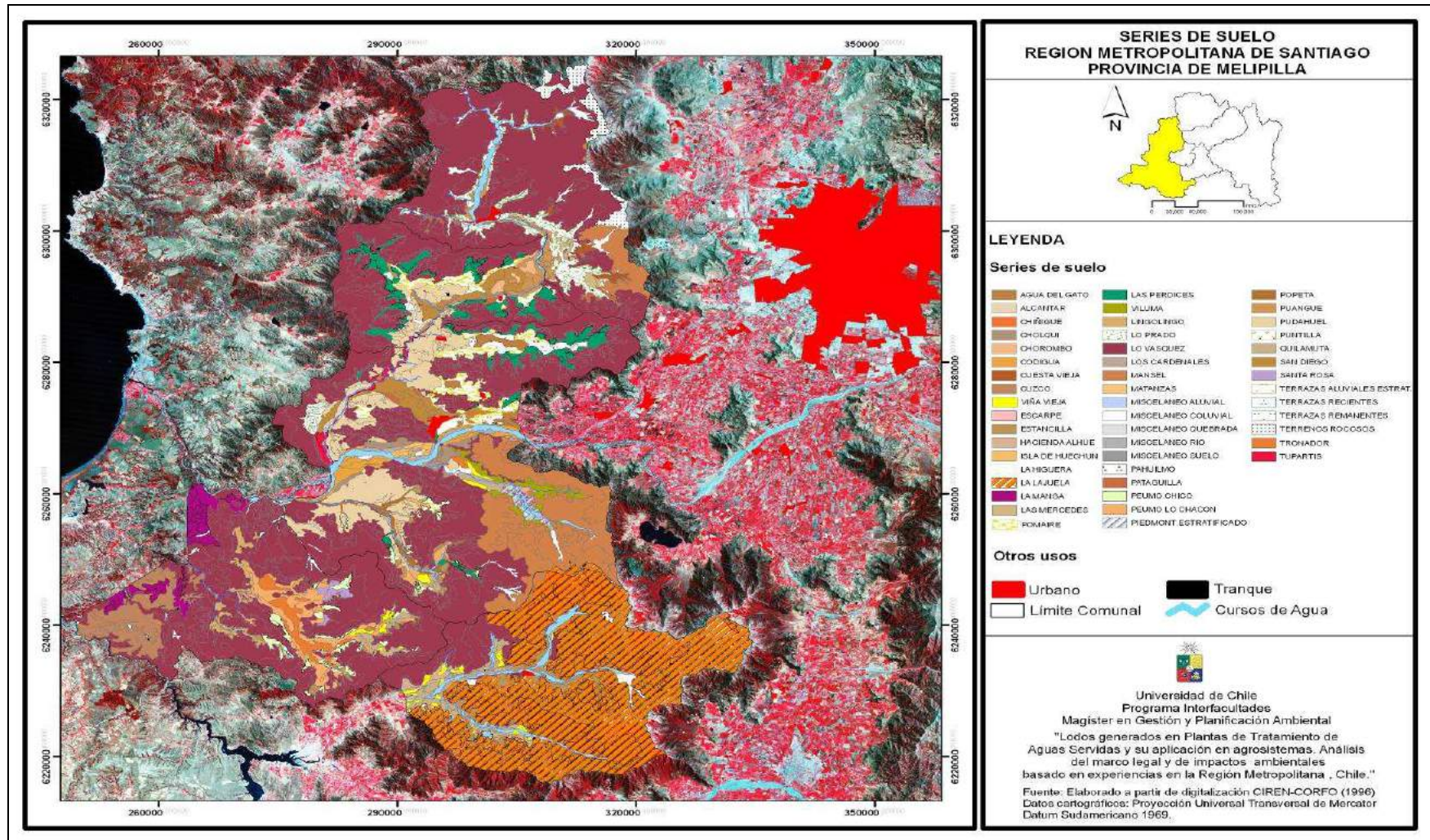
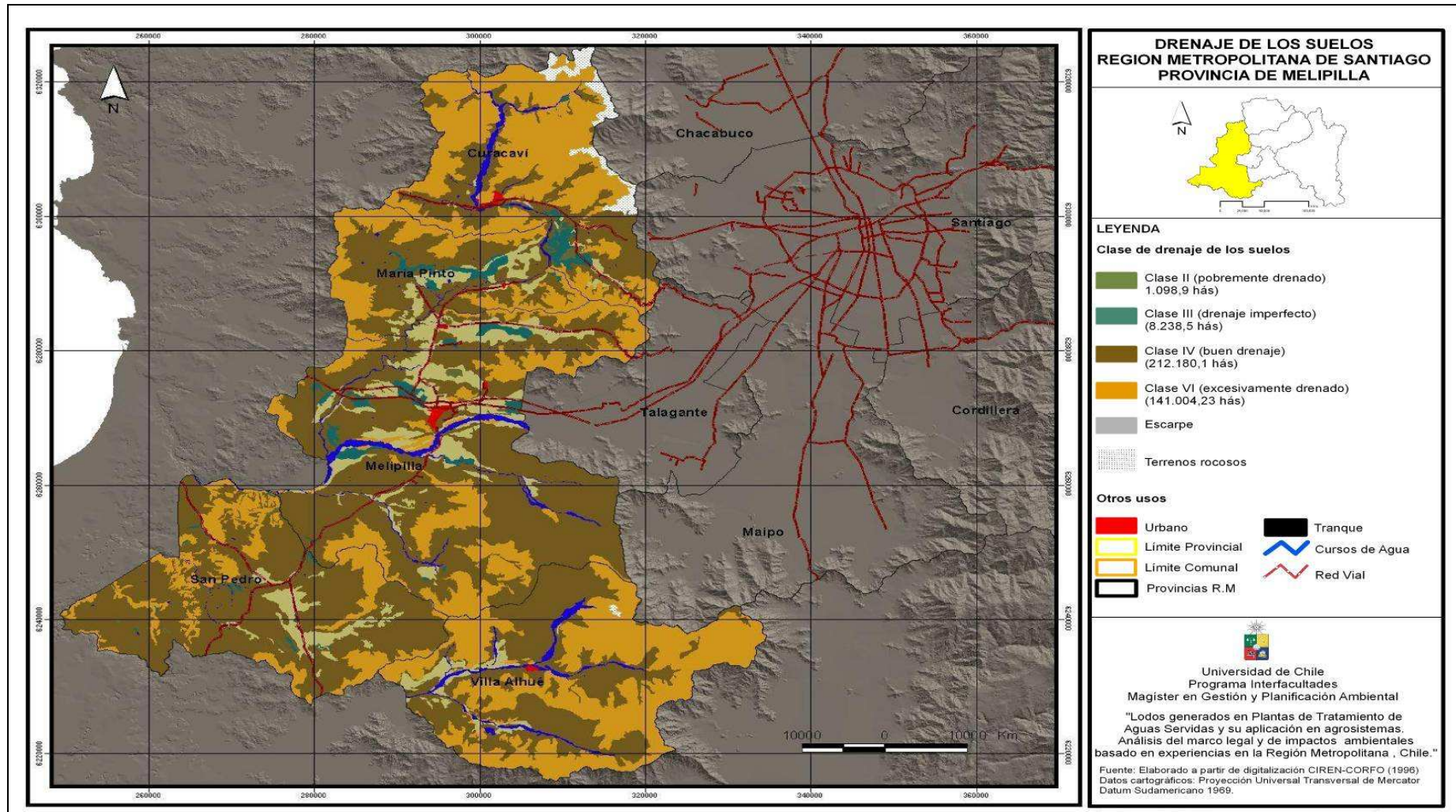


Figura 8. Clases de drenaje de suelos de la provincia de Melipilla, RM



En el Cuadro 31 se señalan las superficies correspondientes a las clases de capacidad de uso (CCUS) de los suelos en la provincia con un predominio de la Clase VII con un 51%, es decir, suelos con una baja capacidad de adaptación para determinados usos, manejo y cultivos (Luzio y Casanova, 2006), mientras que las clases de suelos con mayor potencial productivo correspondientes a las CCUS I, II y III abarcan un 19% del total.

Cuadro 31. Clases de capacidad de uso de suelos (CCUS) de la provincia de Melipilla

CCUS	Superficie en la provincia de Melipilla (ha)
I	501
II	42.674
III	33.915
IV	20.039
VI	43.126
VII	201.863
VIII	54.718
Total	396.836

Fuente: Basado en el Estudio Agrológico CIREN CORFO (1996)

En la Figura 9 se indica la distribución espacial de los suelos en la provincia de Melipilla, de acuerdo a su clase de capacidad de uso.

Por su parte en la Figura 10 se señalan antecedentes acerca de la vulnerabilidad de los acuíferos en la provincia de Melipilla, observándose una amplia superficie con depósitos de baja a moderada vulnerabilidad en rocas graníticas del Pzo-Jr (Paleozoico-jurásico) en la zona poniente, otra zona con baja a nula vulnerabilidad que se extiende en el área sur poniente y se muestran aquellas áreas de alta vulnerabilidad, las que se relacionan con los cursos de los ríos o áreas con características especiales.

Figura 9. Clases de capacidad de uso de los suelos de la provincia de Melipilla, RM

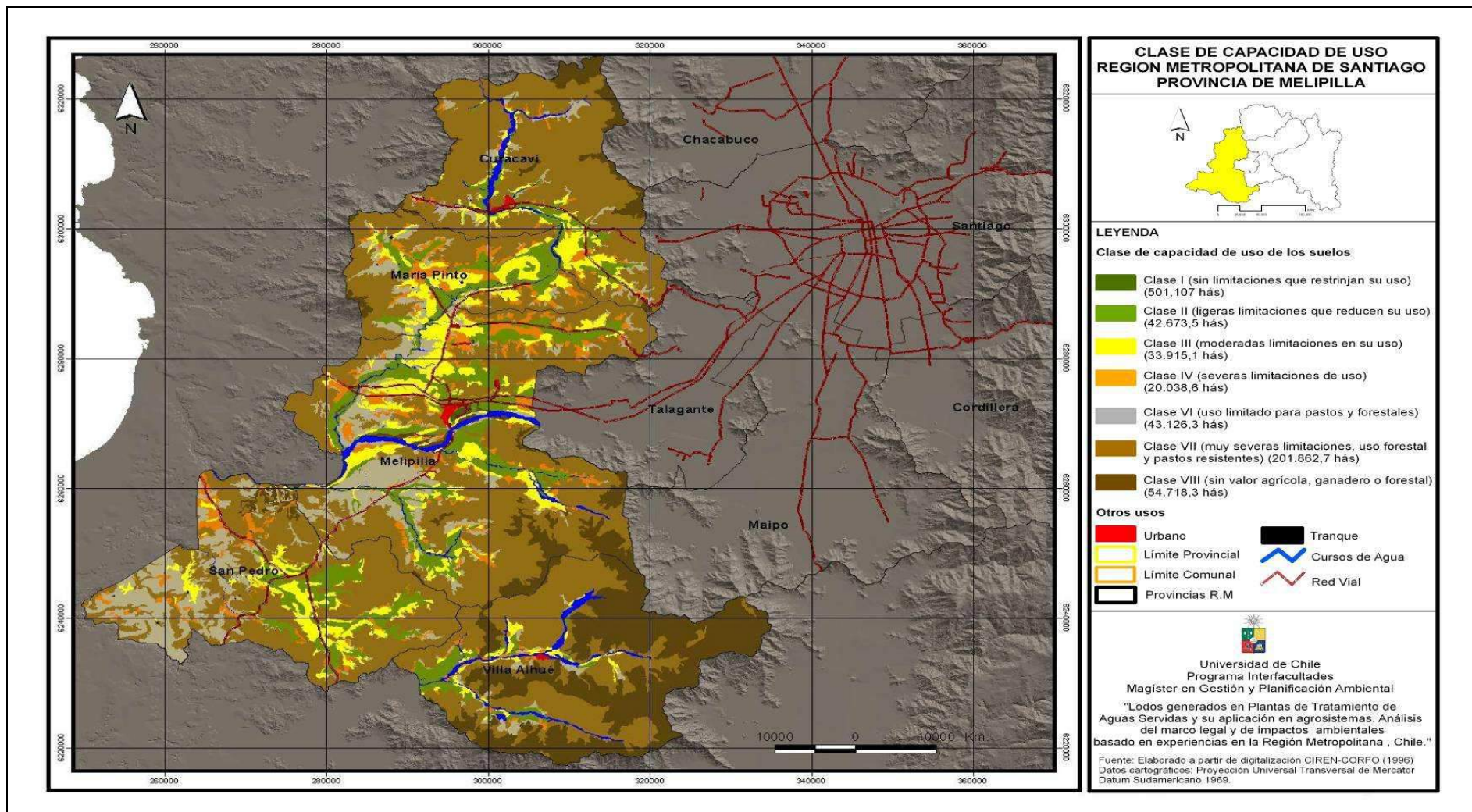
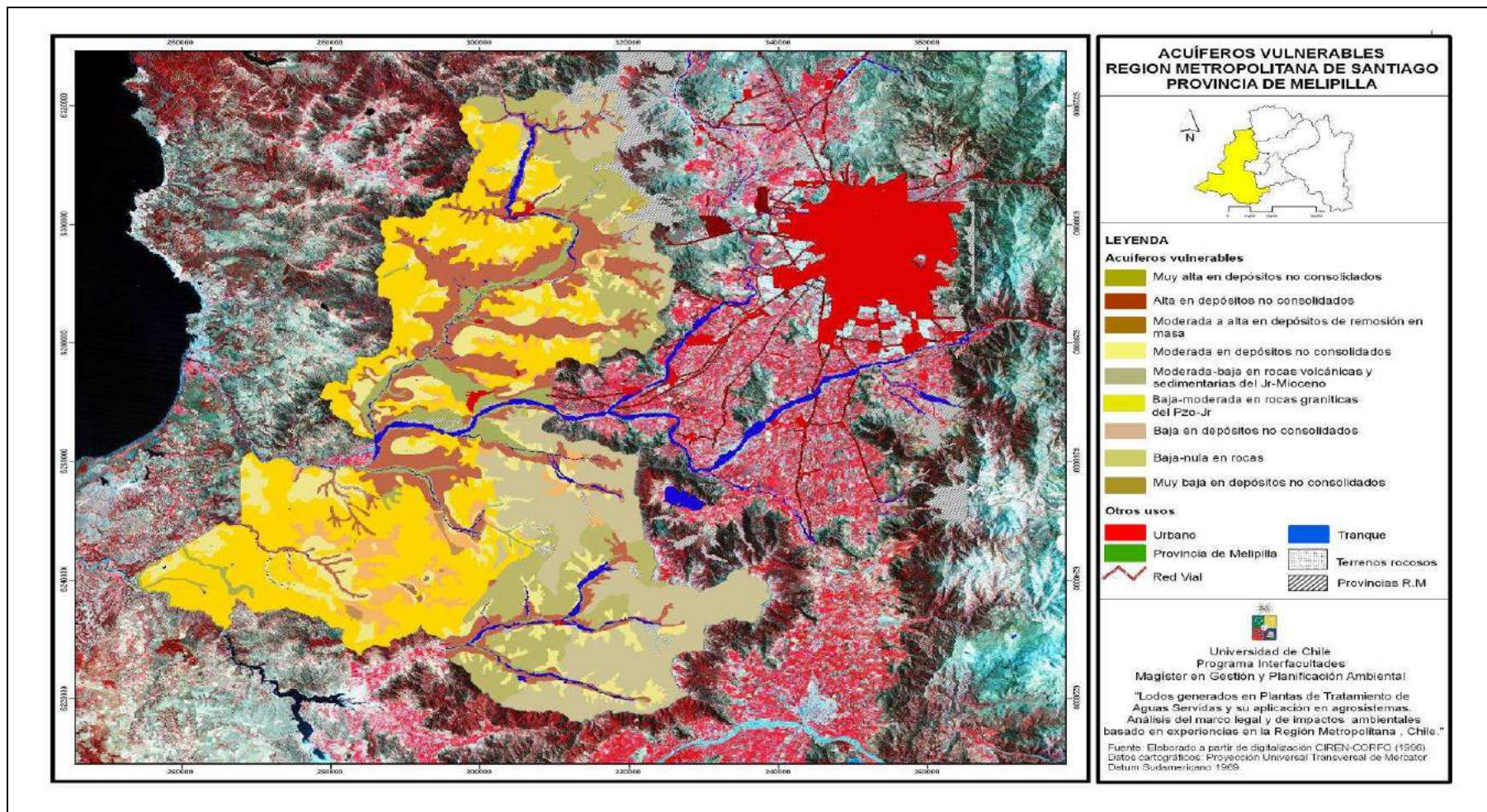


Figura 10. Vulnerabilidad de acuíferos en la provincia de Melipilla, RM



El Cuadro 32 señala que aproximadamente un 63% de los suelos de la provincia contienen entre un 1,76 a 2,6 % de materia orgánica, mientras que un 6% del total de la superficie corresponde a suelos con un contenido entre 2,6 a 4 % de materia orgánica (Apéndice I). En toda la provincia existen aproximadamente 85.000 ha, que tienen suelos con un contenido de materia orgánica que da cuenta de una adecuada fertilidad.

Cuadro 32. Distribución del contenido de materia orgánica de los suelos de la provincia de Melipilla

Contenido de materia orgánica (%)	Superficie en la provincia de Melipilla (ha)	Distribución (%)
> 10	6.625	2
5-8	70.939	20
4,1- 5	7.527	2
2,6-4	21.198	6
1,76-2,6	217.673	63
0,1- 1,75	22.547	7
Total	346.510	100

Fuente: Basado en el Estudio Agrológico CIREN CORFO (1996)

El Cuadro 33 muestra la distribución del pH en cuanto a la superficie de los suelos, de este se desprende que un 62 % del total de los suelos en la provincia presentan un pH neutro, situación que hace factible la aplicación de lodos, mientras que existe un 17% de los suelos con un pH fuertemente ácido, correspondiente a sectores que quedan imposibilitados de ser receptores de lodos (Apéndice I).

Cuadro 33. pH y rango, superficie y distribución de los suelos de la provincia de Melipilla

pH y rango ⁽¹⁾	Superficie en la provincia de Melipilla (ha)	Distribución (%)
Fuertemente ácido (5,1 a 5,5)	65.510	17
Moderadamente ácido (5,6 a 6,0)	32.447	9
Neutro (6,6 a 7,3)	233.584	62
Moderadamente alcalino (7,9 a 8,4)	44.778	12
Fuertemente alcalino (8,5 a 9,0)	1.138	<1
Total	377.457	100

Fuente: Basado en el Estudio Agrológico CIREN CORFO (1996)

(1)= Rango de pH en agua basado en Field book for describing and sampling soils. National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service U.S. Department of Agriculture (2002).

El Cuadro 34 señala una superficie aproximada de 63.000 ha asociada a clases texturales arenosas de los suelos en la provincia de Melipilla, esta superficie corresponde a aquellas áreas que según la normativa no podrían ser utilizadas para la aplicación de lodos dado que su contenido de arena es igual o superior al 70%.

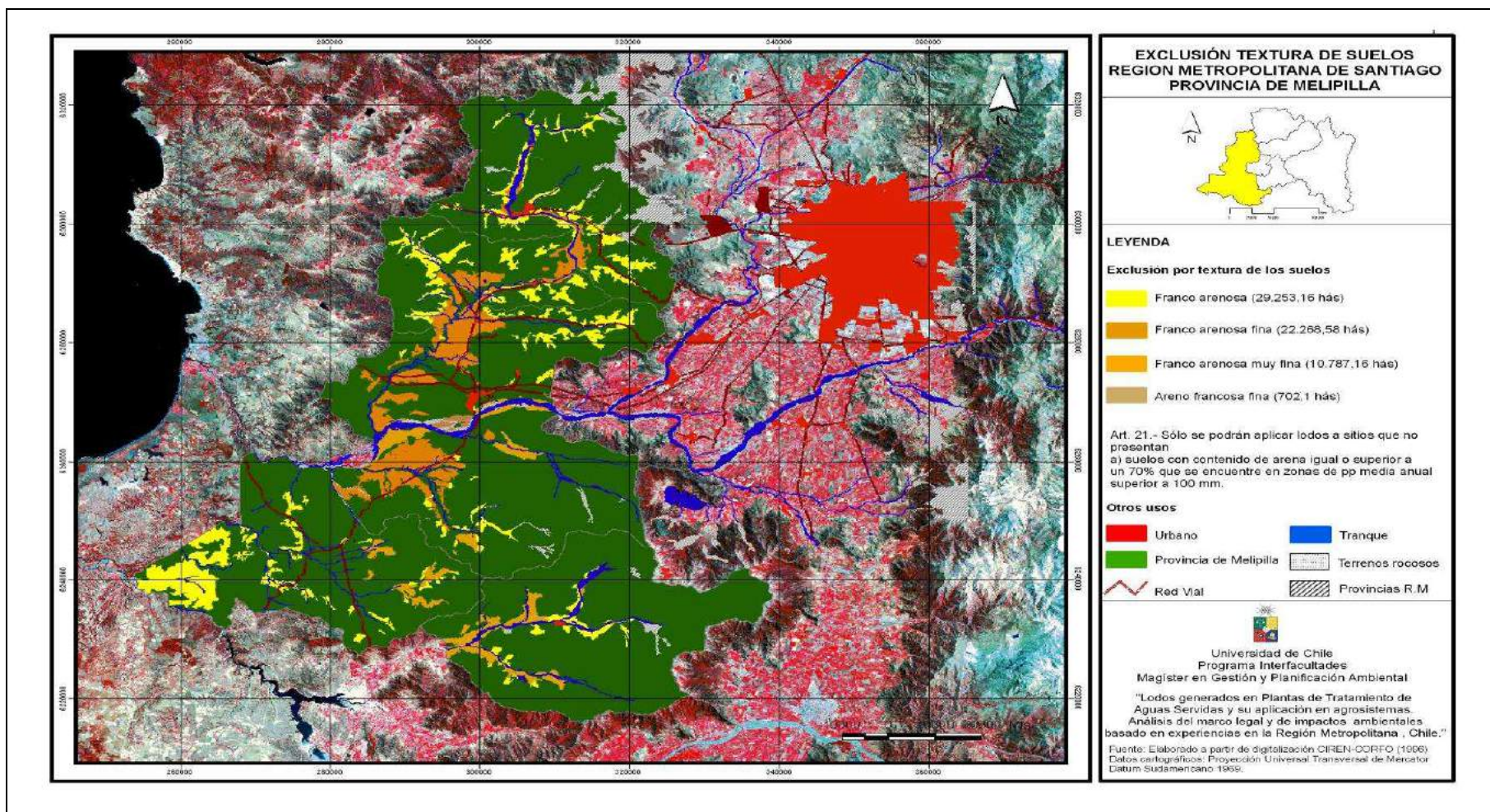
Cuadro 34. Superficie de los suelos arenosos de la provincia de Melipilla según la clase textural

Clase textural	Superficie en la provincia de Melipilla (ha)
Areno francosa fina	702
Franco arenosa	29.253
Franco Arenosa fina	22.269
Franco Arenosa muy fina	10.787
Superficie total	63.011

Fuente: Basado en el Estudio Agrológico CIREN CORFO (1996)

En la Figura 11 se presentan los suelos que tiene un contenido de arena igual o superior al 70%, por cuanto se excluyen para aplicaciones de lodos.

Figura 11. Clases texturales gruesas de suelos de la provincia de Melipilla, RM



En cuanto al uso y cobertura de suelos en la provincia, (Apéndice I) muestra una gran diversidad de rubros entre los que destacan los cultivos, plantaciones, praderas, frutales, parronales y viñas, matorral con suculentas, matorrales arborescentes.

La cartografía con los distanciamientos a cuerpos de agua y viviendas correspondientes a los “buffers” hidrológicos y urbano se presentan en el Apéndice I.

4.5.6 Cuantificación final

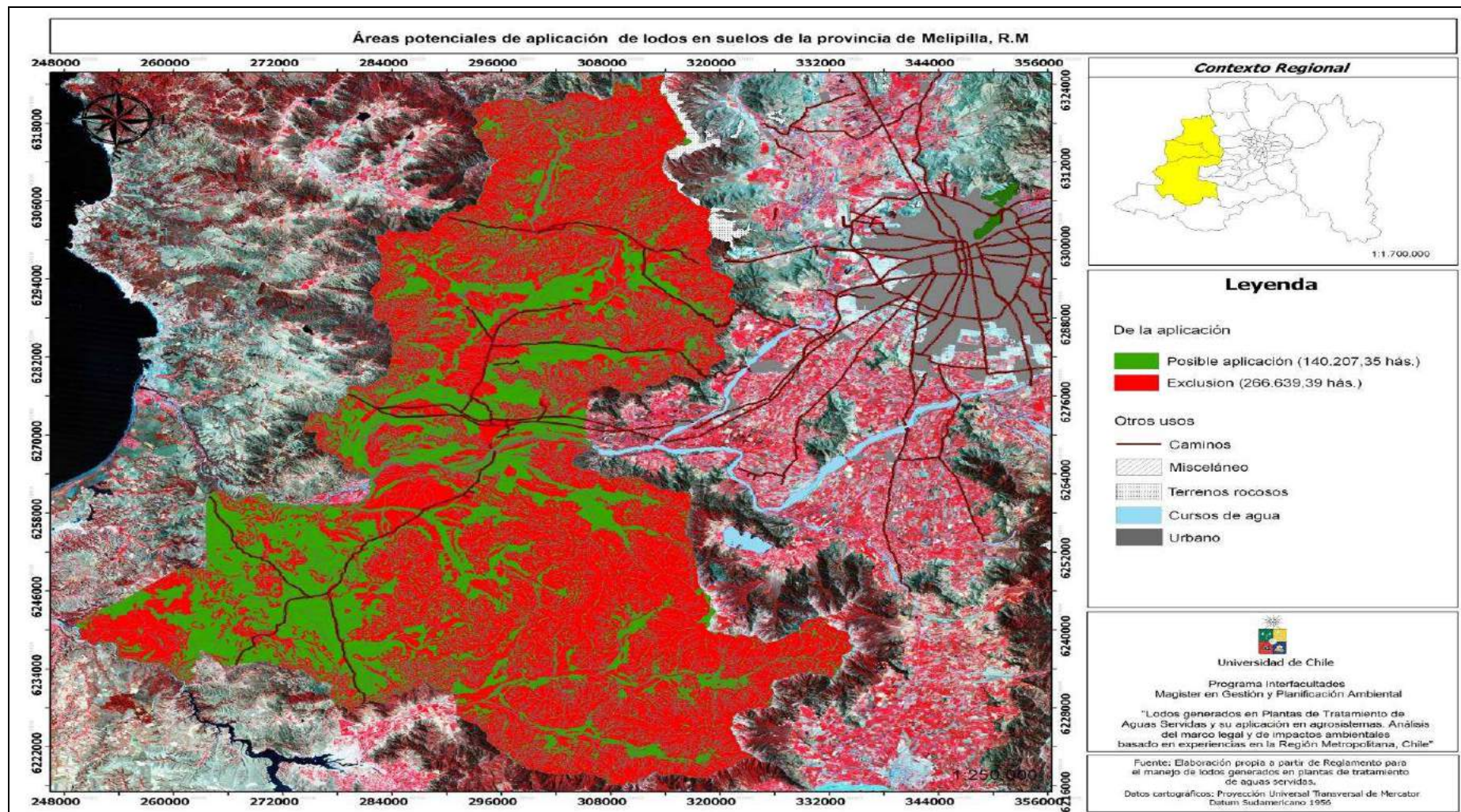
Mediante la superposición de estas coberturas de información se ha obtenido un mapa final que entrega la superficie potencial disponible en la provincia para ser receptora de lodos, la que se presenta en la Figura 12.

El resultado de la combinación y superposición de las distintas capas de información, considerando los criterios de exclusión aplicados, dan cuenta de que existen 140.207 hectáreas disponibles en la provincia de Melipilla, potencialmente aptas para la aplicación de lodos. Esta superficie corresponde aproximadamente un 35 % del total de la superficie provincial.

El estudio FONDECYT N° 1050726, que analizó toda la Región Metropolitana, arrojó una superficie total y potencialmente apta de 451.606 hectáreas.

No obstante, cabe aclarar que este estudio se basó en las exclusiones definidas en el borrador del reglamento de manejo de lodos, que prohibía el uso de lodos en suelos con clase de capacidad de uso (CCUS) I, II y III, terrenos rocosos, pantanosos y sin valor agrícola. Los resultados por clase de suelo se presentan para toda la RM en el Cuadro 35.

Figura 12. Superficie apta para la aplicación de lodos en suelos de la provincia de Melipilla, R.M.



Cuadro 35. Superficie apta para recibir lodos en la RM, según los criterios anteriores al D.S.Nº4/2009.

Clase de Capacidad de Uso de suelos	Superficie apta en la provincia de Melipilla (ha)
IV	48.328
VI	64.524
VII	338.754
Total	451.606

Fuente: Basado en el Estudio Agrológico CIREN CORFO (1996)

Cabe aclarar que las superficies calculadas según el D.S. N°4 (140.207 ha) y del proyecto de Reglamento (451.606 ha) no consideran la concentración total de los elementos traza metálicos presentes en los suelos, por cuanto éstos deben determinarse previamente para la aplicación de los lodos en cada predio.

La superficie potencialmente apta determinada, demuestra que basado en las principales exigencias de la normativa, existiría aproximadamente un tercio de la superficie en la provincia potencialmente apta para la aplicación de lodos. Sin embargo, dicha determinación es teórica dado que previo a la aplicación de lodos en un suelo, se requiere información analítica de detalle de las concentraciones totales de los elementos traza metálicos que determinan la aptitud de un suelo para recibir lodos, lo que no se encuentra disponible en la mayor parte de la provincia de Melipilla.

Además, la cartografía base, por su escala de trabajo, no refleja fielmente la realidad, por cuanto las restricciones y condiciones de la norma deben ser revisadas en terreno.

4.6 CÁLCULO DE COSTOS FERTILIZANTES MINERALES VERSUS LODOS

A continuación se presenta una comparación de los costos de una plantación de una hectárea de maíz de grano, utilizando lodos versus fertilizante mineral, basándose en las fichas técnicas de ODEPA (2009) para la temporada de 2009-2010 en la zona central del país.

Considerando que las experiencias de los ensayos de campo de INIA han señalado que el lodo recién a partir del tercer año de aplicación es capaz de reemplazar los nutrientes aportados por el fertilizante mineral en un cien por ciento y que no se ven afectados los rendimientos de los cultivos.

Para realizar los cálculos y la comparación se han efectuado los siguientes supuestos:

1. El lodo sustituye al fertilizante mineral, en este caso urea y mezcla maicera, en un 100%, lo que corresponde al tercer año de aplicación.
2. La tasa de aplicación de lodo es de $15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ base seca⁸.
3. El lodo y el fertilizante mineral generan el mismo rendimiento de maíz de 127 qqha^{-1} y el mismo precio de venta de \$110/kg.

⁸ Equivalente a 60 Mg ha^{-1} en base húmeda

4. La aplicación de lodos requiere actividades adicionales de manejo en el predio, como su esparcimiento en el suelo, su incorporación y mezcla con el suelo, que en principio se considera parte de la producción del cultivo.
5. Se considera que el costo de transporte del lodo hacia el predio de aplicación es asumido por el generador, dado que reemplaza el transporte hacia otro destino (relleno sanitario, monorelleno u otro).
6. En principio y para efectos de comparación inicial de los cálculos, se supone que el lodo no tiene valor comercial y es entregado a costo cero en el predio (costo de transporte incluido).

Basado en lo anterior, a continuación se presentan los costos de producción de maíz grano con fertilizante mineral (Cuadro 36) y con sustituto de lodos (Cuadro 37).

De acuerdo al Cuadro 36 y lo calculado por ODEPA (2009), en el manejo del cultivo de maíz en condiciones agrícolas típicas de la zona central, aproximadamente el 20% de los costos se asocian al establecimiento, el que implica labores culturales en el predio, es decir, aradura, rastraje, aplicación de agroquímicos, siembra, fertilización, riego, limpias, cosecha, acarreo.

Por otra parte, aproximadamente el 34,5% corresponde a costos de insumos, en semilla es alrededor del 8%, en fertilizantes minerales el costo corresponde a un 21% y un 5,5% a agroquímicos.

Cuadro 36. Cálculo de costos de producción de una hectárea de maíz grano con uso de fertilizante mineral

Item	Mes	Unidad	Requerimiento		
			Cantidad	Precio (\$)	Total (\$)
COSTOS MAQUINARIAA					
Aradura	Agost./Sept.	JM	1	50.000	50.000
Esparcimiento lodo	Jul./Agost.	ton	0	0	0
Rastraje de incorporación lodo	Jul./Agost.	JM	0	30.000	0
Rastraje	Sept.	JM	2	25.000	50.000
Aplic. Plag. Presiembra	Sept./Oct.	JM	1	15.000	15.000
Siembra	Sept./Oct.	JM	1	25.000	25.000
Aplic. Plag. Post. Emerg.	Sept./Oct.	JM	1	15.000	15.000
Surqueadura	Oct./Nov.	JM	1	10.000	10.000
Cultivador y fertilización	Nov./Dic.	JM	1	25.000	25.000
Labores de cosecha	Mar./Abril	JM	1	60.000	60.000
SUBTOTAL 1					250.000
COSTOS MANO DE OBRA					
Riego presiembra	Sept./Oct.	JH	1	6.114	6.114
Riegos	Oct./Mar.	JH	11	6.114	67.254
Apoyo a la siembra	Sep./Oct.	JH	0.2	6.114	1.223
Aplic. Fertilizantes	Nov./Dic.	JH	1	6.114	3.668
Aporca y Paleo de regueros	Nov./Dic.	JH	1	6.114	6.114
Labores de cosecha	Octubre	JH	1	6.114	6.114
SUBTOTAL 2					90.487
COSTOS DE INSUMOS					
Lodo	Agos./Sept.	kg	0	0	0
Semilla	Sept./Oct.	Bolsa	1.3	85.000	110.500
Mezcla maicera	Sept./Oct.	kg	600	306	183.600
Urea	Sept./Oct.	kg	500	210	105.000
Primagram Gold 660 SC	Oct.	lt	3.5	6.026	21.091
Lorsban 4E	Oct./Nov.	lt	4	7.388	29.552
Pyrinex 48%	Oct.	lt	1.5	7.470	11.205
Arco 2,4D 480 SL	Sept./Oct.	lt	2	7.470	14.940
Flete insumos	Sept./Abr.	Kg	6	1.112	6.672
SUBTOTAL 3					482.560
OTROS COSTOS					
Costo uso altern. Suelo/Arriendo		Ha	1	300.000	300.000
Costo financiero (crédito)	semestre	\$	899.249	2,1 (%)	90.644
Secado (14,5%)	Mar./Abril	Kg	12.700	7	91.440
Flete producto	Sept./Abr.	Kg	12.700	6	76.200
SUBTOTAL 4					558.284
TOTAL EGRESOS (1 A 4)					1.381.331
INGRESOS					1.397.000
RENTABILIDAD (\$/hectárea)					15.669

Fuente: ODEPA (2009); UF al 30/03/2010: \$20.996

Cuadro 37. Cálculo de costos de producción de una hectárea de maíz grano con aplicación de lodos

Item	Mes	Unidad	Requerimiento		
			Cantidad	Precio (\$)	Total (\$)
COSTOS MAQUINARIAA					
Aradura	Agost/Sept.	JM	1	50.000	50.000
Esparcimiento lodo	Jul./Agost.	ton	60	6.299	377.928
Rastraje de incorporación lodo	Jul./Agost.	JM	1	30.000	30.000
Rastraje	Sept.	JM	2	25.000	50.000
Aplic. Plag. Presiembra	Sept./Oct.	JM	1	15.000	15.000
Siembra	Sept./Oct.	JM	1	25.000	25.000
Aplic. Plag. Post. Emerg.	Sept./Oct.	JM	1	15.000	15.000
Surqueadura	Oct./Nov.	JM	1	10.000	10.000
Cultivador y fertilización	Nov./Dic.	JM	1	15.000	15.000
Labores de cosecha	Mar./Abril	JM	1	60.000	60.000
SUBTOTAL 1					647.928
COSTOS MANO DE OBRA					
Riego presiembra	Sept./Oct.	JH	1	6.114	6.114
Riegos	Oct./Mar.	JH	11	6.114	67.254
Apoyo a la siembra	Sep./Oct.	JH	0.2	6.114	1.2230
Aplic. Fertilizantes	Nov./Dic.	JH	0	6.114	0
Aporca y Paleo de regueros	Nov./Dic.	JH	1	6.114	6.114
Labores de cosecha	Octubre	JH	1	6.114	6.114
SUBTOTAL 2					86.819
COSTOS DE INSUMOS					
Lodo	Agos./Sept.	kg	60	0	0
Semilla	Sept./Oct.	Bolsa	1.3	85.000	110.500
Mezcla maicera	Sept./Oct.	kg	0	308	0
Urea	Sept./Oct.	kg	0	210	0
Primagram Gold 660 SC	Oct.	lt	3.5	6.026	21.091
Lorsban 4E	Oct./Nov.	lt	4	7.388	29.552
Pyrinex 48%	Oct.	lt	1.5	7.470	11.205
Arco 2,4D 480 SL	Sept./Oct.	lt	2	7.470	14.940
Flete insumos	Sept./Abr.	Kg	4	1.112	4.448
SUBTOTAL 3					191.736
OTROS COSTOS					
Costo uso altern. suelo o arriendo		Ha	1	300.000	300.000
Costo financiero (crédito)	semestre	\$	899.249	2,1 (%)	90.644
Secado (14,5%)	Mar./Abril	Kg	12.700	7	91.440
Flete producto	Sept./Abr.	Kg	12.700	6	76.200
SUBTOTAL 4					558.284
TOTAL EGRESOS (1 A 4)					1.484.767
INGRESOS					1.397.000
RENTABILIDAD (\$/hectárea)					-87.767

Fuente base: ODEPA (2009); UF al 30/03/2010: \$20.996

El Cuadro 38 compara los costos de producción de una hectárea de maíz grano con fertilizante mineral y con aplicación de lodos y demuestran una leve ganancia de sólo \$15.669 por hectárea de la producción de maíz de grano con fertilizante mineral.

Cuadro 38. Comparación de costos de producción de una hectárea de maíz grano con fertilizante versus lodos

Item	Con fertilizante	Aplicación de lodos (\$/ha)	Diferencias de costos
Costos de maquinaria	250.000	647.928	397.928
Costos mano de obra	90.478	86.819	-3.668
Costos de insumos	482.560	191.736	-290.824
Otros costos	558.284	558.284	0
Total egresos	1.381.331	1.484.767	103.436
Ingresos	1.397.000	1.397.000	0
Rentabilidad	15.669	-87.767	-103.436

Del Cuadro 38, se obtiene una pérdida al comercializar maíz grano al aplicar lodos en el suelo, correspondiente a \$87.767 por hectárea. Esa pérdida o diferencia en comparación a la producción con fertilizante, se debe principalmente al elevado costo de esparcimiento, incorporación y mezcla del lodo con el suelo, que en el presente ejercicio, estas actividades son consideradas parte de la producción.

En consecuencia, para que el agricultor incorpore lodos al suelo y obtenga a lo menos la misma rentabilidad de su negocio como con el fertilizante, el diferencial de \$103.436 por hectárea debe formar parte del costo de toda la gestión de lodos y no de la producción agrícola.

Considerando la tasa de aplicación de 60 toneladas de lodos en base húmeda en una hectárea, el costo unitario diferencial a asumir como parte de la gestión de lodos es de \$1.724 por tonelada de lodos. Este valor corresponde a aproximadamente el 27% del costo que se paga en un monorelleno, donde se cobra por sobre 0,3 UF o \$6.299 por tonelada⁹. Es decir, la aplicación de lodos en predios con producción de cultivos es altamente rentable para el generador de lodos en comparación a otros destinos, como la disposición en monorellenos o rellenos sanitarios.

⁹ Fuente: ECOING, UF: \$20.996 al 30/03/2010

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

1. En términos generales, se concluye que la hipótesis del presente trabajo se cumple, es decir que los lodos generados en PTAS pueden aplicarse en agrosistemas sin provocar efectos adversos, siempre y cuando se considere los requisitos de la normativa vigente y criterios adicionales.
2. La aplicación de lodos tiene efectos positivos en los suelos: disminuye la densidad aparente, aumenta la estabilidad de agregados, incrementa la retención de agua, aporta nutrientes y materia orgánica, y mejora el rendimiento de diferentes cultivos.
3. Las concentraciones de elementos traza metálicos presentes en los lodos se encuentran por debajo de lo exigido en la normativa, pese a ello, algunos estudios señalan una acumulación de ciertos ETM en especies vegetales y en suelos.
4. El “Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas (D.S. N°4/2009)”, que entró en vigencia en abril del 2010, entrega los principales criterios para la protección de los agrosistemas ante una aplicación de lodos en los suelos de Chile. Sin embargo, se recomienda incorporar criterios técnicos y ambientales adicionales.
5. El D.S. N°4/2009 es exigente en relación a los límites de concentración de los elementos traza metálicos permitidos en lodos y suelos, incluso más riguroso que las normativas extranjeras (EPA, Directiva Europea, Argentina, Brasil, México).

6. El D.S. N°4/2009 no plantea la fitodisponibilidad de elementos traza metálicos ni restringe su presencia en los cultivos. Cabe mencionar que algunos estudios detectaron incrementos de ETM en los cultivos a raíz de la aplicación de lodos.
7. La normativa chilena permite una elevada tasa máxima de aplicación de lodos ($90 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en base seca), en comparación a otros países.
8. Experiencias de terreno señalan que los nutrientes de los lodos pueden sustituir a los fertilizantes minerales como urea y superfosfato triple, en un 50% a partir de la segunda temporada de aplicación y en un 100% durante la tercera temporada, para cultivos de maíz.
9. Una tasa de 15 Mg ha^{-1} de aplicación de lodo al tercer año satisface la demanda de N de maíz, y se exceden otros nutrientes.
10. El reglamento de manejo de lodos no exige un balance de masa respecto a los contenidos de N y P en los lodos y suelos, ni toma en cuenta los requerimientos nutricionales de los cultivos. Aspecto relevante para prevenir lixiviación de nitratos y eutrofización de cuerpos de aguas.
11. El D.S. N°4/2009 no indica seguimiento de aguas superficiales y/o subterráneas, tampoco entrega indicadores para la detección de olores.
12. No existen estudios en animales o fauna silvestre alimentados con cultivos enmendados con lodos. Sin embargo, el D.S. N°4/2009 señala una restricción al acceso de animales y personas para evitar riesgos sanitarios.

13. La aplicación de lodos en suelos evita la emisión de metano, que se produciría al depositarlos en un relleno sanitario o monorelleno, minimizando así los GEI.
14. El costo de esparcimiento e incorporación del lodo en un predio es más elevado que la aplicación de los fertilizantes minerales. Sin embargo, este costo no debe considerarse parte de la producción agrícola, sino formar parte de la gestión asociado al tratamiento de aguas servidas.
15. La aplicación de lodos en suelos es altamente rentable para el generador de lodos, dado que su costo es aproximadamente cuatro veces menor que su disposición en un monorelleno o relleno sanitario.
16. La aplicación de los criterios y exigencias de la normativa vigente mediante SIG determinó que se podría aplicar lodos en aproximadamente 140.000 ha de la provincia de Melipilla, equivalente a un tercio de su superficie. No obstante, esta superficie puede variar, dependiendo de las concentraciones de elementos traza metálicos presentes en los suelos.
17. Se recomienda desarrollar estudios adicionales de aplicación de lodos, analizando otros cultivos y otros parámetros (fitodisponibilidad, balance de masa, fauna silvestre, entre otros) a objeto de evaluar los impactos.
18. Los estudios analizados concluyen que los lodos se pueden aplicar en el cultivo de praderas, no obstante, no presentan información sobre la absorción de ETM, por tanto, se recomienda investigar sobre este aspecto.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

AGUILAR, M. A., ORDOÑEZ, R. Y GONZÁLEZ, P. 1999. Capacidad de aportación de macronutrientes de un lodo de depuradora a un cultivo de ray-grass y calidad de los lixiviados. Estudios de la Zona No Saturada. Eds. R. Muñoz-Carpena, A Ritter, C. Tascón. ICIA 139-143.

AGUILERA, S. Y RODRIGUEZ, M., 2005. Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales. Universidad de Chile Proyecto FONDEF DO111034. 198p.

AHUMADA, I., GUDENSCHWAGER, O., CARRASCO M.A., CASTILLO G., SADSAWKA, A., ASCAR, L. 2004. Influencia de la aplicación de biosólidos en la distribución y disponibilidad de Cu y Zn en suelos cultivados con ballica y trébol. [en línea] <<http://alerce.inia.cl/docs/presentaciones/DOC024ASR.pdf>>[Consulta 27 de marzo de 2011].

ALLOWAY, B. J. 1995. Heavy metals in soils. Ed. B. J. Alloway. 2ndEd. Blackie Academic and Professional, London. UK. 339 p.

ÁLVAREZ, L. 2004. Mineralización in vitro de nitrógeno y fósforo y contenido de metales pesados en suelos acondicionados con lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas servidas. Memoria Ingeniero en Recursos Naturales. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile. 59p.

ANDRADE, M.; MARCET, P.; REYZABAL, M. y MONTERO, J. 2000. Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos. *Edafología* 7:21-29.

BARAÑAO, P. y TAPIA, A. 2004. Tratamiento de las aguas servidas: Situación en Chile. Ciencia y trabajo 6.jul-sept. (13):111-11.

BARBOSA, G. M. DE C.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; FONSECA, I. C. DE B. 2009. Balance of basis in the soil and dry matter production in maze (*Zea mays* L.) in soils treated with sewage sludge, calcium carbonate and unslaked lime. Acta Scientiarum - Agronomy 2007 Vol. 29 No. Suplemento Especial pp. 709-714.

BERTALANFFY, L. 2000. Teoría General de Sistemas. Colombia. Fondo de cultura económica. 311p.

BERTI, W. and JACOBS, L. 1998. Distribution of trace elements in soils from repeated sewage sludge applications. Journal Environmental Quality. (27):1280-1286.

BIFANNI P. 2007. Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. 1^a, Ed. Guadalajara, Jal. Editorial Universitaria.701p.

BRADY, N. 1990. The nature and properties of soils. Tenth Edition MacMillan Publishing Company New York. 621p.

CAMPBELL, N., Y REECE, J. 2007. Biología. 7^{ma} Edición Editorial Media Panamericana. 1392 p.

CARRASCO, M. A., LEÓN, O., SOLIS, L. AHUMADA, I., PEDRAZA, C., CASTILLO G., Y SADZAWKA, A. 2008. Evaluación de biodisponibilidad de Mn, Fe, Cu y Zn en suelos tratados con biosólidos usando lechuga y ballica. En: X Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Boletín N°21 de la Sociedad de Ciencia del Suelo.

CARRASCO, M. A., MARTÍNEZ, C., OPAZO, J., LEON, O., AHUMADA, I., CASTILLO G., Y PEDRAZA, C., 2008. Respuesta biológica y concentración de metales pesados del trébol subterráneo en suelos del secano de la cordillera de la costa (VI Región) tratados con lodos. En: X Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Boletín 21 de la Sociedad de Ciencia del Suelo.

CARRASCO J. y RIQUELME J. 2003. Métodos y prácticas de conservación de suelos y aguas. Boletín INIA N°103.132p.

CASANOVA, M., LEIVA, C., SEGUEL, O., SALAZAR, S., Y LUZIO, W. 2006. Degradación de suelos y desertificación. pp: 353-383. *In*: Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Luzio W. y Casanova, M. (Eds). Santiago Chile. 393p.

CASTILLO G., AHUMADA I., MENDOZA J., DURÁN A., CARRASCO M. A., SADZAWKA A. 2003. Uso potencial de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas en agricultura. En: XV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS-CHILE. Concepción, Octubre 2003.

CASTRO, C. 2007. Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Santiago. Revista de Geografía Norte Grande. 37:35-45.

CHIAVENATO, I. 2005. Introducción a la Teoría General de la Administración. 7ma.Edición Editorial Mac Graw-Hill. 584p.

CHICÓN, L. 2000. Especiación de elementos traza metálicos en lodos de aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos digeridos como mejoradores de suelo [en línea] <<http://members.es.tripod.de/ambiental/lodos.html>>[consulta: mayo, 2009].

CIREN CORFO. 1996. Estudio agrológico Región Metropolitana. Centro de Información de Recursos Naturales. Descripciones de suelos, Materiales y símbolos. Publicación N° 115. 425p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. 2006. CONAMA. Resolucion N° 375 (29/08/2006), Brasil.

COUNCIL DIRECTIVE. Official Journal of the European Communities. On protection of the environment, and in particular of soil, when sewage sludge is used in agriculture (8/278/EEC). N° L 181: 6-12.

CUEVAS J., SEGUEL O., ELLIES A. y DÖRNER J. 2006. Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencias a la adición de lodos urbanos. *Journal Science Plant Nutricional* 6: (2)1-12.

DECRETO SUPREMO N°4. 2009. Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas". Ministerio Secretaria General de la Presidencia de la República, (30.enero.2009). CONAMA 20p.

DEMOLON, A. 1965. Principios de Agronomía Tomo I. Dinámica del suelo. Ediciones Omega, S.A. Barcelona. 527p.

DÍAZ BURGOS, M.A.1990. Compostaje de lodos residuales: aplicación agronómica y criterios de madurez. Tesis doctoral. Universidad autónoma de Madrid, 127p.

EPA (Environmental Protection Agency)– UNITED STATES. 1999b. Biosolids generation, Use, and Disposal in The United States. Municipal and Industrial Solid Waste Division Office of Solid Waste. EPA530-R-99-009. September 1999. 74p.

EPSTEIN, E. 2003. Land application of sewage sludge and biosolids. Lewis Publishers. 201p.

GARCÍA, I.; SIMON, M.; DORRONSORO, C., AGUILAR, J.; MARTIN, F. y ORTIZ, I. 2000. Contaminación de suelos por oxidación de lodos piríticos. *Edafología* 7(3):159-168.

GLAUSER, R., DONER, H. E. Y PAUL, E. A. 1988. Soil aggregates stability as a function of particle size in sludge-treated soils. *Soil Science* 146(1):37-43.

GONZÁLEZ, S. 1994. Estado de la contaminación de los suelos en Chile. En perfil ambiental de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, 199-234.

GONZÁLEZ, S. 2001. Estado de la Contaminación de Suelos en Chile. [en línea]. <<http://lauca.usach.cl/ima/cap11.htm>>. [consulta: 25 agosto 2009].

GONZÁLEZ, S. 2005. Tratamiento, Producción y gestión de lodos en plantas de tratamiento de Aguas Andinas. *En*: Seminario: Uso benéfico de lodos. Proyecto: Valorización de lodos como fertilizantes: 10-11 de Agosto de 2004. Santiago, Serie Actas INIA N°27(19-27), 208p.

HERNÁNDEZ, P. 2009. Efecto de la aplicación de biosólidos urbanos sobre la actividad microbiana y mineralización de nitrógeno en un inceptisol de la RM, Chile. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile. 67p.

HUSSEIN, A. H. A. 2009. Impact of sewage sludge as organic manure on some soil properties, growth, yield and nutrient contents of cucumber crop. Journal of Applied Sciences. 9(8):1401-1411 p.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS (INIA). 2005. Seminario: "Uso benéfico de lodos. Proyecto: Valorización de lodos, como fertilizantes" En: Serie Actas INIA 27, 208p.

INSTITUTO DE RECURSOS NATURALES CORPORACIÓN DE FOMENTO DE LA PRODUCCIÓN. 1979. Fragilidad de los ecosistemas naturales de Chile. Santiago. 43 p.

INSTITUTO DE ESTADÍSTICAS, CHILE. 2007. VII Censo Nacional agropecuario y forestal., Santiago, Chile.

IPCC. 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth Assessment Report.

LABRADOR, J. 1996. La materia orgánica en los agrosistemas. Editorial Mundi Prensa. Madrid España. 293p.

LABRADOR, J. 2002. La materia orgánica en los agrosistemas. Editorial Mundi Prensa. Madrid España. 293p.

LINDSAY, B., and LOGAN, T. 1998. Field response of soil physical properties to sewage sludge Journal Environment Quality (27):534-542.

LUZIO, W. 2010. Suelos de Chile. Universidad de Chile 364p.

LUZIO, W. Y CASANOVA, M. 2006. Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Depto. Ingeniería y suelos. Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Chile. 394p.

MARGALEF, R. 2002. Teoría de sistemas ecológicos. 2da. Edición México Alfaomega y Universitat de Barcelona. 290p.

MARICAN, A. 2006. Extractabilidad de metales traza en suelos agrícolas enmendados con biosólidos. Memoria Químico. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Santiago, Chile. 68p

Mc. LAUGHLIN, M. and SINGH, B. 1999. Cadmium in soils and plant. Kluwer Academic Publisher Dordrecht Netherlands. 271p.

MENA P. MARIA. 2008. Legislación sobre lodos en América Latina: n análisis comparativo. En: XXXI Congreso Interamericano AIDIS, Santiago Chile, 12-15 octubre, 2008.

METCALF & EDDY. 1995. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización.V1 y V2. 3ª Ed. Mc Graw Hill. 1.485p.

METZGER L. Y YARON B., 1987. Influence of sludge organic matter on soil physical properties. *Advances Soils Sciences* (7):161-169.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, CHILE. 2006. Lineamientos programáticos de la política agroalimentaria y forestal chilena. 27p.

MORELLO, J. 1996. Funciones del sistema periurbano: el caso de Buenos Aires. Mar del Plata Universidad Nacional del Mar del Plata, Argentina. Ediciones CIAM/GADU.

MOSQUERA-LOSADA, M.R. SANTIAGO-FRIEJANES, J.J., FERNANDEZ-NUÑEZ, E., RIGUEIRO-RODRIGUEZ, A. 2008. Effects of composted, pelletized and anaerobically digested sewage sludge on pasture production after sowing in a silvopastoral system. Biodiversity and animal feed: future challenges for grassland production. In: *Proceedings of the 22nd General meeting of the European Grassland Federation Uppsala Sweden*.p287-289.

MUNN, K., EVANS, J. and CHALK, P. 2000. Mineralization of soil and legume nitrogen in soils treated with metal contaminated sewage sludge. *Soil Biology and Biochemistry* (32):2031-2043.

MUSTIN, M. 1987. *Le compost, gestion de la matière organique*. Ed. Francois Dubusc, París. 954p.

NAIDU, R., MEGHARAD, M., and OWNES, G. 2004. Recyclable urban and industrial waste-benefits and problems in agricultural use. *Managing soil quality: Challenges in modern agriculture* (13):219-237.

NORMA OFICIAL MEXICANA. 2002. NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. *Diario Oficial* 18-60.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. 2004. NTC 5176. Materiales orgánicos utilizados como fertilizantes o acondicionadores de suelos (31/05/2004).

ODEPA, CHILE. 2000. Clasificación de las exportaciones agrícolas del VI Censo Nacional Agropecuario según tipo de productor y localización geográfica. Documento N°5. ISS0717-0378. 90p.

ODEPA, CHILE. 2008. Evolución reciente de los precios de los fertilizantes.36p.

ODEPA, CHILE. 2009. Maíz: La decisión de sembrar. 8p.

PEDRERO Q., N. 2006. Cambios de algunas propiedades químicas en suelos de la VI Región de Chile incubados con biosólidos. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile.

PIROT, Y., MEYNELL, P. and ELDER, D. 2000. Ecosystem management: Lessons from around the world. A Guide for Development and Conservation Practitioners UK.IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge.132p.

PORTA, J., LOPEZ- ACEVEDO, M., ROQUERO, C. 2003. Edafología para la agricultura y medio ambiente. 3ª. Edición. Ediciones Mundi-Prensa., España, 929p.

KABATAS-PENDIAS, A. 2010. Trace elements in soils and plants. Fourth edition CRCPress, Taylor & Francis Group. Boca Raton, USA. 520p.

REGLAMENTO PARA EL MANEJO SUSTENTABLE DE BARROS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS. 2001. Resolución N° 97/2001. República Argentina, Ministerio de Desarrollo Social y Medioambiental de la Nación (22/11/2001).

REYES, J.I., MARTÍNEZ, E., SILVA, P. Y ACEVEDO, E. 2002. Cero Labranza y propiedades de un suelo aluvial de Chile central. *In*: Proceeding del IX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Talca, Chile. Boletín18:78-81.

RUEDA, S. 1997. Metabolismo y complejidad del sistema urbano a la luz de la ecología. [en línea]< <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a008.html> > [Consulta 6 de octubre de 2009].

RUIZ, R. 2005. Uso de lodos en especies frutales. *En*: SEMINARIO: USO BENÉFICO DE LODOS. Proyecto: Valorización de lodos como fertilizantes: 10 y 11 de Agosto de 2004. Santiago, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Serie Actas INIA N°27. pp. 73-84, 208.

SADSAWKA, A. 2006. Propiedades físico-químicas de los suelos. I: Reacción (pH), acidez y alcalinidad. Pp: 91-127. In: Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Luzio W. y Casanova, M. (Eds). Santiago Chile. 393p.

SANFELIU, T., JORDÁN, M. Y BOIX, A. 2005. Contaminación y Medio ambiente: Santiago (Chile)- Castellón (España) 1998-2002. Eds. Publicacions de la Universitat Jaume. 513p.

SCHOENEBERGER, P.J., WYSOCKI, D.A.BENHAM, E.C. and BRODERSON, W.D. (Editors). 2002. Field book for describing and sampling soils, Version 2.0.Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, N.E. 222p.

SECRETARIA REGIONAL MINISTERIAL DE PLANIFICACIÓN Y COORDINACIÓN, 2006. Plan Estratégico Provincial 2000-2006. Provincia de Melipilla RM. [en línea] <<http://www.serplacrm.cl/estrategia/doc/melipilla.pdf>>[Consulta 2 de octubre de 2009].

SEIA. 2009. Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, [en línea] <<http://www.e-seia.cl/>> [Consulta 5 de noviembre de 2009].

SINGH, R.P. y AGRAWAL, M. 2007. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of Beta vulgaris plants. Chemosphere May; 76(11):2229-40.

SMITH, S. 2009. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste compost compared to sewage sludge. Environment International, 35:142-156.

SOLIS, G., Y BRONDOLO, M. 1999. Degradación ambiental del espacio periurbano de la ciudad de Punta Alta. En: 1^{er} Encuentro Internacional Humbolt. Buenos Aires, Argentina, Noviembre. 15p.

SUMNER M. 2000. Handbook of soil science. CRC Press LLC.

SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS. 2009. [en línea]<http://www.siss.cl/articles-7670_informegestion.pdf>[Consulta 4 de diciembre de 2009].

TAPIA F. 2005. Valorización agrícola de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas, como fertilizante en cultivos anuales, experiencia en Chada, R.M., entre los años 2001-2003. En: SEMINARIO: USO BENÉFICO DE LODOS. Proyecto: Valorización de lodos como fertilizantes: 10 y 11 de Agosto de 2004. Santiago, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Serie Actas INIA N° 27:63-72, 208p.

TERRANO U. 1988. Tratado de fitotecnia general. Editorial Mundi-Prensa, 388p.

THOMPSON, L.M. Y THOEH, F. 2002. Los suelos y su fertilidad. Cuarta edición Editorial Reverté. 639p.

TIAN, G., GRANATO, T. C., COX A. E., PIETZ, R. I., CARLSON C. R., AND ABEDIN Z. JR. 2009. Soil Carbon Sequestration Resulting from Long-Term Application of Biosolids for Land Reclamation. Journal Environmental Quality (38):61–74.

TORRI, X. Y LAVADO, R. 2009. Plant absorption of trace elements in sludge amended soils and correlation with soil chemical speciation. Journal of Hazardous Materials (166) 2/3:1459-1465.

TSADILA, E., TSADILAS C., STAMATIADIS, S., CHRISTODOULAKIS, N., 2009. Investigations of soil property changes and olive tree stress as caused by excessive sewage-sludge applications. *Communications in Soils Science and plant analysis*, (40):514-525.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID.1995. Utilización agrícola de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales. Aplicaciones en el territorio de la Comunidad de Madrid. Canal de Isabel II. Centro de Ciencias Medio Ambientales, Depto. de Química Agrícola, Geología y Geoquímica. (CSIC, Madrid).140p.

UTRIA, E., REYNALDO, I. CABRERA, J. A., MORALES, D. y GOFFE, S. 2008. Los biosólidos de aguas urbanas aplicados en diferentes frecuencias en las propiedades químicas y microbiológicas del suelo, el rendimiento y la calidad de los frutos de tomate (*Solanum lycopersicum Mill*). *Cultivos tropicales* 2008 29(4):5-11.

VALENZUELA A., 2001. Determinación de los niveles de cadmio en distintos fertilizantes fosforados y su acumulación en el suelo. Tesis de Magíster en Ciencias Agropecuarias. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.80p.

VILLANUEVA, L. 2003. Evaluación del impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de cadmio en suelos cultivados con maíz (*Zea mays*). Tesis de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental. Universidad de Chile. Programa Interfacultades Santiago, Chile.120p.

WILD, A. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. 1045p.

Apéndice I

Figura I.1. Distribución del contenido de materia orgánica de los suelos de la provincia de Melipilla, RM.

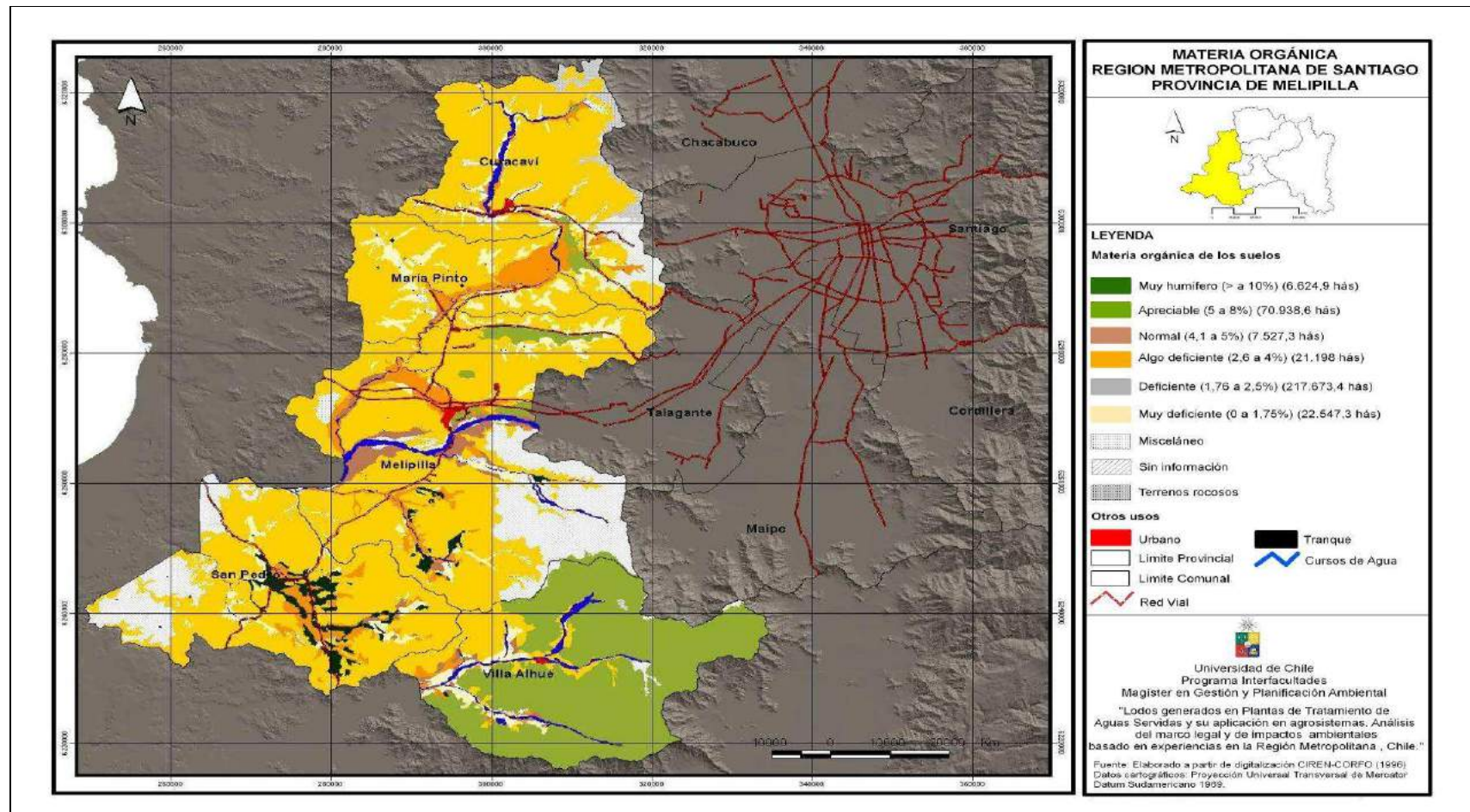


Figura I.2. Distribución del pH de suelos de la provincia de Melipilla RM, según su superficie.

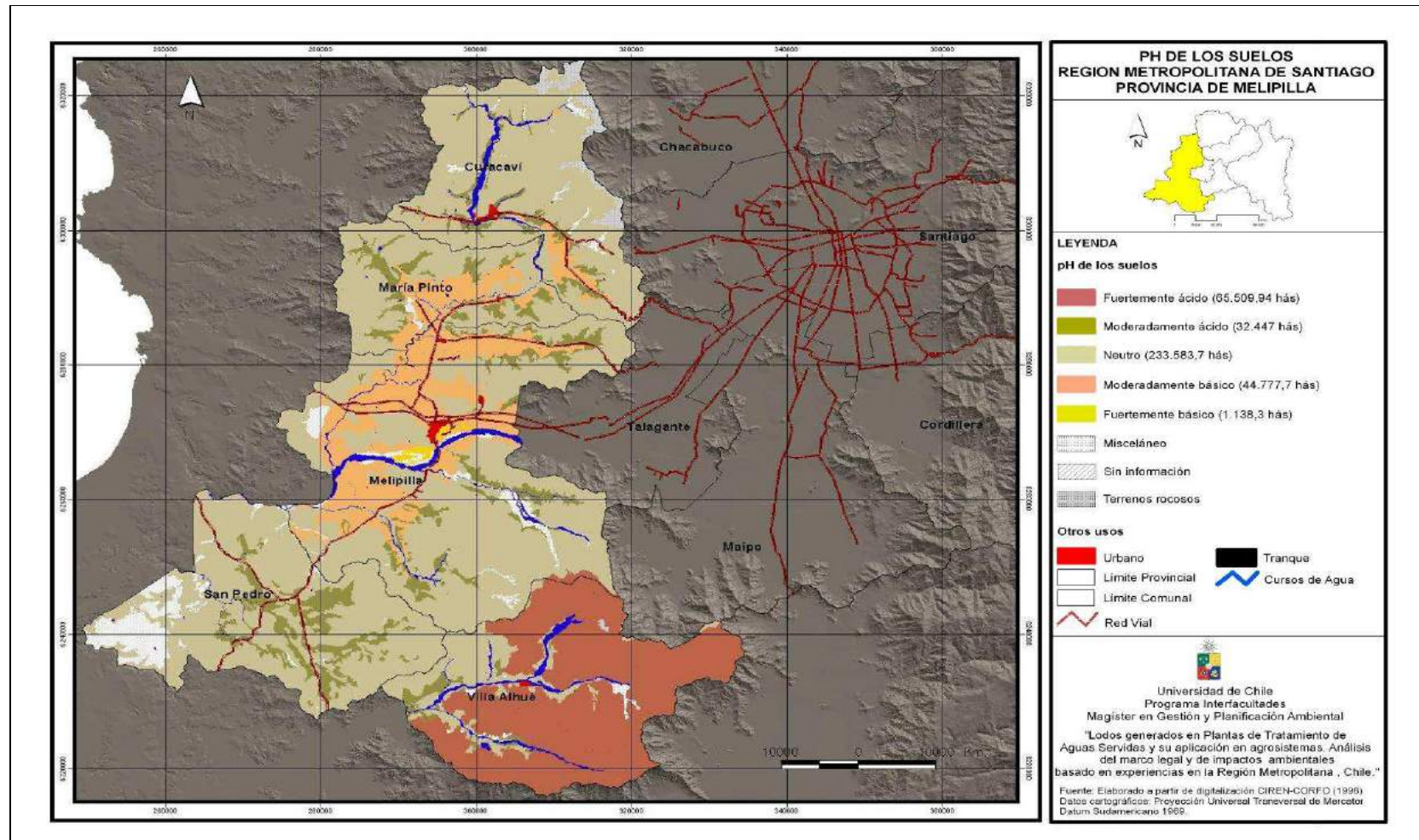


Figura I.3. Uso y cobertura de los suelos en la provincia de Melipilla, RM

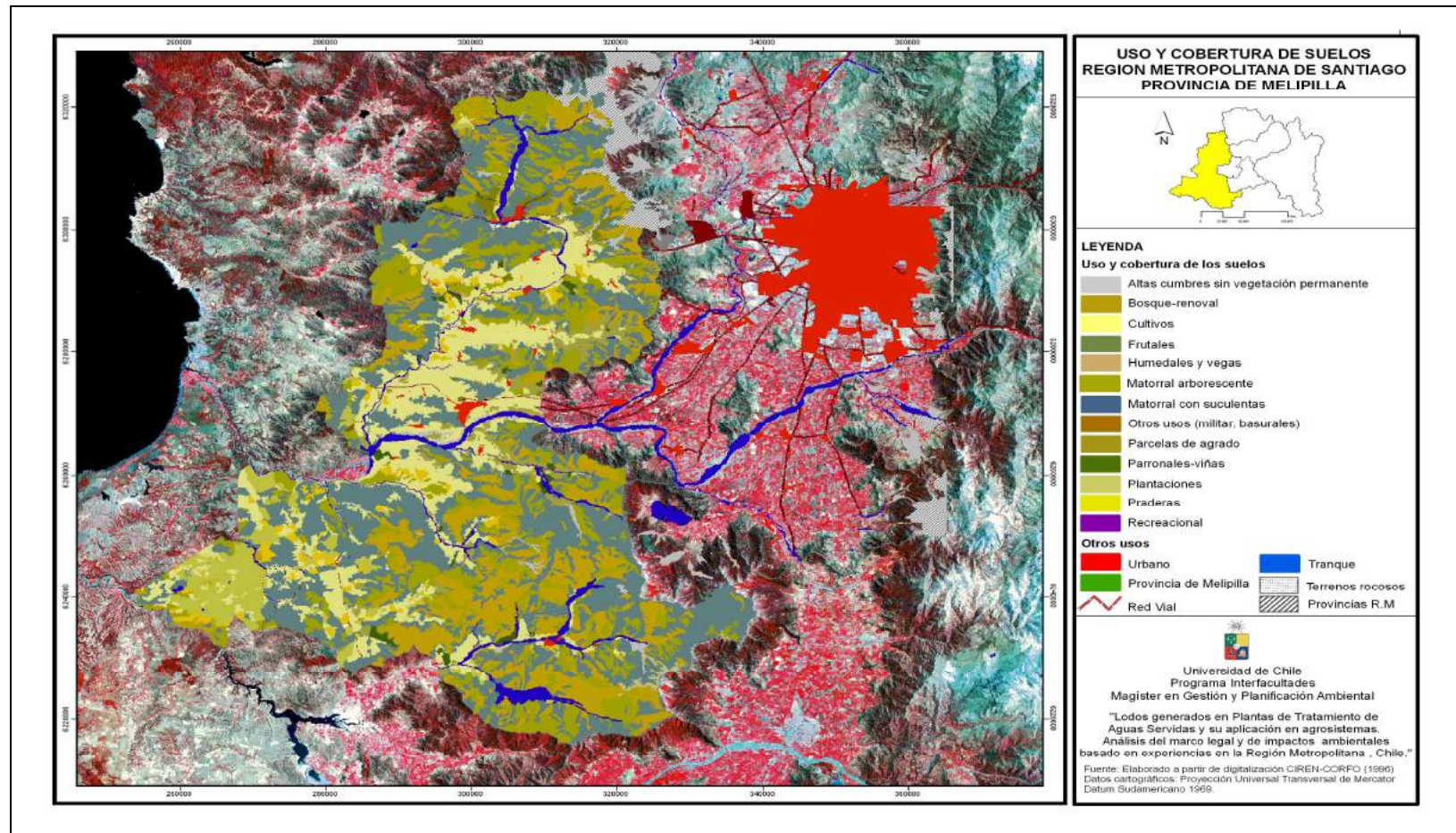


Figura I.4. Buffers hidrológico en la provincia de Melipilla

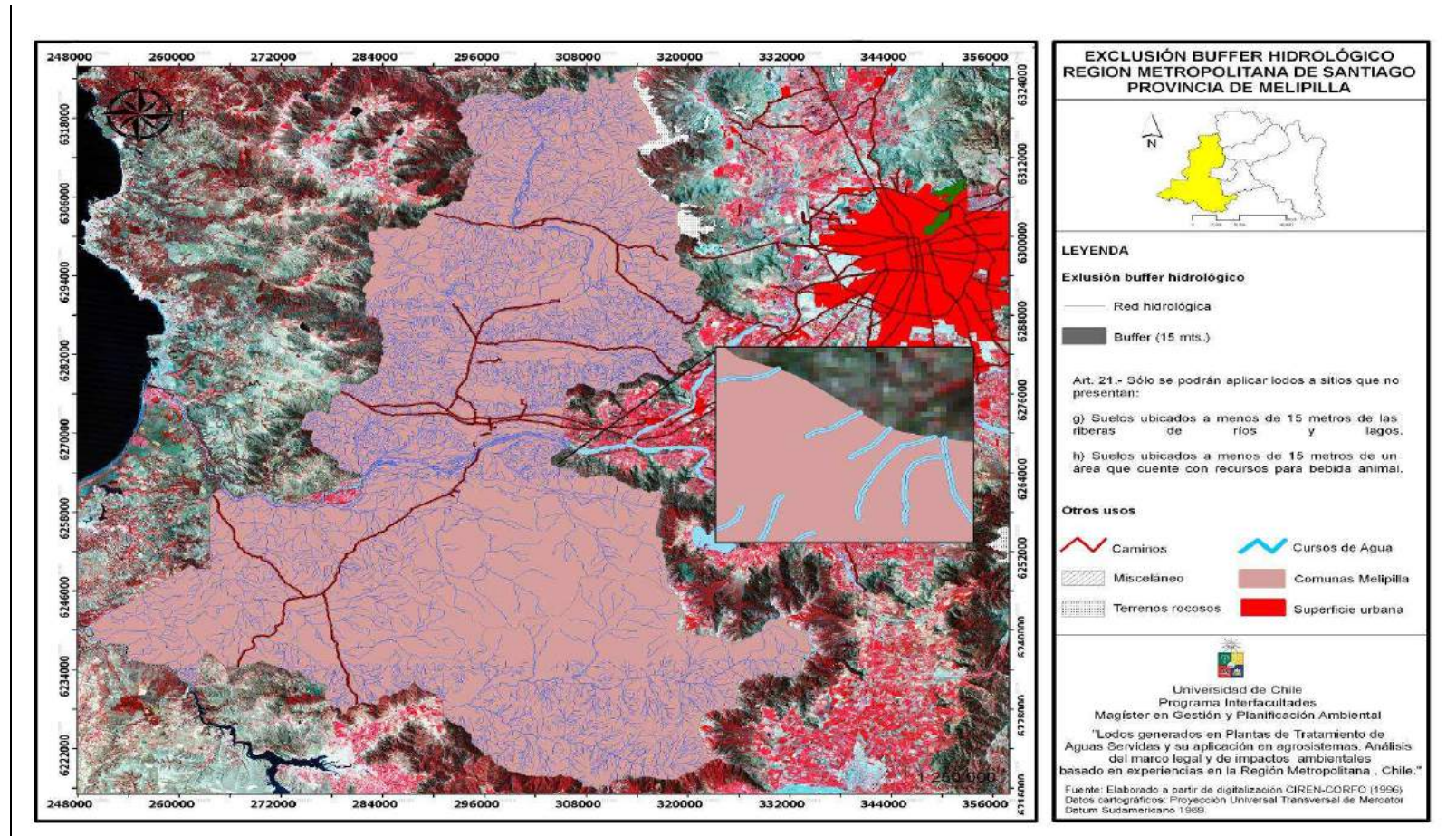
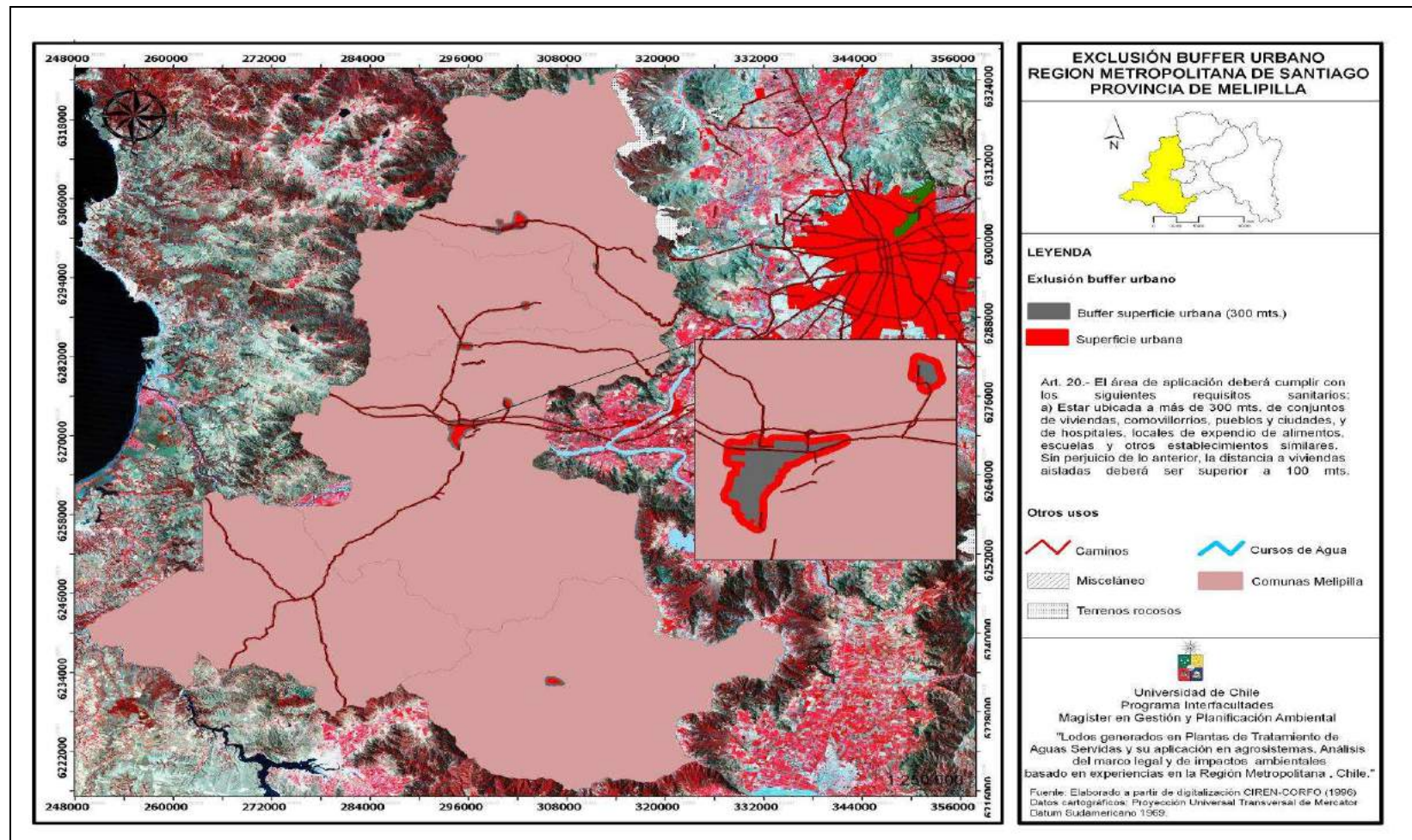


Figura I.5. Buffers urbanos en la provincia de Melipilla



Apéndice II

Cuadro II.1 Contenido total de elementos traza metálicos en lodos de diferentes PTAS.

PTAS	Elementos traza metálicos y nutrientes en lodos (mg kg ⁻¹)				
	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Esva 1	<5	47	19		292
Esva 2	<5	35	20		252
Chacón 2meses	<6	497	23	82	678
Chacón 2meses	<6	626	28	103	853
Chimbarongo I (*)	<6	381	38	79	774
Chimbarongo II (*)	<6	406	32	82	789
San Francisco I	<6	517	26	50	486
San Francisco II	<6	225	36	38	225
Santa Cruz I*	<6	477	29	79	716
Santa Cruz II (*)	<6	454	30	83	694
Peralillo I	<6	141	30	50	309
Peralillo II	<6	288	43	72	601
Palmilla I (#)	<6	146	29	34	121
Palmilla II (#)	<6	50	25	26	62
Población I (+)	<6	751	33	85	880
Población II (+)	<6	784	34	38	857
Curicó con cal	5	1.006	43		475
Curicó sin cal	5	285	52		654
Hualañé	5	905	35		692
San Rafael	5	1.017	41		759
San Clemente	5	767	25		889
Empedrado	5	240	34		1.198
Longaví	5	303	25		822
Teno	5	195	29		731
CONAMA (2000)	8-40	1000-1200	80-420	300-400	2000-2800

(*) Digestor; (+) sedimentador secundario; (#) lagunas de decantación.

SIGLAS

As	Arsénico
B	Boro
Ca	Calcio
CCUS	Clase de capacidad de uso de suelos
Cd	Cadmio
CE	Conductividad eléctrica
CIREN	Centro de Información de Recursos Naturales
CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente
CONYCIT	Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
Cu	Cobre
D.S.	Decreto Supremo
EEC	European Economic Community
EPA	Environmental Protection Agency
ETM	Elementos traza metálicos
Fe	Hierro
FONDEF	Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico
GEI	Gases efecto invernadero
INIA	Instituto de Investigaciones Agropecuarias
K ₂ SO ₄	Sulfato de potasio
MINAGRI	Ministerio de Agricultura
Mn	Manganeso
MO	Materia orgánica
Mo	Molibdeno
N	Nitrógeno
Ni	Níquel
NO ₃ ⁻	Nitrato
ODEPA	Oficina de Desarrollo y Planificación Agraria
P	Fósforo
PTAS	Planta de tratamiento de aguas servidas
RCA	Resolución de calificación ambiental
RM	Región Metropolitana
S	Azufre
SAG	Servicio Agrícola y Ganadero
SEIA	Sistema de evaluación de impacto ambiental
SFT	Superfosfato triple
U	Urea
UE	Unión Europea
USA	United States of America
Zn	Zinc