



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Geografía

**ANÁLISIS DE LAS POTENCIALIDADES DE LOS SUELOS DE LA
COMUNA DE MELIPILLA, IDENTIFICANDO ZONAS APTAS
PARA LA DISPOSICION FINAL DE BIOSOLIDOS, REGION
METROPOLITANA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE GEOGRAFO

JOCELYN JEANNETTE VEGA VALLEJOS

Profesora Guía: Carmen Paz Castro Correa

Santiago- Chile
Diciembre de 2007

A mis Padres

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a las siguientes personas, que de alguna u otra forma me ayudaron en la ejecución y desarrollo de este trabajo de investigación.

En primer lugar, a mi profesora guía Carmen Paz Castro, quien permitió poder desempeñarme en el trabajo ligado a la pedología y que brindó apoyo, conocimiento y paciencia en el desarrollo de esta memoria. Junto a los profesores María Victoria Soto y José Francisco Araya Vergara, que nunca pusieron ninguna limitación para consultas o complementación de la información.

En segundo lugar, agradecer a mis amigos y compañeros que fueron un aporte importante en el transcurso de la tesis, ya que siempre cuando necesite de su ayuda pude contar con ellos, estos son Gonzalo Arias, Rodrigo Moreno, Roberto Fernández, Rodrigo Calabrán, Marcia Cheuquelaf, Karen González y Marcela Rodríguez.

Finalmente, les debo todo lo que soy a mis padres, Juan y Jeannette que me dieron una gran formación y a los que quiero mucho.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	10
CAPITULO I: PRESENTACIÓN	11
1.1 INTRODUCCIÓN	11
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.3 OBJETIVOS	16
1.4 HIPÓTESIS DE TRABAJO	16
1.5 AREA DE ESTUDIO	17
CAPITULO II: ESTADO DEL ASUNTO	23
2.1 ANTECEDENTES DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE LODOS	23
2.2 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS	24
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS BIOSÓLIDOS	30
2.4 TIPOS DE LODOS	32
2.5 MANEJO Y UTILIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS	33
2.6 EXPERIENCIAS INTERNACIONALES DE APLICACIÓN DE LODOS A SUELOS	36
2.7 CASO CHILENO: NORMATIVA PARA LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS	38
2.8 CONSIDERACIONES GENERALES ACERCA DEL SUELO	40
2.8.1 CARACTERÍSTICAS DE SUELOS RECEPTORES DE BIOSÓLIDOS	41
2.8.1.1 Suelos con limitaciones productivas o agrícolas	41
2.8.1.2 Suelos degradados	41
2.8.1.2.1 La Erosión del suelo	42
a) Causas que inciden en la Erosionabilidad del suelo	43
b) Factores que inciden en la Erodabilidad del terreno	47
2.9 CONTENIDOS DE METALES PESADOS	49
2.9.1 Metales Pesados en Suelos	49
2.10 CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LODOS SEGÚN LA NORMATIVA	51
CAPITULO III: METODOLOGIA	52
3.1 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS (PRECIPITACIÓN)	54
3.2 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS Y TOPOGRÁFICAS	56
3.3 SERIES DE SUELO	57
3.5 ANÁLISIS DE LA CUBIERTA VEGETAL	65
3.6 IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS SUSCEPTIBLES A LA APLICACIÓN DE BIOSOLIDOS	65
3.7 ANÁLISIS DE SUELOS	66

CAPITULO IV: RESULTADOS	67
4. FACTORES DE ERODABILIDAD	67
4.1 CARACTERISTICAS CLIMATICAS	67
4.2 CARACTERIZACION MORFOLOGICA (Material Parental)	71
<i>4.2.1 Unidades Geológicas</i>	<i>71</i>
<i>4.2.2 Unidades Geomorfológicas</i>	<i>76</i>
<i>4.2.2.1 Sistemas de Vertientes</i>	<i>76</i>
<i>4.2.2.2 Formas depositacionales de base de vertientes</i>	<i>77</i>
<i>4.2.2.3. Formas de Fondo de Valle</i>	<i>78</i>
<i>4.2.3 Topografía</i>	<i>81</i>
<i>4.2.4 Exposición a la Precipitación</i>	<i>85</i>
4.3 CUBIERTA VEGETACIONAL	87
5. FACTORES DE EROSIONABILIDAD	94
5.1 UNIDADES EDAFICAS	94
<i>5.1.1 Origen de suelos de la comuna de Melipilla</i>	<i>94</i>
<i>5.1.2 Características de las Series de Suelo</i>	<i>98</i>
<i>5.1.3 Textura superficial de suelos</i>	<i>101</i>
<i>5.1.4 Estructura del Suelo</i>	<i>105</i>
<i>5.1.5 Clases de Drenaje y Permeabilidad de la comuna de Melipilla</i>	<i>108</i>
<i>5.1.6 Grupos Hidrológicos de la comuna de Melipilla</i>	<i>112</i>
<i>5.1.7 Profundidad Efectiva del Suelo</i>	<i>115</i>
<i>5.1.8 Materia Orgánica (M.O)</i>	<i>118</i>
<i>5.1.9 pH de suelos</i>	<i>121</i>
<i>5.1.10 Capacidad de Intercambio (C.I.C)</i>	<i>124</i>
<i>5.1.11 Clases de Capacidad de Uso de Suelo</i>	<i>125</i>
6. IDENTIFICACIÓN DE AREAS POTENCIALES	129
6.1 POTENCIALIDADES Y LIMITACIONES PARA APLICAR BIOSÓLIDOS EN LA COMUNA DE MELIPILLA	129
<i>6.1.2 Áreas de Exclusión Primaria</i>	<i>130</i>
<i>6.1.3 Áreas de Exclusión Secundaria</i>	<i>150</i>
6.2 Compatibilidad de Usos de Suelo	166
6.3 Compatibilidad con Cantidad de Población por Distritos	168
7. CARACTERIZACION DE FERTILIDAD DE SUELOS Y CONTENIDO DE METALES PESADOS DE AREAS SUSCEPTIBLES DE APLICACIÓN DE BIOSOLIDOS	170
7.1 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE SERIES DE SUELO APTAS PARA APLICAR LODOS	170
7.2 Análisis de Fertilidad de Muestras de Suelo	180
7.3 Contenido de Metales Pesados	180
CAPITULO V: DISCUSION	183

CAPITULO VI: CONCLUSIONES	185
BIBLIOGRAFÍA	187
ANEXOS	192

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Planta de Tratamiento de Aguas Servidas la Farfana	14
Figura 2: Ubicación del área de estudio	17
Figura 3: Población Urbano-Rural por sexos	19
Figura 4: Concentración de la Población total a nivel distrital	20
Figura 5: Población por rama de actividad económica	21
Figura 6: Superficie agropecuaria de las comunas de la provincia de Melipilla	22
Figura 7: Cobertura de Tratamiento de Aguas Servidas en la Región Metropolitana	23
Figura 8: Ubicación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas	26
Figura 9: Contenido de Metales Pesados de la PTAS La Farfana	29
Figura 10: Contenido de Metales Pesados de la PTAS El Trebal	30
Figura 11: Modelo de Aplicación de Biosólidos	37
Figura 12: Superposición y parámetros utilizados para la determinación de ERUs	52
Figura 13: Metodología BARU's	53
Figura 14: Triangulo textural y agrupamiento de las clases texturales	57
Figura 15 : Clases de Capacidad de Uso de Suelo	63
Figura 16: Esquema operativo de exclusion y aplicación de Biosolidos	66
Figura 17: Datos Medios Mensuales de la Estación Climatológica Melipilla	68
Figura 18: Adaptación de Polígonos de Thiessen	70
Figura 19: Carta Geológica	75
Figura 20: Carta Geomorfológica	80
Figura 21: Superficie a nivel comunal de los tipos de pendiente	82
Figura 22: Carta de Rangos de Pendiente	84
Figura 23: Carta de Exposición a la Precipitación	86
Figura 24: Carta de Formaciones Vegetales	88
Figura 25: Carta de NDVI	90
Figura 26: Carta de rangos extremos de erodabilidad	93
Figura 27: Carta de Origenes de suelos	97
Figura 28: Representatividad de las series de suelo	99
Figura 29: Carta de Series de Suelo	100
Figura 30: Clases Texturales y Superficie Comunal	102
Figura 31: Carta de Textura de series de suelo	104
Figura 32: Tipos de Estructura superficial de suelos	105
Figura 33: Carta de Estructura de suelos	107
Figura 34: Clases de Drenaje y superficie comunal	109
Figura 35: Carta de Clases de Drenaje y Permeabilidad	111
Figura 36: Suelos asociados a Grupos Hidrológicos	112
Figura 37: Carta de Grupos Hidrológicos	114
Figura 38: Profundidad efectiva del suelo por superficie comunal	115
Figura 39: Carta de Profundidad Efectiva del suelo	117
Figura 40: Porcentajes de M.O. por superficie comunal	119
Figura 41: Carta de rangos de Materia Orgánica	120
Figura 42: Superficie comunal y pH asociado	121
Figura 43: Carta de pH de series de suelo	123
Figura 44: Capacidad de Intercambio Catiónico por serie de suelo	124
Figura 45: Capacidad de Uso de Suelo	125
Figura 46: Carta de Capacidad de Uso de Suelo	126
Figura 47: Carta de rangos extremos de erosionabilidad del suelo	128
Figura 48: Suelos excluidos de aplicación de biosólidos según Buffer Hídrico y Urbano	131
Figura 49: Aptitud para aplicar lodos según pH	132
Figura 50: Carta de aptitud para aplicar lodos según pH	134
Figura 51: Superficie apta para aplicar lodos según Cap. de Uso de Suelo	135
Figura 52: Carta de aptitud para aplicar biosólidos según Capacidad de Uso	137
Figura 53: Aptitud para aplicar lodos según presencia de napas freáticas y vegas	138
Figura 54: Carta de aptitud para aplicar biosólidos según napas freáticas y vegas	140

Figura 55: Aptitud para aplicar lodos según rangos de pendiente _____	141
Figura 56: Carta de aptitud para aplicar biosólidos según rangos de pendiente _____	143
Figura 57: Concentración de Precipitaciones _____	144
Figura 58: Carta de aptitud para aplicar biosólidos según Riesgo Climático _____	146
Figura 59: Superficie apta y no apta donde disponer biosólidos _____	147
Figura 60: Carta con Áreas de Exclusión y Aplicación Primaria de Biosólidos _____	149
Figura 61: Superficie apta para disponer biosólidos de acuerdo a textura _____	150
Figura 62: Carta de aptitud para aplicar biosólidos según textura superficial de suelos _____	152
Figura 63: Superficie apta para disponer biosólidos de acuerdo a estructura de suelos _____	153
Figura 64: Carta de aptitud para aplicar biosólidos según estructura superficial de suelos _____	155
Figura 65: Carta de aptitud para aplicar biosólidos según Drenaje y Permeabilidad de suelos _____	157
Figura 66: Superficie apta para disponer biosólidos de acuerdo a profundidad efectiva de suelos _____	158
Figura 67: Carta de aptitud para aplicar biosólidos según profundidad efectiva de suelos _____	160
Figura 68: Superficie apta para disponer biosólidos de acuerdo a contenido de materia orgánica _____	161
Figura 69: Carta de aptitud para aplicar biosólidos según materia orgánica de suelos _____	162
Figura 70: Superficie apta y no apta donde disponer biosólidos según exclusión secundaria _____	163
Figura 71: Carta con Áreas de Exclusión y Aplicación Secundaria de Biosólidos _____	165
Figura 72: Superficie comunal según áreas del PRMS _____	166
Figura 73: Usos de suelo compatibles con áreas aptas para aplicar biosólidos _____	167
Figura 74: Población de distritos con aptitud para recibir lodos _____	168
Figura 75: Carta con Información distrital y series de suelo aptas para aplicar lodos _____	169
Figura 76: Muestreo de la Serie Las Perdices _____	170
Figura 77: Pedón de la Serie Las Perdices y sus características físico-químicas _____	173
Figura 78: Muestreo Serie Pudahuel _____	175
Figura 79: Pedón de la Serie Pudahuel y sus características físico-químicas _____	176
Figura 80: Muestreo de la serie Peumo Chico, Comuna de Melipilla _____	177
Figura 81: Pedón de la Serie Peumo Chico y sus características físico-químicas _____	179
Figura 82: Contenido de elementos traza en suelos aptos _____	181
Figura 83: Contenido de Metales Pesados por series aptas _____	182

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos demográficos y de superficie comunal	18
Tabla 2: Caracterización de lodos provenientes de las PTAS	28
Tabla 3: Comparación entre los Niveles de Nutrientes de los Fertilizantes y Biosólidos	32
Tabla 4: Concentraciones máximas de metales pesados en lodos para aplicación al suelo	35
Tabla 5: Consecuencias de la presencia de metales pesados en la salud	50
Tabla 6: Contenidos máximos de metales en suelos antes de una aplicación de lodos	50
Tabla 7: Tasas máximas de lodos según tipo de uso de suelo	51
Tabla 8: Parámetros establecidos por normativa para suelos degradados	54
Tabla 9: Parámetros establecidos por normativa para suelos con limitaciones productivas	54
Tabla 10: Rangos establecidos para el Índice Modificado de Fournier	55
Tabla 11: Rangos de Pendiente en grados	56
Tabla 12: Rangos de Exposición	57
Tabla 13: Categorías generales de suelos y las clases texturales	58
Tabla 14: Clases de estructura y sus características principales	59
Tabla 15: Clases de estructura de acuerdo al tamaño de la unidad estructural	59
Tabla 16: Rangos del pH del suelo	60
Tabla 17: Clases de Drenaje y su descripción	60
Tabla 18: Tipo de Permeabilidad y conductividad hidráulica del suelo	61
Tabla 19: Categorías específicas de Grupos Hidrológicos	62
Tabla 20: Profundidad efectiva del suelo y rangos asociados	62
Tabla 21: Rangos en porcentajes de la materia orgánica	63
Tabla 22: Clases de Capacidad de Uso de Suelo y su adaptación a cultivos	64
Tabla 23: Rangos de NDVI	65
Tabla 24: Montos precipitación por cada estación, e Índice de Agresividad Climática	69
Tabla 25: Unidades geológicas y erodabilidad	74
Tabla 26: Condición geomorfológica y erodabilidad	79
Tabla 27: Pendiente y caracterización geomorfológica	83
Tabla 28: Superficie comunal por exposición de las laderas	85
Tabla 29: Categorías de NDVI	88
Tabla 30: Características morfológicas y orígenes de suelo	96
Tabla 31: Clases texturales y Series de Suelo	103
Tabla 32: Tipos de estructura y erosionabilidad por series de suelo	106
Tabla 33: Clases de Drenaje, permeabilidad y series de suelo	110
Tabla 34: Erosionabilidad según profundidad efectiva	116
Tabla 35: Erosionabilidad según rangos de Materia Orgánica	119
Tabla 36: pH de las series de suelo	122
Tabla 37: Sectores excluidos de la aplicación de biosólidos de acuerdo a buffer hídrico y urbano	130
Tabla 38: Series de suelo aptas según pH	133
Tabla 39: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a Capacidad de uso	136
Tabla 40: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a presencia de napas y vegas	139
Tabla 41: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a rangos de pendiente	142
Tabla 42: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a Exclusión Primaria	148
Tabla 43: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a Textura Superficial de suelos	151
Tabla 44: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a Estructura Superficial de suelos	154
Tabla 45: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a Clases de Drenaje y Permeabilidad de suelos	156
Tabla 46: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a Profundidad efectiva de suelos	159
Tabla 47: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo al contenido de materia orgánica de suelos	161
Tabla 48: Suelos potenciales y no aptas de acuerdo a Exclusión Secundaria	164
Tabla 49: Análisis de Fertilidad de muestras de suelo	180

RESUMEN

La presente investigación está inserta en el Proyecto FONDECYT N° 1050726, denominado *Conformación de un Modelo de Unidades Espaciales de Respuesta a la Aplicación de Biosólidos en la Región Metropolitana*, y cuya finalidad radica en identificar y analizar las principales áreas insertas, en este caso, dentro de la comuna de Melipilla, que reunirían las condiciones necesarias para la incorporación de biosólidos al suelo, de acuerdo al *Reglamento para el Manejo de Lodos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas* de CONAMA (2006).

En esta normativa, se indican las exigencias necesarias que deben poseer las zonas no urbanas, cuyos suelos sean potenciales receptores de lodos sin convertirse en agentes de contaminación, encontrándose estos con severas limitaciones productivas, o con un estado de degradación.

En este contexto, la comuna de Melipilla posee condiciones ambientales que han influido en la generación de suelos con limitaciones productivas, y que también se han visto afectados por procesos de erosión y deterioro de sus características físico-químicas, lo cual es un antecedente básico a considerar si se quiere recuperar este recurso por medio de la incorporación de biosólidos. Pero, esto se debe realizar, siempre y cuando, se lleve a cabo un manejo adecuado tanto de los lodos, como de los sitios de aplicación, en términos sanitarios y ambientales.

En función de lo expuesto, la metodología inherente a la presente investigación, por medio del cual se determinaron las áreas potenciales para la aplicación de biosólidos, se fundamentó en la aplicación de la normativa (CONAMA, 2006), que especifica las condiciones que deben poseer las zonas con mejores aptitudes para este fin, de acuerdo a una adaptación del modelo de MARKER (2001). Pero además, para complementar de mejor modo dicha información, se añadieron también otras variables que no están contenidas precisamente en el Reglamento, por lo cual, en una primera etapa, se analizaron los parámetros físico-naturales del área de estudio, incluyéndose las variables climática, morfológica-topográfica, edafológica, y vegetal. En una segunda instancia, se consideró la exclusión de áreas que no cumplieron lo propuesto por la normativa, en base a criterios ambientales. Posteriormente, se caracterizaron las zonas específicas con las respectivas cláusulas establecidas por Ley, desde una perspectiva del análisis físico-químico, en función del contenido de metales pesados de los suelos, y finalmente se complementó la información obtenida con antecedentes socioeconómicos de las áreas finales.

En consecuencia, los resultados obtenidos, indican que si bien la comuna de Melipilla presenta una considerable superficie con suelos degradados (capacidad de uso VI y VII) y, con limitaciones agrícolas (IV), que conforman los requisitos básicos para mejorar las propiedades físico-químicas y productivas de este recurso, se identificaron reducidas áreas que cumplen con las disposiciones establecidas por el reglamento de la CONAMA (2006), las cuales en su conjunto presentan características edafológicas similares, y que en consecuencia, no poseen limitantes con respecto al contenido de metales pesados que pudieran ocasionar algún efecto nocivo sobre la población existente dentro de estas zonas.

Palabras clave: Aplicación de biosólidos, características de los suelos, degradación y limitaciones productivas, contenido de metales pesados.

CAPITULO I: PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Las técnicas de manipulación de biosólidos, conforman una de las alternativas más efectivas que han surgido en el último tiempo para mejorar la capacidad productiva y las condiciones de degradación de los suelos, en donde las principales fuentes generadoras de grandes volúmenes de lodos, corresponden a las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.

En efecto, PLASTER (2000), señala que existen tres opciones importantes para la manipulación del lodo residual: la incineración, el relleno de tierras y la aplicación al suelo. De estos, el último método, puede ser el más seguro ya que el material se diluye por su aplicación sobre grandes zonas, filtrado por la matriz del suelo y descompuesto por los organismos que habitan en él.

Si bien, esta opción ha sido llevada a cabo por diversos países, tales como Francia, EEUU, Nueva Zelanda, Australia, entre otros, (EPSTEIN, 2003; CORTEZ, 2003; AGUILERA, *et al.*, 2005), que cuentan con una normativa que les permite utilizar los lodos e incorporarlos a suelos tanto agrícolas como forestales, en Chile la realidad es diferente, ya que la única alternativa existente es derivar los biosólidos a rellenos sanitarios. Pero, por efecto del aumento de producción de lodos, se generará a mediano plazo, un colapso en las Plantas de Tratamiento, por lo cual diversas entidades se han alertado, y se han preocupado por la búsqueda de mejores soluciones a este hecho, por ejemplo examinando otros lugares alternativos de disposición.

Por ende, en base a las experiencias internacionales de aplicación de biosólidos, señaladas anteriormente, la opción más efectiva sería destinar estos lodos al mejoramiento de recursos que pueden tener un cierto nivel de degradación, tal como es el caso de muchos suelos del país.

La Región Metropolitana, destaca al ser el escenario donde convergen dos situaciones importantes, por un lado, el desmesurado crecimiento de la planta urbana en el centro de la Región, junto a la existencia de los suelos más productivos a nivel nacional, lo que ha traído como resultado la generación de problemas ambientales en los suelos. Por otro lado, en los sectores marginales de la Región, la degradación y erosión de suelos obedecen a procesos de tipo natural, junto con las malas prácticas agrícolas, que intensifican el deterioro del medio ambiente ya sea por desconocimiento o carencia de medidas o técnicas adecuadas.

Es por esto, que después de un largo período en que no se contaba con una normativa que permitiera la utilización de biosólidos para el mejoramiento de la aptitud de los suelos, surge en el año 2000 un *Anteproyecto de Lodos No Peligrosos* de la CONAMA, en donde se expresaban los requerimientos e imposiciones de acuerdo a las características de los lodos, las características de los sitios de aplicación, y los respectivos criterios de precaución, sean sanitarios, de contenido de metales pesados, y/o de nutrientes. Antecedentes que fueron la plataforma para la aprobación de la normativa denominada *Reglamento para el Manejo de Lodos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de la CONAMA* en el año 2006.

Considerando lo anterior, cobra gran importancia el análisis que ha de llevarse a cabo sobre los lugares o sitios de aplicación, como receptores potenciales de biosólidos, ya que aparte de poseer características físico-naturales particulares, según sea su localización geográfica, también albergan una parte importante de población, lo cual puede restringir la incorporación de

distintas clases de lodos al suelo, según se expresa en la normativa, que plantea la existencia de macro-regiones donde se acentuaría la carga metálica de los lodos.

En este sentido, los efectos nocivos para la salud humana, constituyen un riesgo sanitario, ya que los lodos resultantes de los procesos de depuración de aguas negras contienen un número muy grande de contaminantes, debido a la variedad de orígenes de los afluentes que se evacúan en los sistemas de alcantarillado. Estos incluyen productos de excreción de seres humanos, sustancias químicas domésticas, combustibles de automóviles, lubricantes y productos de limpieza, escorrentía de aguas lluvia provenientes de autopistas y carreteras que contienen PAH y otros productos de quemados de combustibles, y efluentes de diversas industrias (ALOWAY, 2003).

Pero por otra parte, la importancia de incorporar biosólidos al suelo radica principalmente en que poseen propiedades que permitirían mejorar las características físicas y productivas de los suelos, siempre y cuando se tomen en consideración los resguardos sanitarios que indica la normativa.

Por tanto, el presente trabajo, tiene por finalidad analizar e identificar las características óptimas que deben poseer los sitios donde eventualmente se aplicarían biosólidos en la comuna de Melipilla, de acuerdo a las variables físico-naturales, tales como la geomorfología, la geología, la pendiente, hidrología superficial y subterránea, y los suelos, asociados a sus propiedades físico-químicas, al igual que a las características del uso de suelo, y demográficas del área de estudio.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Región Metropolitana de Santiago, corresponde a la unidad político-administrativa más poblada del país, lo que ha generado una fuerte presión antrópica al sistema natural.

En efecto, esto puede fundamentarse con los resultados obtenidos en los dos últimos Censos de Población y Vivienda (INE, 2002), en donde se destaca que la Región Metropolitana para 1992, contaba con 5.257.937 hab., y para el año 2002 se contabilizó una población de 6.061.185 hab.

Según BRIGNARDELLO y GEORGUDIS (1998), esta característica se debe a que la Región presenta condiciones ambientales que favorecen la ocupación humana, tales como un clima templado, una topografía relativamente llana, la proximidad del litoral, y la presencia de recursos naturales (agua y suelos fértiles), entre otras.

Si bien, estos factores son de gran importancia para la localización de instalaciones humanas, como residencias, industrias e infraestructuras, y para el desarrollo de actividades productivas, no es un tema menor el hecho de que actualmente la Región Metropolitana está siendo participe de un creciente proceso de urbanización, que se expresa en diversas intensidades e impactos.

Dentro de las consecuencias negativas que ha generado el crecimiento del espacio continuo de la ciudad, se encuentran un proceso gradual de pérdida de suelos agrícolas de alta calidad, por su reemplazo en algunos casos, por el uso forestal y en otros por el urbano (OLIVARES, 2000).

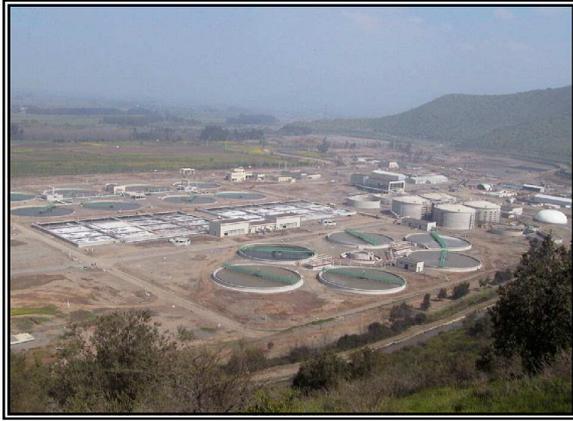
También las intensidades de urbanización, están generando importantes impactos ambientales entre los que destaca la creciente degradación del recurso suelo, recurso que cumple con significativas funciones ambientales que influyen en la calidad de vida de sus habitantes (CASTRO, 2005).

Pero también se aprecian otros tipos de impactos, relacionados con la degradación de la calidad del agua superficial, debido a la descarga excesiva de contaminantes en los desagües de las ciudades, y el saneamiento de los cauces fluviales, lo que ha influido en la generación de importantes volúmenes de lodos residuales o biosólidos, impacto que ha tratado de revertirse por medio del tratamiento de aguas servidas.

CORTEZ (2003), indica que la incorporación de grandes capitales de inversión posibilitaron el desarrollo de nuevos proyectos en el país, entre los que destacan los sistemas de tratamientos por lodos activados de tipo convencional implementados en particular para la Región Metropolitana, dentro del Plan de Desarrollo de la Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias ó Aguas Andinas (antiguamente EMOS S.A).

Si bien, éste es un importante antecedente, las Plantas de Tratamiento (Fig. 1) destinan este tipo de subproducto a saturados rellenos sanitarios, por lo cual es ineludible el hecho de que se debe dar otra salida a estos desechos, y una de las alternativas, es buscar potenciales sitios de aplicación de lodos, considerando las características físico-químicas de los suelos, y también de los lodos producidos, por efecto de la carga importante de metales pesados y otros contaminantes patógenos que contienen.

Figura 1: Planta de Tratamiento de Aguas Servidas la Farfana



Fotos: www.conama.cl/rm/568/article-1201.html

Los biosólidos, corresponden a la acumulación de sólidos orgánicos sedimentables separados en los diferentes procesos de tratamiento de aguas servidas (CONAMA, 2001), y si bien, su importancia radica en que poseen aptitudes que permitirían optimar las características físicas y productivas de los suelos, también es importante tener presente, que la incorporación de lodos al suelo, podría eventualmente ocasionar un efecto o daño ecotóxico, disminuyendo su calidad, nivel de fertilidad y consecuentemente su valor económico.

Para la presente investigación, se pretende llevar a cabo un análisis de las características del suelo receptor de lodos, en función, por una parte, de los suelos productivos con severas limitaciones para su aptitud frutal natural, y por otra, de aquellos suelos que se encuentren degradados y/o erosionados.

Por ende, el área de estudio seleccionada, y que se inserta dentro del sector occidental de la Región Metropolitana, es la comuna de Melipilla, caracterizada por la presencia de las condiciones de *secano interior*, que favorecerían el desencadenamiento de procesos de degradación y erosión de sus suelos, y que podrían ser beneficiados con la aplicación de biosólidos.

El secano interior, por encontrarse en la vertiente interna oriental de la Cordillera de la Costa, presenta condiciones de aridez mayor que las áreas ubicadas en su vertiente occidental (CEPAL, 1993). Por tanto, las características ambientales del área, de gran fragilidad ecológica, con un limitado potencial de suelos y serias limitantes en la disponibilidad de agua, hacen que la comuna sea muy vulnerable a los periodos cíclicos de sequía que afectan a la zona de secano de Chile Central (MARQUEZ, 2002).

Esto se ve confirmado, por los antecedentes recopilados por LIENLAF (2003), que indica que en la zona central del país, la Cordillera de la Costa es el sector más afectado por la erosión hídrica. Señala que en esta área, en 1965, el 59% de una superficie cercana a los cinco millones de hectáreas, presentaba erosión hídrica en diversos grados.

También otras investigaciones llevadas a cabo por CIREN-CORFO (1979, en FAO, 1994), indican que en las tierras de cultivo de secano de la Cordillera de la Costa, la erosión hídrica es

el proceso físico de mayor relevancia, observándose disminución de la fertilidad y de la capacidad de retención de humedad de los suelos.

Como se mencionó anteriormente, las condiciones geográfico-físicas de la comuna, intensifican el desencadenamiento de procesos erosivos y de degradación de los suelos, lo cual se debe principalmente al material de origen de los suelos y las características climáticas, que son factores con marcada influencia en los fenómenos erosivos de la mencionada Cordillera, de acuerdo a lo planteado por CONAMA (1994).

Analizando lo anterior, es necesario en primera instancia evaluar todos aquellos factores naturales de carácter externo, y su nivel de vulnerabilidad con respecto a los procesos erosivos de la comuna de Melipilla, considerando la variabilidad geomorfológica, topográfica, geológica y vegetacional, ya que de acuerdo con ALOWAY (2003), el tipo de suelo que se forma en un sitio está determinado por el clima, la naturaleza del material originario (roca madre), el paisaje (especialmente sus condiciones de drenaje y recolección de agua), los organismos del suelo, la vegetación y la duración del período de tiempo de formación del suelo. Estos factores son los que en definitiva controlan la intensidad y tipo de procesos pedogénicos y erosivos, que tienen lugar y determinan la naturaleza del perfil de suelo que se desarrolla, y que son relevantes para considerar la *erodabilidad* del terreno.

En segundo lugar, considerando las propiedades intrínsecas de cada serie de suelo definida por CIREN-CORFO (1996), se establecerán las diferenciaciones correspondientes a la profundidad efectiva del mismo y de la napa freática, además del uso de suelo actual, y la capacidad de uso agrícola. A esto se le incluyen consideraciones con respecto a algunas características físico-químicas, tales como la concentración de metales pesados, el pH, el contenido de materia orgánica, la conductividad eléctrica, el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio disponible, así como la capacidad de intercambio catiónico, que se consideran dentro de los parámetros de la *erosionabilidad*.

Por tanto, esta investigación implica el ingreso y el manejo de variables físico-naturales y socioeconómicas, en sistemas de información geográfica, en donde es posible identificar todas aquellas áreas que cumplen con los requerimientos estipulados en la normativa para así incorporar elementos mejoradores del suelo, tal como es el caso de los biosólidos.

No obstante, la relevancia de este estudio, radica en contribuir con el conocimiento en detalle de variables ambientales de la comuna de Melipilla, en especial asociadas al recurso suelo, presentándose este caso como una oportunidad real de uso y utilización de lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas con el fin de mejorar sus fitopropiedades, ya que presentan concentraciones importantes de N,P,K que son los elementos requeridos por las plantas o los cultivos para optimizar su productividad.

Consecuentemente, KIMPE *et al.*, (2000), señala que existe un gran interés por los suelos debido al crecimiento de la población y la necesidad de resguardar el medio ambiente y la salud, entendiendo que las interacciones entre el hombre y el suelo se han tornado cada vez más importantes.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Analizar las potencialidades que poseen los suelos de la comuna de Melipilla, en función de sus características geográficas, identificando aquellas zonas aptas para la aplicación de biosólidos.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Evaluar y caracterizar las condiciones físico-naturales de la comuna de Melipilla, que constituyen factores exógenos generadores de procesos erosivos (Erodabilidad).
2. Analizar las series de suelo existentes en la comuna, en base a sus características físicas y estructurales tales como profundidad efectiva, textura color, clase de drenaje, permeabilidad, pH, contenido de materia orgánica, grupo hidrológico, etc, y que inciden en la Erosionabilidad de la comuna.
3. Integrar las distintas variables consideradas anteriormente, y definir las áreas más vulnerables a la aplicación de biosólidos, integrando además las variables de uso de suelo y población.
4. Caracterizar los suelos de las áreas resultantes, en base a sus propiedades físico-químicas, y del contenido de metales pesados, ante la potencial aplicación de lodos.

1.4 HIPÓTESIS DE TRABAJO

- Los suelos de la comuna de Melipilla poseen severas limitaciones productivas y condiciones de degradación, lo que se debe principalmente a las características geológicas, geomorfológicas y climáticas del sector, lo cual permite inferir la existencia de una extensa superficie apta para la aplicación de lodos.
- Las áreas identificadas como potenciales para la incorporación de lodos se ubican en sectores marginales de la Cordillera de la Costa, ya que los suelos derivados de rocas ígneas presentan un mayor grado de susceptibilidad a la erosión.
- Las áreas aptas encontradas podrían poseer contenidos de metales pesados y elementos traza metálicos, acordes con los rangos planteados por la normativa, debido a que son sectores distantes de los grandes centros urbanos e industriales de la comuna, que pudieran verse afectados por el material contaminante de suelos.

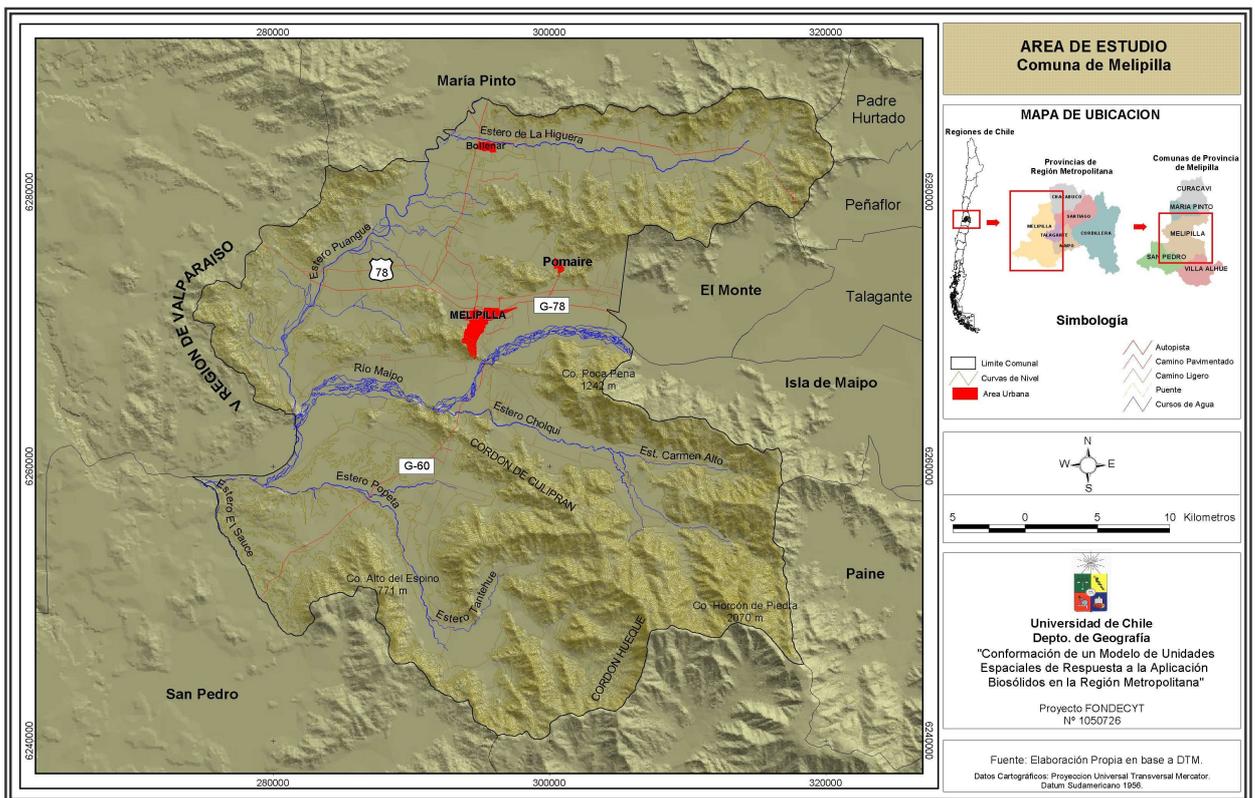
1.5 AREA DE ESTUDIO

1.5.1 Ubicación Geográfica

El área de estudio (Fig. 2), se encuentra al poniente de la Región Metropolitana de Santiago, y corresponde a la comuna de Melipilla, ubicada entre los 33°45' de latitud sur, y 71°10' de longitud oeste. Esta limita al norte con la comuna de María Pinto, al sur con las comunas de San Pedro y Villa Alhué, al oriente con El Monte, Isla de Maipo y Paine, y al poniente con la V Región de Valparaíso.

En términos administrativos la comuna de Melipilla, pertenece a la provincia del mismo nombre, junto con las comunas de María Pinto, San Pedro, Curacaví y Villa Alhué, siendo ésta la de mayor superficie, con 1344.8 km².

Figura 2: Ubicación del área de estudio



La comuna de Melipilla posee una importante superficie cubierta por extensos lomajes y cordones de cerros, tales como el Cordón de Culiprán, ubicado al centro de la comuna, y el Cordón Hueque que limita al sur con la comuna de Villa Alhué.

Las alturas son significativas, encontrando el cerro *Alto del Espino* ubicado al sur poniente de la comuna cercano al estero Popeta, con 771 m. Otras alturas significativas, y que superan los 1000 m de altitud son, el cerro *Poca Pena*, localizado al oriente de la comuna, marcando uno de los hitos que limitan con la comuna de Isla de Maipo, con 1242 m, y uno de los más altos es el Cerro Horcón de Piedra con 2070 m, al sur oriente de la comuna.

Con respecto a la accesibilidad que posee la comuna de Melipilla, ésta se realiza por medio de la Ruta 78, constituyéndose en un nexo importante para trasladarse por ejemplo a la V Región de Valparaíso. Otros caminos de importancia, son la ruta G-78 que va casi paralela a la Ruta 78, y la Ruta G-60 que conecta a Melipilla con la comuna de San Pedro, y también con la VI Región de O'Higgins.

1.5.2 Caracterización Demográfica

Es destacable la evolución demográfica que ha experimentado la comuna, de acuerdo a los dos últimos Censos de Población y Vivienda, en función de los resultados pertenecientes a la población total, en donde se aprecia que Melipilla ha experimentado una considerable variación intercensal, de un 17.8%, viéndose incrementada la cantidad de población desde 1992, que contaba con 80.255 hab., y que en el año 2002 aumentó a 94.540 hab.

Tabla 1: Datos demográficos y de superficie comunal

Superficie Km²	1.344,8
Pobl. Censo 1992	80.255
Pobl. Censo 2002	94.540
Variación Intercensal (%)	17.8
Población Urbana	60.898
Población Rural	33.642
Población Masculina	47.603
Población Femenina	46.937

Fuente: INE, 2002

Analizando ahora, lo que se refiere a la Población Urbano-Rural, cabe indicar que las estadísticas se inclinan por una mayor cantidad de población urbana, con 60.898 hab. y que conforma un 64% del total comunal. Por su parte, la población rural consta de un 36% del total de los habitantes de Melipilla, con 33.642 personas.

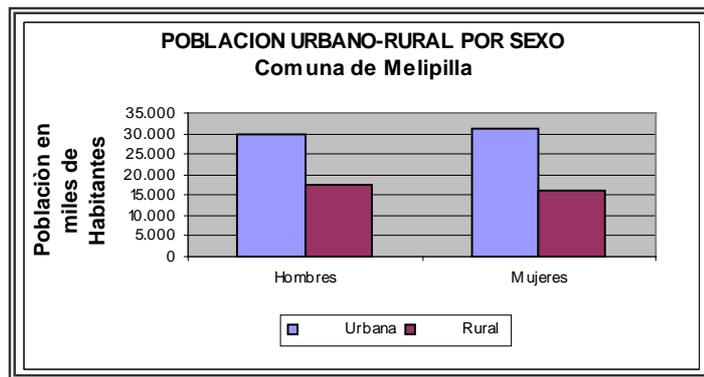
Otro dato importante, corresponde a la población comunal considerada desde la perspectiva de la división por sexos, en donde se destaca que la población masculina y la población femenina son relativamente similares o equilibradas en términos de cantidad, ya que para el primer caso hay un 50.4%, y para el segundo un 49.6%.

Las diferencias que pueden establecerse, dependen de la zona donde habiten estos géneros, ya que por ejemplo, en áreas urbanas, la población masculina es poco menor que la femenina. En efecto, la cantidad de hombres es de 29.917 hab., a diferencia de la cantidad de mujeres que es de 30.981 hab.

En cambio en los sectores rurales, la situación se invierte, ya que es la población masculina la que pasa a preponderar por sobre la femenina. En este sentido la cantidad de hombres que viven en zonas rurales es de 17.686 hab., y la cantidad de mujeres es de 15.959 hab.

Esto se puede avalar según lo expuesto en el siguiente gráfico (Fig. 3):

Figura 3: Población Urbano-Rural por sexos, Comuna de Melipilla



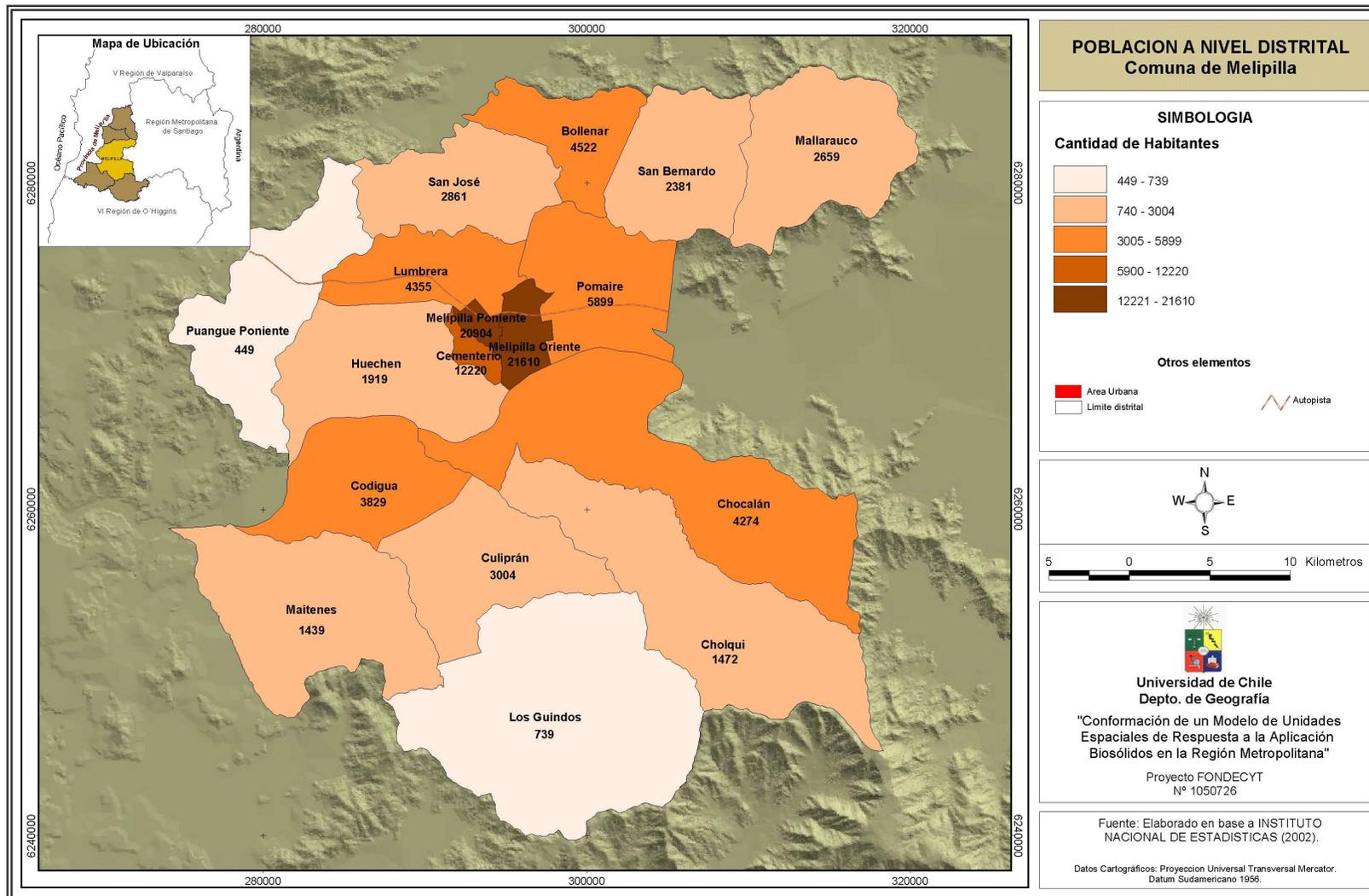
Fuente: INE, 2002

Con respecto al número de distritos (Fig. 4), es importante señalar que al interior de la comuna de Melipilla existen 17 distritos, que en su conjunto albergan una cantidad de población de 94.540 habitantes. De estos, son tres los que destacan, al reunir el 58% de la población, y que corresponden a los distritos de *Melipilla Oriente* (21.610 hab.), *Melipilla Poniente* (20.904 hab.), y el distrito de *Cementerio* con 12.220 hab, todos ubicados al centro de la comuna.

Por otra parte, los distritos que reúnen la menor cantidad de población de la comuna de Melipilla, corresponden al distrito de *Los Maitenes* (1439 hab.); *Los Guindos* (739 hab.); y *Puangué Poniente* (449 hab.), que en su conjunto sólo reúnen el 3% del total de la población.

A continuación, se señala efectivamente, los distritos que concentran mayor cantidad de población total

Figura 4: Concentración de la Población total a nivel distrital, Comuna de Melipilla



1.5.3 Caracterización Socio-Económica

Con respecto a la población económicamente activa por rama de actividad económica, es importante señalar que está constituida por las personas de uno u otro sexo, que proporcionan la mano de obra para la producción de bienes y servicios económicos durante el período de referencia elegido para investigar las características económicas. Operacionalmente involucra tanto a ocupados como a desocupados (INE, 2002).

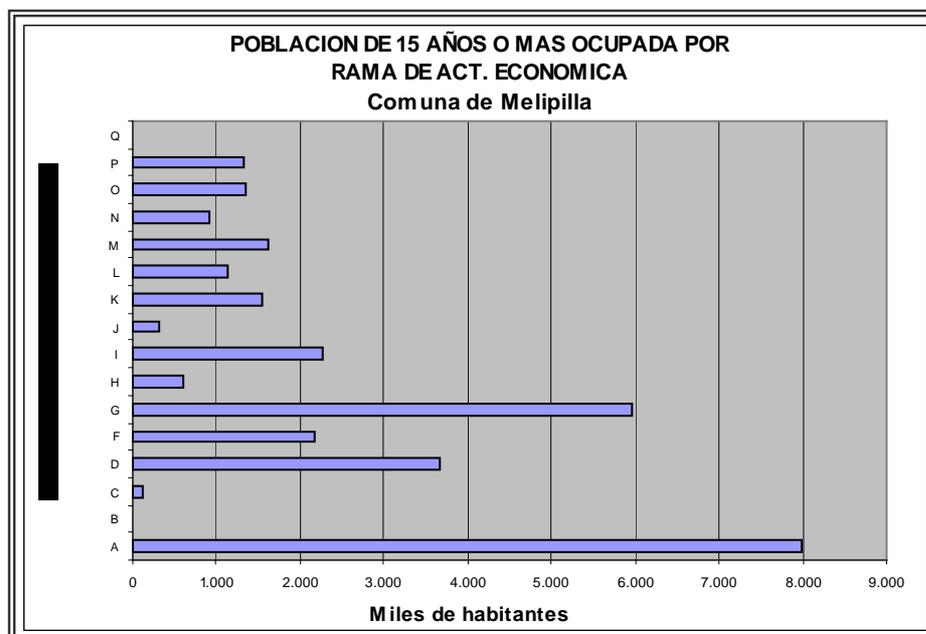
Las ramas de actividad económica (Anexo 1), por su parte, corresponden a la actividad del establecimiento en que una persona, económicamente activa, trabaja durante el período de referencia, o que trabajó por última vez, si está cesante.

Considerando a la población económicamente activa de la comuna de Melipilla (Fig. 5), cabe señalar, que la mayor cantidad de población, se concentra en el rubro dedicado a las actividades de tipo extractivo, específicamente asociada a la agricultura, ganadería, caza y silvicultura, ya que en su conjunto reúnen el 27% de la población, con 7.995 habitantes.

En segundo lugar, se encuentra el rubro económico asociado a las actividades de tipo comercial, y de reparación de vehículos automotores, que reúnen una población de 19%, con 5.968 háb.

Por su parte, las actividades económicas que no presentan mayor relevancia al interior del área de estudio, corresponden a la *pesca, organizaciones y órganos extraterritoriales*, y la *explotación de minas y canteras*, que congregan a 129 personas, y que representan menos del 1% del total de la población comunal.

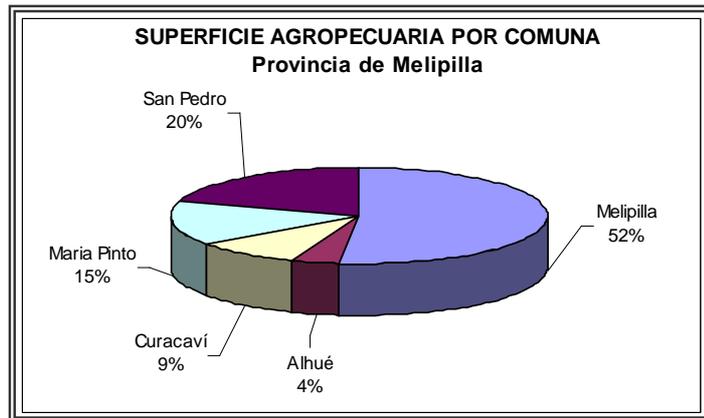
Figura 5: Población por rama de actividad económica, Comuna de Melipilla



Fuente: INE, 2002

Estimando, que la población se desempeña mayormente en aquellas actividades de tipo agrícola, se debe hacer la salvedad, con respecto a la superficie agropecuaria existente al interior de las comunas de la provincia de Melipilla (Fig. 6), en donde destaca la comuna de Melipilla, como aquella que posee mayor superficie agropecuaria, con 52% del total provincial, seguida por la comuna de San Pedro, con 18.990 hás, María Pinto, Curacaví, y finalmente Villa Alhué, con solamente 4.067 hás.

Figura 6: Superficie agropecuaria de las comunas de la provincia de Melipilla



Fuente: CONAF-CONAMA-BIRF (1997)

CAPITULO II: ESTADO DEL ASUNTO

2.1 ANTECEDENTES DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE LODOS

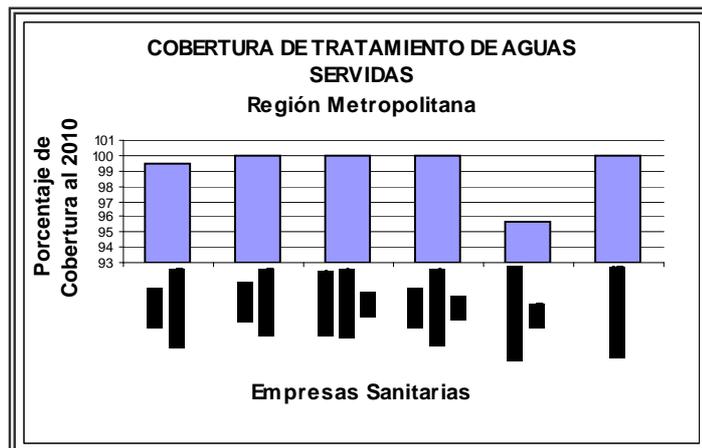
La generación de lodos, es un proceso que tiene directa relación con el desarrollo de las actividades productivas; y la intensidad de la urbanización, no sólo desde la perspectiva demográfica, sino que también de su espacio físico.

En este sentido, se destaca, que dentro de los impactos negativos que han surgido en el último tiempo y que han afectado gravemente a la Región Metropolitana, corresponden a la contaminación de los recursos hídricos por el vertimiento de las aguas servidas, que han generado serios problemas en la salud de la población y en el medio ambiente en general. Es por esta razón, que han surgido diversas políticas ambientales, con el fin de regular o normar todos estos impactos. Una de estas medidas, corresponde a la construcción de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS), cuyo propósito es devolver el agua descontaminada a los ríos.

INDUAMBIENTE (2002), señala que las expectativas son amplias a nivel nacional ya que al 2010 el gobierno espera que la cobertura general de saneamiento supere el 98% de todas las aguas domesticas, tal como se indica en el Anexo 2.

Ahora, considerando sólo a las empresas sanitarias existentes dentro de la Región Metropolitana (Fig. 7), se alude que existen seis empresas que en definitiva contarán con el 100% de cobertura total de saneamiento asociado al manejo y tratamiento de las aguas servidas para el año 2010, y que corresponden a, Aguas Cordillera, Aguas Los Dominicos, Aguas Manquehue S.A, y Smapa Maipú. Siguiéndoles en orden decreciente están Aguas Andinas S.A, con una cobertura del 99.5%, y Servicomunal S.A con 95.9%.

Figura 7: Cobertura de Tratamiento de Aguas Servidas en la Región Metropolitana



Fuente: SISS (2002)

Si bien, los avances y las expectativas de implementación de plantas de tratamiento de aguas servidas son significativas, y traen consigo numerosos beneficios tales como, aumento de la calidad de vida de poblaciones saneadas, disminución de las enfermedades infecciosas y sus

consecuentes gastos en salud, etc, (INDUAMBIENTE, 2002). No se debe dejar al margen, el hecho de que este proceso ha traído como consecuencia una mayor producción y generación de importantes volúmenes de biosólidos, entendidos como un subproducto de dicho tratamiento.

En este sentido, desde la perspectiva de la disposición de lodos o biosólidos, se puede mencionar que hasta el momento estos han sido depositados en saturados rellenos sanitarios, que corresponden según CONAMA (2001), a la instalación para la disposición final de residuos sólidos en el suelo con tratamiento de impermeabilización, que no origina molestias ni peligros para la salud, seguridad pública y el medio ambiente, y que utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos en un área determinada, reduciéndolos al volumen más pequeño posible.

Sin embargo, debido a que estos sitios presentan limitaciones en términos de capacidad y volumen, es que se presenta con esta propuesta, una oportunidad conveniente de utilización de lodos con el fin de revertir situaciones de degradación de suelos, ya que hay antecedentes que avalan el hecho de que hay una mejoramiento de la condición físico-química de los suelos, aumentando la reserva de nutrientes y su capacidad de retención de agua.

2.2 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

Como se señaló anteriormente, el crecimiento de centros urbanos va acompañado de un aumento de los volúmenes de desechos líquidos y sólidos, los cuales plantean serios problemas de manejo, salud pública y disposición. Así los desechos líquidos, por su parte, denominados aguas servidas municipales, están constituidos esencialmente por agua potable ya utilizada por la comunidad, la que contiene una gran variedad de componentes sólidos disueltos y en suspensión, los que son incorporados durante su uso doméstico, industrial y/o arrastre de agua lluvia.

La eliminación y/o acumulación de agua servida municipal no tratada en el suelo, ríos o mar, va acompañada por descomposición de materia orgánica con producción de malos olores y dispersión de microorganismos patógenos, los cuales representan un riesgo potencial para la salud de la población (INDUAMBIENTE, 2002).

Pero también, deben considerarse los lodos generados por estas plantas de tratamiento, que en términos de cantidad son variables, dependiendo de parámetros tales como, si el sistema de tratamiento biológico utilizado comprende procesos aeróbicos o anaeróbicos.

RUGIERO (2006), indica que las nuevas plantas de tratamiento pertenecientes a la empresa Aguas Andinas (El Trebal y la Farfana), son del tipo lodo activado (sistema aerobio de biomasa suspendida), éste sistema consiste básicamente en desarrollar un cultivo bacteriano disperso en un reactor agitado y aireado, alimentado con el afluente a depurar. El efluente contiene la materia orgánica y el reactor contiene un cultivo bacteriano (biomasa) aerobio en suspensión (licor de mezcla).

Según AGUAS ANDINAS (2005), la producción de lodos se ha visto incrementada desde 21.535 Ton/día de materia seca en el año 2001 a 75.555 Ton/día en el 2004 y se estima que para el 2009 la cifra alcance 111.690 Ton/día con la entrada en funcionamiento de la Planta de Tratamiento Los Nogales.

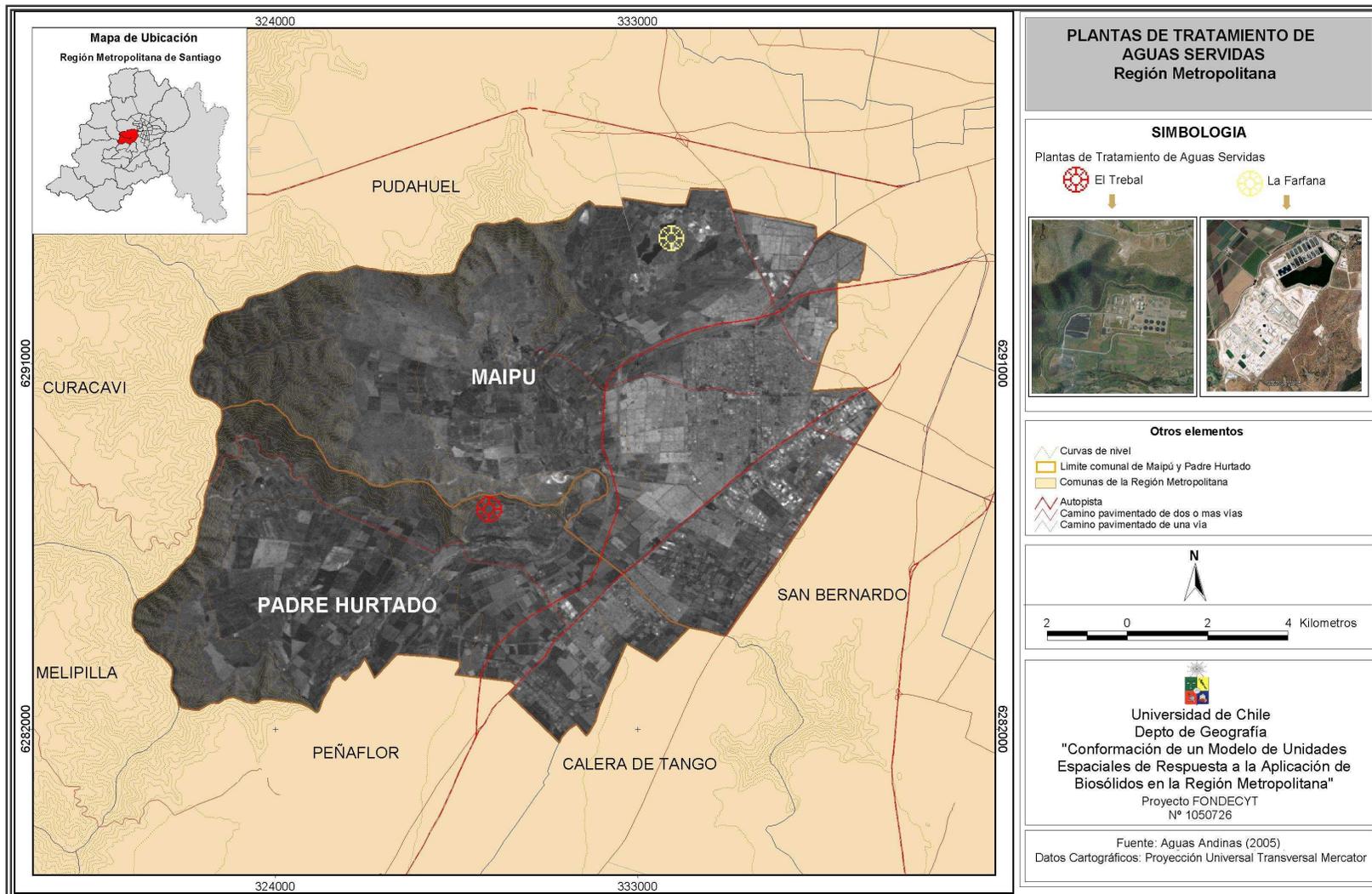
2.2.1 Caracterización de lodos provenientes de plantas de tratamiento

2.2.1.1 La Farfana y El Trenal

La Planta de Tratamiento de Aguas Servidas La Farfana (Fig. 8), corresponde a una estación depuradora que trata y dispone el 50% de las aguas servidas del Gran Santiago, la cual contribuye al saneamiento ambiental del río Mapocho. Actualmente su caudal medio de tratamiento es de 8,8 m³/s y se ha proyectado llegar a un caudal medio de 9,40 m³/s a partir del año 2027, según lo plantea AGUAS ANDINAS (2004). Esta planta, se encuentra ubicada en los antiguos terrenos de la Planta de Tratamiento Santiago Poniente (PTSP), en Camino La Farfana s/n en la comuna de Maipú, provincia de Santiago, Región Metropolitana, y posee una superficie de 130 hás.

Por su parte, la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de El Trenal, se encuentra inserta en la localidad de El Trenal, en el sector norponiente de la comuna de Padre Hurtado, provincia de Talagante; y en esta se tratan las aguas residuales del área sur y sur poniente de Santiago, la cual alberga a las comunas de San Bernardo y Maipú.

Figura 8: Ubicación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas



Ambas Plantas, para operar las aguas servidas, utilizan la tecnología de Lodos Activados Convencionales, que incluye un proceso de tratamiento para el agua (línea de agua) y uno para los sólidos (línea de lodos).

Para el primer caso, la línea de agua considera un tratamiento preliminar con remoción de sólidos gruesos y arenas mediante baterías de rejillas gruesas y finas, y desarenadores aireados; un tratamiento primario, donde sedimentan parte de los sólidos en suspensión.

El tratamiento secundario de las aguas, corresponde al proceso de lodos activados, donde se realiza abatimiento de la carga orgánica mediante oxigenación; y posteriormente, se separa el material suspendido de la fase líquida, generando un lodo secundario. El efluente se desinfecta mediante cloración (AGUAS ANDINAS, 2004).

Por otro lado, la línea de lodos considera un espesamiento de los lodos removidos en el tratamiento primario y secundario, una digestión anaeróbica que produce un lodo estabilizado por esa vía y un proceso de deshidratación para reducir su humedad.

AGUAS ANDINAS (2004), indica el procedimiento que tiene relación con la línea de lodos, tal como se señala a continuación:

- **Espesamiento y Deshidratación.** Desde los clarificadores primarios se extraen, en forma automática y programada, los lodos primarios. Desde allí son dirigidos hacia una etapa de tamizado y espesamiento. Las espumas recuperadas de los clarificadores primarios son dirigidas hacia tamizado desnatado. El lodo secundario, espesado hasta un 3-5% aproximadamente, es bombeado a los digestores anaeróbicos, donde se combina con los lodos primarios para una estabilización conjunta.
- **Digestión Anaerobia.** Los lodos que ingresan a la digestión anaeróbica son en primer lugar calentados, para alcanzar la temperatura de operación del digestor (35° C), donde pasar como mínimo del orden de 19 días para su estabilización. Finalmente, son traspasados a los estanques de almacenamiento de lodos digeridos.
- **Deshidratación de lodos.** Los lodos digeridos pasan por dos procesos de deshidratación: el de la deshidratación mecánica y el secado adicional en canchas de secado. En efecto, el lodo secado mecánicamente es transportado por camiones desde el edificio de procesamiento de lodos hasta una zona de descarga y distribución en las canchas. Los lodos estabilizados se disponen en un dispositivo denominado *Monofill*, que corresponde a un depósito a nivel de suelo constituido por una celda impermeable destinada a la disposición exclusiva de relleno de lodos tratados, que cuentan con sistemas de impermeabilización, manejo de percolados y recubrimiento.

El lodo es distribuido en capas de 20 a 30 centímetros de profundidad y compactado por medio de un nivelador mecánico (buldózer).

Ya conocido de modo general, el sistema de tratamiento de lodos, es que en la Tabla 2, se indica la composición físico-química de los biosólidos provenientes de ambas plantas de tratamiento, cuyos resultados se comparan con la normativa nacional, la directiva europea y la estadounidense, ya que estas consideran límites o concentraciones máximas de metales pesados, si se quieren incorporar lodos a los suelos que posean limitaciones agrícolas o condiciones de degradación.

Los lodos provenientes tanto de la Planta de Tratamiento La Farfana, como del Trenal, poseen en su mayoría parámetros físico-químicos relativamente similares, en lo relacionado al contenido de nitrógeno, anhídrido carbónico, y materia orgánica, siendo esta última de gran importancia puesto que implica el mejoramiento de las características edáficas del suelo, y beneficios para las propiedades físico-químicas del suelo receptor de lodos. Para el caso de la PTAS La Farfana, ésta ampara el 55% de materia orgánica, y el Trenal el 45%.

Por otra parte, de acuerdo a los contenidos promedios de metales pesados, para ambas PTAS, los valores son inferiores a lo establecido por la normativa (CONAMA, 2006), lo cual se evidencia en el caso del arsénico, cadmio, cobre, mercurio, níquel, plomo, selenio, y zinc.

Estos resultados se traducen en que existe una alta probabilidad de utilizar estos lodos provenientes de estas plantas de tratamiento, con el fin de disponerlos finalmente en un área que cumpla requisitos medioambientales establecidos por la normativa.

Tabla 2: Caracterización de lodos provenientes de las PTAS

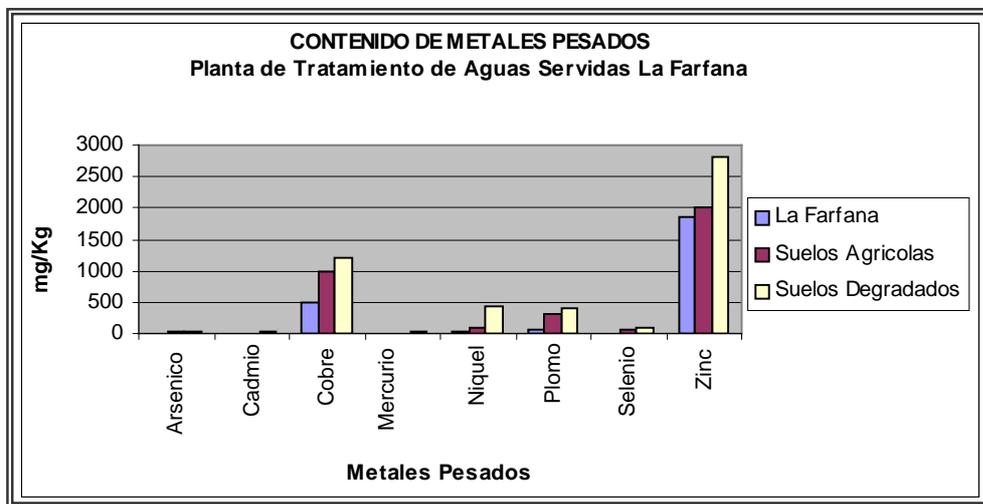
PARAMETRO	Unidad	Expresión	Promedio PTAS El Trenal	Promedio PTAS La Farfana	PROYECTO NORMATIVA DE CHILE		DIRECTIVA EUROPEA	EEUU
					Suelos Agrícolas o Forestales	Suelos Degradados	278/86	EPA 608
Físico-Químico								
Nitrógeno	% M.S.	NKT	3,2	4,5	MN	MN	MN	MN
Anhídrido Carbónico	% M.S.	P.O.s	4,5	4,1	MN	MN	MN	MN
Materia Orgánica	%	SV	45	55	MN	MN	MN	MN
Metales Pesados								
Arsénico	mg/Kg M.S.	As	16	10	20	40	MN	41
Cadmio	mg/Kg M.S.	Cd	2,5	1,4	8	40	20-40	39
Cobre	mg/Kg M.S.	Cu	503	490	1000	1200	1000-1750	1500
Mercurio	mg/Kg M.S.	Hg	1,4	2,4	10	20	16-25	17
Níquel	mg/Kg M.S.	Ni	76	42	80	420	300-400	420
Plomo	mg/Kg M.S.	Pb	61	71	300	400	750-1200	300
Selenio	mg/Kg M.S.	Se	16	2,2	50	100	-	36
Zinc	mg/Kg M.S.	Zn	1485	1860	2000	2800	2500-4000	2800

Fuente: AGUAS ANDINAS (2006)

Con respecto a los contenidos de metales pesados según sea la PTAS, y la disponibilidad de los lodos de ser utilizados en zonas con las condiciones necesarias, se destaca que en el caso de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas La Farfana (Fig. 9), los lodos existentes poseen una gran cantidad de zinc y cobre, con 1860 mg/Kg M.S; y 490 mg/Kg M.S, respectivamente, pero cuyos contenidos no exceden lo expuesto por la normativa.

Para suelos con severas limitaciones agrícolas, estos exigen una dosis de lodos con contenidos máximos de zinc de 2000 mg/Kg M.S, y de cobre de 1000 mg/Kg M.S. Y para los suelos degradados, los niveles máximos aceptables aumentan, siendo para el contenido de zinc 2800 mg/Kg M.S, y para el cobre, 1200 mg/Kg M.S.

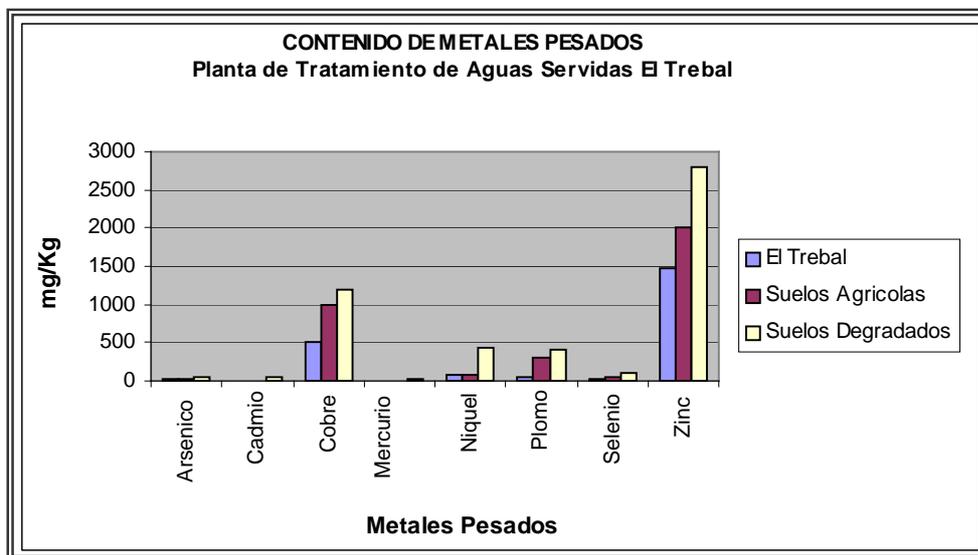
Figura 9: Contenido de Metales Pesados de la PTAS La Farfana



Fuente: AGUAS ANDINAS (2006)

Para el caso de El Trebal (Fig.10), al igual que en La Farfana, los contenidos de cobre (cu) y zinc (zn), son los que destacan por su alto contenido, pero que sin embargo, no llegan a exceder lo expuesto por el Reglamento de Lodos. El contenido promedio de zinc, este es de 1485 mg/Kg M.S., y en el caso del cobre, este es de 503 mg/Kg M.S.

Figura 10: Contenido de Metales Pesados de la PTAS El Trebal



Fuente: AGUAS ANDINAS (2006)

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS BIOSÓLIDOS

Hay numerosas acepciones con respecto al término de *Biosólidos*, según la consideración de diversos autores, tal como se menciona a continuación:

- Cuando el agua residual es tratada, se generan como subproductos del tratamiento biológico, semisólidos ricos en nutrientes llamados *Biosólidos*. Históricamente eran llamados lodos de aguas residuales, sin embargo, últimamente se utiliza el término de Biosólidos para enfatizar su naturaleza eminentemente biológica ya que están compuestos por bacterias, fomentando con ello su reciclaje o reutilización. Dentro de los tipos de lodos generados en un sistema de depuración, se encuentran aquellos que se originan como un subproducto residual del tratamiento biológico de aguas residuales, lo que comúnmente se llaman lodos secundarios, biomasa residual o biosólidos (CORTEZ, 2003).
- Los Lodos son compuestos orgánicos sólidos, semisólidos o líquidos producidos durante el proceso de tratamiento mecánico, biológico y/o químico de purificación de las aguas servidas (AGRONOMIA Y FORESTAL, 2002)
- Los lodos sanitarios corresponden a sólidos orgánicos sedimentables que pueden ser depositados en rellenos sanitarios o utilizados como fertilizantes en suelos forestales que presenten déficit de nutrientes para el soporte de plantaciones o en suelos que se encuentran degradados debido a una explotación histórica y no son productivos por tener pocos nutrientes (WHITEHOUSE *et al.*, 2000).
- PLASTER (2000), indica que los Biosólidos son el principal producto sólido orgánico producido por tratamiento de aguas residuales municipales que puede ser reciclado de forma beneficiosa.

- Otra acepción al respecto es la de AGUILERA, *et al.*, (2005), que señala que los lodos sanitarios corresponden a una acumulación de sólidos orgánicos sedimentables que pueden ser depositados en rellenos sanitarios o utilizados, entre otras opciones, como enmiendas en suelos forestales. En este último caso, la selección de los sitios de aplicación debe ser llevada a cabo considerando los criterios y restricciones ambientales que la legislación establece para la disposición de biosólidos en el país

2.3.1 Propiedades Físico-Químicas de los biosólidos

Dentro de las principales características físico-químicas de los lodos destacan las siguientes:

- Los biosólidos se caracterizan por su alto contenido de agua, la que les otorga un volumen importante y favorece sus pobres características mecánicas, dificultando su manejo y disposición final.
- Físicamente, los biosólidos generados en un proceso de tratamiento biológico por lodo activado presenta un color café marrón el que cambia a casi negro cuando está a punto de descomponerse. Su olor es el de tierra húmeda, sin embargo, cuando está descompuesto produce un olor desagradable. Contiene una concentración de sólidos que varía entre 0.3% y 1.5% (KNIGHT PIESOLD S.A., 1998).
- La fluidez y la plasticidad de los lodos varían con el contenido de agua y la naturaleza de los sólidos.
 - Al reducir el contenido de agua del lodo a aproximadamente un 15%, se puede observar un espesamiento bien definido.
 - Con un 70% a un 80% de agua, el lodo ya no escurre, y se conoce con el nombre de torta de lodo, y puede palearse.
 - Los lodos con un contenido de humedad de hasta un 65%, pueden ser depositados sin restricciones, para ellos es necesario aplicar un secado térmico o acondicionamiento con cal (KNIGHT PIESOLD S.A., 1998).
- Las características químicas de los biosólidos están relacionadas a sus cinco constituyentes, contenido orgánico; nutrientes; concentración de patógenos; concentración de metales; químicos orgánicos tóxicos.
 - La determinación del **contenido orgánico** es importante para determinar su valor térmico, su potencial olor, la utilización como mejorador de suelos y para la generación de biogás.
 - Los biosólidos provenientes de aguas servidas domésticas contiene tres **nutrientes** esenciales para el crecimiento de las plantas (Tabla 3): nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). Sin embargo, los niveles de NPK presentes en biosólidos estabilizados son inferiores a los contenidos en fertilizantes químicos como se indica en la tabla. Además, las plantas aprovechan los nutrientes que se encuentran en el suelo en forma mineralizada, con lo cual el valor fertilizante atribuible a los biosólidos estabilizados es aún menor.

Tabla 3: Comparación entre los Niveles de Nutrientes de los Fertilizantes y Biosólidos proveniente de Aguas servidas.

COMPUESTO	NIVEL PORCENTUAL DE NUTRIENTES %		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Fertilizante	5.0	10.0	10.0
Biosólido estabilizado	3.3	2.3	0.3

Fuente: CORTEZ, 2003

- Con respecto a las Concentración de **Patógenos**, los biosólidos son principalmente biomasa residual, la cual esta constituida por una heterogénea y significativa población de microorganismos como bacterias, virus, protozoos y huevos de helmitos, los que se concentran durante el proceso de depuración de las aguas servidas.
- **Metales**; los biosólidos pueden contener cierta concentración de metales pesados e iones orgánicos que son función del tipo y cantidad del residuo industrial descargado en el sistema de tratamiento de aguas servidas. Producto de lo anterior es posible encontrar metales como el boro, cadmio, plomo, níquel, mercurio, plata y zinc. Algunos de estos elementos son micronutrientes esenciales requeridos por plantas y animales los cuales a bajas concentraciones constituyen un aporte nutritivo al suelo, sin embargo, a altas concentraciones pueden ser tóxicos.
- **Químicos orgánicos tóxicos**; son aportados por los efluentes industriales, productos químicos utilizados en el hogar y pesticidas (CORTEZ, 2003).

2.4 TIPOS DE LODOS

Las características de los lodos varían según el origen de las aguas residuales y el tipo de proceso al que han sido sometidos. De esta forma, se pueden describir algunos lodos característicos del tratamiento biológico (ARAYA, 1999):

- **Lodo primario**: lodo de color gris y aspecto grasiento. Contiene entre un 50 y 60% de los sólidos en suspensión, además del excedente de los tanques de sedimentación. Las concentraciones toxicas de lodos crudo primario son de un 6 a 8%, y la porción de sólidos volátiles varia de un 60 a 80%. Generalmente en la mayoría de los casos produce un olor extremadamente molesto.
- **Lodo activado**: el lodo fresco, en buenas condiciones, tiene apariencia floculenta de color café y un característico olor a tierra que no es molesto, pero puede volverse séptico rápidamente, cambiando a color café muy oscuro. El contenido de sólidos suspendidos en un lodo activado de retorno es de 0.5 a 25, con una tracción volátil de 0.7 a 0.8.
- **Lodo digerido anaeróbicamente**: lodo de color café oscuro negro, contiene gases como el dióxido de carbono y metano. No presenta olor molesto cuando esta completamente digerido.

- **Lodos digeridos aeróbicamente:** Lodo de color pardo oscuro, floculento, de carácter relativamente inerte, producido por una aireación prolongada del lodo. Las principales funciones de un digestor aerobio son la estabilización de orgánicos y el almacenamiento temporal de lodo residual.
- **Lodo desaguado mecánicamente:** altera sus características de acuerdo al tipo de lodo, acondicionamiento químico y proceso empleado. Su densidad varía, dependiendo de lo anterior, de un 15% a 40%. El más aguado es similar al barro húmedo, mientras que el más espeso es un sólido grueso.

Los lodos de mayor atingencia para la normativa, según KNIGHT PIESOLD S.A (1998), corresponden a los lodos primarios y secundarios ya que se caracterizan por su alto contenido de material orgánico y nutrientes (N,P,K). Los Lodos contienen distintas concentraciones de metales pesados, dependiendo de su origen (urbano, mixto, industrial o residencial), y del control de descargas industriales al alcantarillado. Los lodos sin deshidratación previa, están caracterizados por un contenido muy elevado de agua (sobre 90%), una capacidad de fermentación, atracción de vectores y potencial de generación de olores.

2.5 MANEJO Y UTILIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS

2.5.1 Aplicación de Biosólidos al suelo

Analizando el hecho de que, con el transcurrir del tiempo, los rellenos sanitarios se han tornado insuficientes por efecto de los crecientes volúmenes de lodos generados por las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS), se ha hecho necesaria la búsqueda urgente de lugares alternativos de destino, los que podrían constituirse en opciones de mejoramiento de recursos degradados, como es el caso de los suelos.

Las potencialidades que poseen los Biosólidos se basan principalmente, en que permiten una disminución considerable de costos en fertilizantes junto a la contribución de la materia orgánica que favorece los procesos químicos *al aumentar la capacidad de intercambio catiónico*, procesos físicos *al mejorar la capacidad de almacenamiento de agua*; y finalmente, procesos biológicos *al entregar los nutrientes necesarios en la materia orgánica*, para el crecimiento de las plantas y la sustentabilidad de los microorganismos del suelo (COGGER *et al.*, 2000).

Otras propiedades físico-químicas, y biológicas del suelo que se ven perfeccionadas con la incorporación de lodos a los suelos, se enumeran a continuación, tal como lo plantea SEOANEZ (1999):

- Mejora la conductividad hidráulica
- Mejora la porosidad
- Mejora la permeabilidad
- Mejora la estabilidad de los agregados
- Mejora del comportamiento general del suelo ante el agua
- Descenso de la densidad del suelo ante fuertes aportes
- Actúan intensamente sobre la rizosfera
- Actúan al principio muy pobremente sobre la microflora

La dosis de su aplicación se suele fijar en función de los requerimientos del cultivo en nitrógeno y potasio. Resultado de ello, es que la productividad del suelo aumenta frecuentemente a causa del denominado *efecto de la materia orgánica* que se produce después de la aplicación de lodos.

VIDELA, *et al.*, (2005), indica que la descomposición de la materia orgánica en el suelo, asociada a la dinámica de mineralización e inmovilización del nitrógeno, son procesos claves en el sistema suelo-planta, lo cual está directamente asociado a los efectos que se generarían al incorporar lodos al suelo. La capacidad de los suelos para liberar N depende principalmente de la materia orgánica nativa del suelo, cantidad y calidad de residuos orgánicos incorporados al suelo, y factores ambientales como humedad, temperatura, aireación y pH (KHALIL *et al.*, 2001).

Siguiendo con este lineamiento, la materia orgánica del suelo es un constituyente esencial del sistema edáfico ya que por su constitución y propiedades es la responsable directa de la mayoría de los procesos, físico-químicos y biológicos del suelo. AGUILERA. *et al.*, (2005), señala entre los principales procesos en que interviene la materia orgánica se puede señalar:

- a) Es fuente de energía para los procesos biológicos heterótrofos, a través de su contenido de carbono disponible.
- b) Es fuente primaria de nutrientes como N, P y S, de su propia constitución al mineralizarse.
- c) Por ser un polielectrolito, propiedad química muy importante que la materia orgánica desarrolla a través de sus grupos ácidos, es de los principales responsables de la disponibilidad de nutrientes, tanto macronutrientes como micronutrientes.
- d) Esta última función la desempeña a través de su capacidad complejante y por los distintos grupos activos que aportan grado de acidez, con lo que actúa en la solubilización de minerales y en el transporte de sustancias catiónicas en forma de complejos solubles.
- e) Finalmente, el almacenamiento de estos nutrientes en reservorios que son los polímeros orgánicos complejos y estables, constituyen el humus. Esta retención de los elementos minerales en el humus les otorga una mayor disponibilidad de cationes que desde las formas minerales originales.
- f) También corresponde a la materia orgánica fijar a sus estructuras poliméricas y estables, sustancias orgánicas o inorgánicas que constituyen agentes ajenos y contaminantes del sistema edáfico, como son por ejemplo los metales pesados y los pesticidas (herbicidas, funguicidas, rodenticidas, etc.), con lo cual aportan al suelo una protección ante estas sustancias tóxicas. Ese almacenaje de sustancias tóxicas pasa entonces a ser directamente dependiente de la cantidad y la calidad de materia orgánica del suelo.
- g) Entre las propiedades físicas importantes que la materia orgánica le otorga al suelo está la regulación térmica del sistema por el color oscuro del humus.
- h) La capacidad de retención del agua por la formación de puentes de hidrógeno entre los polímeros orgánicos y el agua. Como el horizonte superficial del suelo es el más rico en materia orgánica, el agua se retiene especialmente en la zona radicular de los cultivos, aumentando así su disponibilidad y protegiéndose de los períodos de sequía.

- i) La materia orgánica facilita la agregación del suelo al interactuar física y químicamente con los minerales del suelo permitiendo su agregación, con lo que se mejora la aireación y permeabilidad del suelo, lo que es esencial para la bioactividad en todos los procesos aeróbicos.
- j) También es muy importante la capacidad amortiguadora de la materia orgánica ya que por su capacidad de tampón o buffer, permite al suelo protegerse del impacto de cambios bruscos de pH como pueden ser la alcalinización o acidificación excesivas, lo que se da por prácticas agrícolas o contaminación.

No obstante, cabe destacar también la existencia de aspectos negativos, según lo indica SANTANDER (2005), en donde los riesgos que conlleva aplicar estos residuos al suelo, es por metales pesados, patógenos, xenobióticos y fitotóxicos, especialmente en suelo agrícola, ya que está estrechamente ligado con la cadena alimenticia del ser humano y por lo tanto, una posible contaminación o enfermedades no se pueden descartar.

El Reglamento de Lodos No Peligrosos (CONAMA, 2006), señala los requerimientos con respecto al contenido de metales pesados, donde se especifica que *queda prohibida la aplicación de lodos en suelos de uso agrícola, forestal, cuando los análisis indiquen que los contenidos totales de metales pesados sobrepasan cualquiera de las concentraciones máximas señaladas en la siguiente tabla (Tabla 4):*

Tabla 4: Concentraciones máximas de metales pesados en lodos para aplicación al suelo en mg/kg. de lodo (base seca)

Metal Pesado	Suelos con severas limitaciones de aptitud frutal natural y forestales	Suelos Degradados
Arsénico	20	40
Cadmio	8	40
Cobre	1000	1200
Mercurio	10	20
Níquel	80	420
Plomo	300	400
Selenio	50	100
Zinc	2000	2800

Fuente: CONAMA, 2006

De estos lodos, el reglamento reconoce dos clases, según el contenido de patógenos que posean, estos son los de Clase A y los de Clase B, que se especifican a continuación:

Los **Lodos Clase A**, son aquellos aptos para uso agrícola sin restricciones por razones sanitarias, y deben cumplir con los siguientes requisitos:

- 1) Tener una densidad de coliformes fecales menor a 1.000 Número Más Probable (NMP) por gramo de lodos, base seca;
- 2) Tener una densidad de salmonella sp. menor a 3 NMP en 4 gramos de lodos, base seca;
- 3) El contenido de huevos de helmintos debe ser menor a 1 en 4 gramos de lodos, base seca;
- 4) Y tener una densidad máxima de virus MS-2 menor a 1 Unidad de Formación de Placas (UFP) en 4 gramos de lodos, base seca.

Los lodos Clase A son aptos para cualquier uso agrícola (cultivos hortícolas, frutícolas, forraje, fibras, árboles frutales, praderas para pastoreo, jardines, parques, áreas verdes, cementerios,

etc.), con lo cual no habrían restricciones, con respecto a incorporar este tipo de lodo a las áreas (en verde en la cartografía) encontradas al interior del área de estudio.

Por su parte, los **Lodos Clase B**, son aquellos aptos para uso agrícola, con restricciones de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos, y deben cumplir el siguiente requisito:

- 1) La media geométrica de la densidad de coliformes fecales, producto del análisis de un número de muestras no inferior a siete, tomadas al momento de su uso, debe ser menor que 2.000.000 NMP por gramo de lodos en base seca.

Siguiendo con el tema, CONAMA (2006), señala que el uso agrícola de los lodos está respaldado por más de diez años de experiencia en el mundo, y por estudios e investigaciones de los aspectos ambientales, como son, el contenido de metales pesados, microorganismos patógenos y nutrientes presentes en los mismos.

Por ejemplo, en Francia más del 60% de lodos fueron incorporados al 2% de los suelos agrícolas en 1999, lo que aumentó para el año 2005 a 1.3 millones, siendo usados fundamentalmente como fertilizantes. En Estados Unidos, el año 1997, ya se incorporaba un 54% de Biosólidos en suelos agrícolas (EPSTEIN, 2003).

BARBARICK *et al.*, (2004), también da a conocer otras prácticas llevadas a cabo en EEUU, en donde se experimentó durante seis años en suelos de praderas y de arbustos, concluyendo que el suelo tratado mostró un aumento de la respiración (CO₂), de la mineralización N, de las asociaciones mycorrizal, y de la biomasa activa, al compararlos con los suelos no tratados.

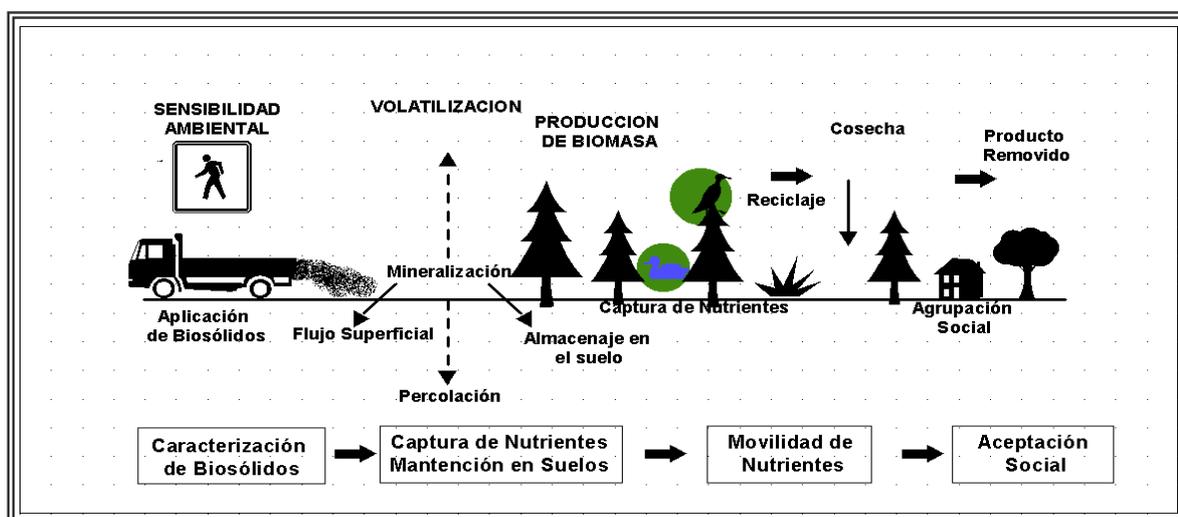
2.6 EXPERIENCIAS INTERNACIONALES DE APLICACIÓN DE LODOS A SUELOS

Numerosos países ya han aplicado esta técnica para llevar a cabo un mejoramiento de los suelos, y de las plantas que crecen y se desarrollan en él. A continuación se mencionan algunos ejemplos de los países que han aplicado este procedimiento:

- CORTEZ (2003), señala que en EEUU, programas de compostaje permiten a organismos municipales ahorrar dinero en la adquisición de acondicionadores de suelos, aún cuando el proceso de compostaje les signifique un costo adicional al asociado al tratamiento de agua residual. Los biosólidos compostados tienen la ventaja de ser de fácil almacenamiento y aplicación, porque es un producto semiseco, de poco olor y de mayor flexibilidad que los fertilizantes químicos debido a su calidad. Se pueden utilizar en terrenos agrícolas y forestales, planes de remediación de faenas mineras, mejoramiento de suelos erosionados, cobertura en rellenos sanitarios, mantención de parques y campos de golf.
- Investigaciones realizadas por la Universidad de Washington mostraron que en algunas especies forestales tratadas con lodo como fertilizante, dieron como resultado un excelente y prolongado incremento tanto en altura como en diámetro, comparado con muestras de control (TORO, 2005).
- Por otro lado, en parcelas experimentales en la localidad de Nelson (Nueva Zelanda), se llegó a la conclusión que después de tres años de aplicación de Biosólidos líquidos en plantaciones de Pino radiata de seis años, los incrementos en volumen fueron entre un 27%

y 39% en comparación con las parcelas testigos, en tanto que la carga de nutrientes fue de 300 y 600 Kg. N/ha. Este país, posee un modelo de aplicación de Biosólidos (Fig. 11), donde se destaca que un aspecto primordial para la utilización de biosólidos es la aceptación de la población, para ello se debe realizar la investigación correspondiente para asegurar que si los biosólidos son utilizados en forma segura ellos producen grandes beneficios y evita que vayan a colmatar los vertederos, problema de gran magnitud en la Región Metropolitana de Chile (AGUILERA, *et al.*, 2005).

Figura 11: Modelo de Aplicación de Biosólidos



Fuente: AGUILERA *et al.*, 2005

- En Australia la aplicación de Biosólidos sólidos en dosis de 200 y 1000 Kg. N/ha para un rodal de 21 años, se tradujo en incrementos que van del 12% al 42% en términos de volumen. La tasa mínima de aplicación ha sido determinada en 350 kg de N/ha comparable a una aplicación de fertilizante tradicional.
- También se señala que en Australia, se realiza reciclaje de lodos sanitarios debido a los beneficios ambientales que genera en las masas boscosa que se ven favorecidas con la agregación de nutrientes y materia orgánica, con los correspondientes incrementos en volumen. Se han registrado incrementos en volumen de 3 a 4 m³/ha/año. La tasa mínima de aplicación ha sido determinada en 350 kg. de N/ha comparable a una aplicación de fertilizante tradicional (TORO, 2005).
- En Francia, más del 60% (850.000 toneladas de materia seca) de los lodos fueron incorporados al 2% de los suelos agrícolas en 1999, siendo usados fundamentalmente como fertilizantes. En Estados Unidos, el año 1997, ya se incorporaba un 54% de los biosólidos en suelos agrícolas (EPSTEIN, 2003).
- Otros estudios han mostrado efectos positivos de la adición de biosólidos en zonas montañosas de Nuevo México (FRESQUEZ *et al.*, 1990, en AGUILERA *et al.* 2005,) y en Colorado (HARRIS-PIERCE, 1994, en AGUILERA *et al.*, 2005).

- Otras experiencias en Estados Unidos, según BARBARICK *et al.*, (2004) indican que experimentaron durante seis años con aplicación de Biosólidos en suelos de praderas y arbustos, concluyendo que el suelo tratado mostró un aumento de la respiración (CO₂), de la mineralización N, de las asociaciones mycorrizal, y de la biomasa activa, al compararlos con los suelos no tratados. De esta manera, los biosólidos contribuirían a mejorar la calidad del suelo relacionada con la actividad microbiana.
- Por otro lado, resultados experimentales alcanzados por QUINTEIRO *et al.*, (1998) en suelos de Galicia, España, demostraron que la adición de lodos residuales aumentó el rendimiento de los cultivos, incluso cuando la dosis de aplicación no superaba los requerimientos de nitrógeno calculados. Se observó un significativo aumento del pH de los suelos tratados con dosis mayores de lodos, no viéndose significativamente afectados los niveles de materia orgánica y metales pesados por la aplicación de estos. Tampoco se observaron síntomas de toxicidad en los cultivos. En todos los suelos el contenido de Cd fue inapreciable y los niveles para los restantes metales estuvieron por debajo de los valores límites recomendados en España para suelos tratados con lodos residuales.

2.7 CASO CHILENO: NORMATIVA PARA LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS

Dentro del contexto chileno, el manejo de lodos no peligrosos se basó en una primera instancia en un *Anteproyecto de Lodos No Peligrosos* de la CONAMA (2000), que era un ensayo o un intento incipiente de lo que serían los futuros planteamientos legales expuestos en el actualmente aprobado documento normativo denominado *Reglamento para el Manejo de Lodos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas* CONAMA (2006), y cuyas prohibiciones son las que han sido tomadas en consideración para seleccionar o excluir áreas para la aplicación de biosólidos en el suelo.

Dentro de las disposiciones generales de ambos, se dan a conocer las justificaciones que implica utilizar esta técnica de recuperación de suelos degradados y con severas limitaciones productivas en Chile, en donde se destaca como objetivo general, *el regular el uso y manejo sanitario de lodos no peligrosos provenientes de plantas de tratamiento de aguas, en la agricultura. Con lo cual se protege la salud de la población y previene el deterioro de los recursos naturales, aire, agua, flora, fauna y suelo, siempre y cuando sus condiciones físicas, químicas y biológicas lo permitan. Con lo cual estos se transforman en un producto útil, para la recuperación de suelos degradados así como para sustituir el uso de insumos tradicionales en la agricultura.* (CONAMA, 2000).

Por su parte, la normativa legal que rige en la actualidad, especifica que *el lodo por su alto contenido en materia orgánica, puede contribuir a mejorar las condiciones físicas de los suelos, es decir, constituir un aporte en aquellos que requieren incrementar su porosidad, la estabilidad de los agregados, la retención de humedad, la aireación, como es el caso de suelos delgados y/o degradados* (CONAMA, 2006).

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, se destacan, las potencialidades de la utilización de este método, siempre y cuando se apliquen los resguardos sanitarios de los lodos, para prevenir efectos nocivos tanto a la salud de la población, como al medio ambiente en general. En estos términos, es necesario indicar los parámetros o reglamentaciones indicadas por la normativa y que influyen en la prohibición de aplicación de lodos en suelos, pero cabe destacar que aquellas zonas que posean suelos con características físico-químicas adecuadas para la actividad silvoagropecuaria, en donde presenten por ejemplo, contenidos proporcionados de

materia orgánica no se justifica la incorporación de biosólidos ya que de manera natural se encuentran presentes los elementos mejoradores.

La aplicación de biosólidos es efectiva en la medida que las condiciones ambientales de un sector determinado, y sus propiedades edafológicas presenten limitaciones, es en estas zonas, donde el lodo actúa como un acondicionador de suelos que además de favorecer la asimilación de nutrientes, incrementa la retención de agua, permite una mejor penetración de las raíces y mejora la textura y estructura del suelo, todo lo cual conduce a reducir la escorrentía y por consiguiente la erosión, convirtiendo los suelos en más productivos (C.S.I.C, 1995).

Dentro de los antecedentes del área de aplicación se debe tener en cuenta la siguiente información específica:

1. Plano de predio georeferenciado a escala de detalles que incluya las distancias a áreas residenciales.
2. Mapa básico de suelos caracterizados por unidades homogéneas.
3. Curvas de Nivel.
4. Condiciones climáticas del sector de aplicación.
5. Superficie del área de aplicación
6. Uso actual y futuro del suelo.
7. Profundidad de la napa freática.
8. Pendiente (%).
9. Profundidad efectiva del suelo.

En conformidad con la caracterización físico-química del suelo en que se aplicará el lodo, se debe considerar lo siguiente:

1. pH.
2. Conductividad eléctrica.
3. Textura superficial de suelo (% arcilla, % limo, % arena muy fina y % arena gruesa).
4. Materia Orgánica (%).
5. Capacidad de Intercambio Catiónico.
6. Contenido total de metales pesados en el suelo del predio donde se aplicará el lodo.
7. Estructura del suelo.
8. Permeabilidad del suelo.
9. Clase de Drenaje.

En el artículo 21º, se indica que se debe cumplir con los siguientes requisitos sanitarios:

1. Estar ubicada a más de 300 metros de conjunto de viviendas, como villorrios, pueblos y ciudades, y de hospitales, locales de expendio de alimentos, escuelas y otros establecimientos similares. Sin perjuicio de lo anterior, la distancia a viviendas aisladas deberá ser superior a 100 metros.
2. Estar a más de 300 metros de una captación de agua subterránea para agua potable. En caso de acuíferos vulnerables (por ejemplo, napas ubicadas a bajas profundidades, altas permeabilidades, etc) la autoridad sanitaria podrá determinar radios mayores.
3. Estar ubicada fuera de una franja contigua al punto de captación de aguas superficiales para agua potable, de una longitud de 1000 metros aguas arriba del punto de captación y 200 metros aguas abajo, y un ancho de 500 metros.

Finalmente, quedan descartados de una posible incorporación de biosólidos todas aquellas áreas que presenten las siguientes situaciones de riesgo:

- a) Suelos de uso agrícola, forestal o jardines, cuyo pH sea inferior o igual a 5
- b) Suelos de textura arenosa, esto es, suelos cuyo porcentaje de partículas con diámetros entre 0,050 y 2 mm sea igual o superior a 30 y el porcentaje de arcilla o partículas menores a 0,002 mm de diámetro sea inferior a 10
- c) Suelos saturados con agua durante algún período del año, a manera de ejemplo: vegas, bofedales, ñadis
- d) Suelos cuya napa freática se encuentre a menos de 1 metro de profundidad y en aquellos suelos en los cuales se genere un efecto de napa colgante
- e) Áreas cubiertas con nieve
- f) Zonas de protección de fuentes de captación de agua potable, esto es, 300 metros aguas arriba para el caso de aguas superficiales y en un radio de 300 metros tratándose de fuentes de aguas subterráneas
- g) Franjas de protección de ríos y lagos, esto es, a menos de 15 metros de sus riberas
- h) Suelos con riesgo de inundación

2.8 CONSIDERACIONES GENERALES ACERCA DEL SUELO

El suelo considerado por ALLOWAY (2003), como el material biogeoquímico complejo que se forma en la interfase entre la corteza terrestre y la atmósfera, cuyas propiedades físicas, químicas y biológicas son netamente diferentes de las de la roca alterada (meteorizadas) subyacente de la que se ha desarrollado, no ha sido mayormente considerado como recurso ambiental hasta hace relativamente poco tiempo, y mucho tiempo después del aire y del agua, lo que implica que este recurso no ha recibido de la sociedad la atención que merece.

En este sentido, el estado de las propiedades dinámicas del suelo como contenido de materia orgánica, diversidad de organismos, o productos microbianos en un tiempo particular constituyen la salud del suelo BAUTISTA *et al.*, (2004), que dice directa relación con el concepto de calidad del suelo, y cuya finalidad es efectivamente:

- Promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible).
- Atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental)
- Favorecer la salud de las plantas, animales y humanos.

Es en este momento, en que se está tomando real conciencia, de acuerdo con SEOANEZ (1999), de que el suelo es parte importante de los grandes ciclos biogeoquímicos, como el del nitrógeno, lo cual no se constató hasta el descubrimiento de la contaminación de las aguas por los nitratos. En el ciclo del carbono el suelo representa un almacén de CO₂ en forma de carbonato y de materia orgánica, además de una fuente para la mineralización de dicha materia orgánica y para la producción de metano. Además, el suelo es un receptor de contaminantes, tanto de origen industrial como de fuentes difusas, por lo que se hace necesario definir las cargas contaminantes que es capaz de soportar y de asimilar. La acumulación de la carga

contaminante en los suelos supone un riesgo para el futuro inmediato y a largo plazo, ya que el aumento progresivo de dicha carga puede transformarlos en sistemas inestables.

La degradación de los suelos por efectos de la erosión, de la acidificación o del abandono puede precipitar la liberación de contaminantes acumulados.

Estas situaciones exigen una corrección inmediata, sobre todo porque aunque el suelo sea un recurso renovable a largo plazo, su velocidad de formación es mucho menor que la velocidad de degradación a que se ve sometido.

Otro de los elementos que lo caracteriza, es que el suelo produce la mayor parte de los alimentos necesarios, fibras, madera, etc, y sin embargo, en muchas partes del mundo, ha quedado tan dañado por su manejo abusivo y erróneo que nunca más podrá producir bienes (FAO-PNUMA, 1984).

Los efectos son particularmente importantes en las tierras de uso agrícola, donde la redistribución y pérdida del suelo, la degradación de su estructura y el arrastre de materia orgánica y nutrientes, llevan al descenso de la fertilidad. Además, la erosión reduce también la humedad disponible en el suelo acentuando las condiciones de aridez. El efecto resultante es una pérdida de productividad que, en principio, limita las especies que pueden cultivarse y obliga al aumento de fertilizantes a aplicar para mantener los rendimientos de las cosechas y, finalmente, lleva a la degradación y abandono de la tierra (MORGAN, 1997).

2.8.1 CARACTERÍSTICAS DE SUELOS RECEPTORES DE BIOSÓLIDOS

2.8.1.1 Suelos con limitaciones productivas o agrícolas

La productividad de los suelos, se refiere a la propiedad de los suelos para generar biomasa; normalmente asociada a su fertilidad natural, a sus condiciones físico-químicas (textura, pH, materia orgánica, etc), y estructurales (profundidad, pendiente), de acuerdo a lo planteado por CONAMA (2006).

A mayor fertilidad, profundidad, contenido de materia orgánica, a menor pendiente y a textura y pH moderados, mayor productividad. En la Región Metropolitana (R.M) predominan los suelos de capacidad de uso agrícola I, II y III según clasificación CIREN-CORFO (1996).

Considerando estos antecedentes, aquellos suelos que por el contrario, necesiten técnicas y estructuras de conservación adaptadas a sus limitaciones, o que estén ubicados en zonas con pendientes elevadas, lo cual induce a riesgos de erosión, y/o escasa profundidad de los suelos, poseerán limitaciones o impedimentos importantes si que quiere llevar a cabo un desarrollo de su productividad, lo cual es un indicador clave para incorporar lodos, ya que de otra forma no sería necesaria su aplicación benéfica al suelo, como fertilizante y como mejorador de sus propiedades físicas. En este caso, los suelos asociados poseen las clases de capacidad de uso IV.

2.8.1.2 Suelos degradados

Desde el punto de vista agroforestal, la degradación del suelo puede definirse como una disminución de su capacidad actual y potencial para producir alimentos y bienes de origen vegetal y animal, provocada por causas naturales y antrópicas. En términos más específicos, la

degradación se refiere a *alteraciones* desfavorables, ya sean de naturaleza física-química o biológica, de una o más propiedades del suelo. Lamentablemente la mayor parte de las veces, debido a prácticas inadecuadas, la actividad humana acelera las tasas de degradación del suelo.

Esta degradación se puede dividir, en función de su origen, en tres tipos diferentes: degradación física, degradación química, y degradación biológica (MORGAN, 1997).

La degradación física del suelo está constituida por fenómenos como la compactación, la erosión, la alteración de las reservas y la disponibilidad de agua, originadas básicamente por causas culturales y de desarrollo, por deforestación y por causas naturales.

La degradación química del suelo consiste fundamentalmente en los fenómenos de salinización debidos al riego con aguas de baja calidad, en el empobrecimiento o abundancia excesiva de nutrientes y de materia orgánica, en la acidificación del suelo y en el exceso de productos tóxicos.

La degradación biológica del suelo se debe sobre todo a fenómenos de pérdida de biodiversidad y al empobrecimiento de microflora y microfauna, lo que contribuye además, a fomentar procesos de desertificación.

2.8.1.2.1 La Erosión del suelo

RAMOS (2001), indica que la erosión es el desprendimiento y remoción de partículas de suelo por acción del agua y del viento. El agua es sin embargo, el agente más importante. Las condiciones meteorológicas y el clima, preparan el material parental para la erosión y la lluvia actúa como el mayor agente para la erosión. La cobertura vegetal, el tipo y características del suelo, la geomorfología, la geología y los usos del suelo, establecen el grado de propensión del suelo a ser afectado por los agentes generadores de erosión.

Este proceso es probablemente la forma más completa de degradación del suelo y la más común en Chile y a nivel mundial, según CONAMA (1994), y están asociados a importantes alteraciones físicas, químicas y biológicas de las propiedades del suelo; entre los que destacan:

- Disminución en volumen y profundidad
- Reducción de la capacidad de retención de agua
- Pérdida de materia orgánica
- Declinación /agotamiento de la fertilidad
- Baja en número, diversidad y actividad de la flora y fauna del suelo
- Cambio en la textura del suelo superficial

Sin embargo, también debe considerarse como una de las causas del desencadenamiento de procesos erosivos, la gestión inadecuada del hombre para utilizar y proteger los recursos naturales renovables, lo que ha alterado el equilibrio ecológico del sistema suelo-agua-flora-fauna de gran parte de los ecosistemas frágiles del país. Es así, como muchas de las prácticas convencionales actualmente en uso para la explotación del recurso suelo con fines agrícolas, ganaderos e incluso forestales, contribuyen en gran medida a la aceleración de los procesos erosivos naturales.

A) Factores que inciden en la Erosionabilidad del suelo

La *Erosionabilidad*, según LIENLAF (2003), está regida por las propiedades físicas y químicas, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica, tipo de arcilla y constituyentes químicos, movimientos del agua y otros, sin considerar el factor antrópico ni la cobertura vegetal.

Otra definición asociada, es la aportada por BRIGNARDELLO Y GEORGUDIS (1997), donde se señala que es el estado intrínseco del regolito frente a los agentes erosivos, y esta depende de la susceptibilidad de los factores internos del sistema suelo a ser deteriorado en relación a la resistencia a ser degradado, otorgada por los elementos externos.

A continuación se indican las principales propiedades del suelo que inciden en la *erosionabilidad* de este recurso y en su potencial para recibir biosólidos:

a1) Textura superficial de suelos

La textura, se entiende según VERA (1998), como la composición elemental de una muestra de suelo, definida por las proporciones relativas de sus separados individuales a base de la masa.

Así, se han definido diversas clases texturales, que con la excepción de la clase franca, identifican al o los separados texturales de arena, limo o arcilla, que dominan en las propiedades del suelo.

Uno de los parámetros que debe tomarse en cuenta, dicen relación con el porcentaje de arena que presenten los suelos, porque se excluye de la posible aplicación de biosólidos todos aquellos, que posean una textura del tipo arenosa o areno francosa, que son las que presentan un porcentaje de arena superior al 70%, de acuerdo a CONAMA (2006). Esto se debe a que por su alta permeabilidad y porosidad, se facilita el transporte de contaminantes solubles desde la superficie al interior del suelo, por efecto de un drenaje interno excesivo, viéndose afectadas sus propiedades, y generando contaminación a las napas freáticas.

a2) Estructura del suelo

La estructura del suelo, según LUZIO y CASANOVA (2006), se relaciona con la organización o agregación natural de sus separados individuales, en unidades conocidas como partículas secundarias o agregados (peds).

De acuerdo a esto, la agregación de partículas individuales de suelo implica la formación de unidades mayores, tales como estructuras gruesas que favorecerían el drenaje interno excesivo, y que es donde no se puede disponer biosólidos, al igual que en el caso de algunos suelos con estructuras finas.

Por el contrario, las clases de estructura medias y finas, si pueden acoger biosólidos ya que las probabilidades de contaminación de napas se reducen, al igual que para el caso de los horizontes del suelo, que se mantendrían, en cierta medida, ajenos a la acumulación de líquidos densos.

a3) pH del Suelo

La medición del pH del suelo, define la actividad química y biológica de éste, según lo señala BUOL (1991) y BAUTISTA (2004). Este parámetro interviene en el crecimiento de las plantas y

en el comportamiento de los contaminantes, por lo cual es una variable definida por la normativa, como en *situación extrema de riesgo*.

El fundamento de esto, radica en que aquellos suelos con condiciones de pH ácido o con valores inferiores a 5, tienen mayores probabilidades de generar mejores condiciones para la mantención de contaminantes y metales pesados, ya que como lo plantea ALLOWAY (2003), la movilidad y biodisponibilidad de la mayoría de los metales pesados bivalentes es mayor bajo condiciones ácidas.

Por su parte, los suelos básicos si poseen las potencialidades para incorporar biosólidos, y corresponden a aquellos suelos con pH superior a 5.

a4) Profundidad Efectiva del Suelo

El perfil de suelo como tal, es una sección vertical desde la superficie hasta la roca alterada, que está compuesto por diversos horizontes. Cada uno de estos horizontes, posee una dinámica compleja que se expresa en la generación de diversos procesos pedogénicos, desarrollados en función de ciertas profundidades, de acuerdo con ALLOWAY (2003).

Generalmente, las condiciones de estabilidad del perfil no se verán alteradas por factores como la pendiente del terreno, por lo cual hay mayor conveniencia para el desarrollo de cultivos. En este sentido, el reglamento avala el hecho de que a menor pendiente, mayor será la profundidad efectiva del suelo, y es por esto que se pueden aplicar biosólidos en aquellos suelos con rangos que varíen entre 20 a 70 cm de profundidad, donde el comportamiento de los contaminantes al interior del perfil se verán sometidos a procesos naturales de lixiviado, eluviación, humificación, entre otros, sin afectar en gran medida ni al suelo, ni a los cultivos, todo esto siempre y cuando los contenidos de metales no excedan lo planteado por la ley.

Por el contrario, los suelos muy delgados (<20 cm), ubicados por lo general en zonas con pendientes más abruptas, tendrán menor potencia y un desarrollo incipiente, por lo cual hay un riesgo importante de acumulación de metales y contaminantes orgánicos que se mantendrían en superficie.

a5) Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C)

La Capacidad de Intercambio Catiónico, dice relación con la aptitud que poseen los coloides del suelo para adsorber nutrientes. Esta capacidad de la fracción coloidal de los suelos presenta una gran serie de valores, pues el humus y varios minerales pueden estar presentes en cantidades variables.

BUCKMAN Y BRADY (1993), indican la existencia de complementariedad o una correlación grosera entre la textura y la capacidad de cambio, aumentando ésta para los suelos de textura fina. Las arenas y margas arenosas son pobres en arcilla coloidal y casi siempre deficientes también en humus. Los suelos pesados, en contraste marcado, siempre llevan más arcilla y, en general también, más materia orgánica, de aquí que sus capacidades de adsorción catiónica sean mayores, por lo general.

En el Reglamento de Lodos No Peligrosos (CONAMA, 2000), si bien, no se señalan rangos de aptitud para aplicar biosólidos, si se estipula que se debe tener presente dentro de la caracterización físico-química de los suelos en que se aplicará el lodo, la capacidad de intercambio catiónico, que en función de ciertas características se puede inferir su

comportamiento, ya que como lo señala RUGIERO (2006), los suelos que poseen una CIC elevada (11 a 50 cmol+kg-1) poseen altos contenidos de arcilla, mayor capacidad de retención de nutrientes, alta capacidad de retener agua, conducta física asociada a altos contenidos de arcilla y en algunos casos requieren de cal para corregir la acidez. En estas condiciones hay mayores condicionantes para incorporar biosólidos.

En cambio, en suelos con una CIC baja (1 a 10 cmol+kg-1), se aprecia alto contenido de arena, mayor probabilidad de pérdida de nitrógeno y potasio por lixiviación, baja capacidad de retener agua, conducta física asociada a altos contenidos de arena y requieren menos cal para corregir la acidez, por lo que hay mayores restricciones al manejo con lodos derivados de PTAS.

a6) Materia Orgánica (M.O)

La capa superficial de un perfil de suelo, es la que contiene mayores porcentajes de materia orgánica, lo que se debe principalmente a la acumulación progresiva de elementos vegetales que se descomponen, tales como plantas parcialmente destruidas y parcialmente resintetizadas, y a residuos de animales. Esto incide en el oscurecimiento de la materia orgánica, ya que está en un activo estado de desintegración, y sujeto al ataque por parte de los microorganismos del suelo.

CASANOVA *et al.*, (2004), indica que la materia orgánica, corresponde, al igual que el pH, a una característica química del suelo, y está compuesta por todos los materiales orgánicos muertos, de origen animal o vegetal, junto con los productos orgánicos producidos en su transformación.

Si bien, este constituyente es una variable con gran peso específico, debido a que influye directamente en el aporte de nutrientes al suelo, incidiendo en la mayor fertilidad y productividad de éste, es en general restringida su cantidad, tal como lo indican BUCKMAN Y BRADY (1993), señalando que el contenido de materia orgánica del suelo es pequeño: solo existe alrededor del 3 al 5% en peso, en la capa superficial de un suelo típico. Pero su influencia sobre las propiedades del suelo y el crecimiento de las plantas, es, no obstante, mucho mayor que lo que pudiera hacer creer este pequeño contenido.

En este sentido, este parámetro es fundamental para la posible aplicación de biosólidos, puesto que si un suelo presenta niveles adecuados de materia orgánica, no se justifica el empleo de este método. Esto sólo es admisible en suelos que requieran el mejoramiento de sus características físico-químicas, lo cual es razonable en suelos que presenten limitaciones productivas referidas a su aptitud frutal natural, y en suelos degradados.

Por ende, en el caso de suelos que posean contenido de materia orgánica que varíe de *muy deficiente* (0-1.75%), a *normal* (4.1-5.0%), sí puede incorporarse biosólidos, lo cual permite contribuir con un mejoramiento de suelos con altos índices de degradación, entre otros.

a7) Clases de Drenaje y Permeabilidad

Las clases de drenaje, son un factor fundamental al momento de establecer el traspaso el agua al interior del perfil de suelos, ya que se pueden inferir otras características tales como la permeabilidad de los suelos, y la conductividad hidráulica.

Considerando lo definido por CASANOVA (2004), se indican a continuación, las principales clases de drenaje:

1. **Muy pobremente drenado:** suelos saturados hasta la superficie la mayor parte del año y se muestran lo suficientemente saturados para impedir el crecimiento de los cultivos más importantes (excepto el arroz) a menos que se drenen artificialmente. Las condiciones de drenaje se deben a un nivel freático alto, estratas impermeables u otras siendo la topografía plana o deprimida y presentándose frecuentemente inundada.
2. **Pobremente drenado:** suelos saturados hasta cerca de la superficie durante una parte considerable del año, de modo que los cultivos no pueden crecer en condiciones naturales. Se originan por una zona saturada, una zona de bajo movimiento del agua en profundidad, aguas que afloran o de una combinación de ellas. El drenaje artificial es necesario para efectuar cultivos.
3. **Imperfectamente drenado:** suelos saturados lo suficientemente cerca de la superficie o durante tanto tiempo que las operaciones de siembra y cosecha o el crecimiento de los cultivos se restringen notoriamente a menos que se establezca un sistema de drenaje artificial. Estos suelos tienen una estrata en que el movimiento del agua en profundidad es bajo, muestran estado saturado alto en el perfil, incrementos de agua por afloramiento o una combinación de estas condiciones.
4. **Moderadamente bien drenado:** suelos saturados lo suficientemente cerca de la superficie o durante tanto tiempo que las operaciones de siembra o cosecha o los rendimientos de algunos cultivos se ven afectados adversamente a menos que se establezca un sistema de drenaje artificial. A menudo tienen una estrata y el movimiento de agua en profundidad es lento, muestra estado saturado relativamente alto en el perfil, incrementos de agua por afloramiento o alguna combinación de éstas.
5. **Bien drenado:** suelos con una capacidad de retención intermedia y óptimas de agua pero no están lo suficientemente saturados cerca de la superficie o por periodos largos durante la estación de crecimiento, para afectar adversamente los rendimientos.
6. **Excesivamente drenado:** suelos con baja capacidad de retención de agua y de movimiento en profundidad rápido o muy rápido. No adaptados para la producción de cultivos a menos que se rieguen.

Especificando lo planteado por la normativa, para suelos con limitaciones productivas y degradados, puede aplicarse biosólidos en suelos que posean clases de drenaje del tipo *imperfectamente drenados*, *moderadamente drenados*, y *bien drenados*, cuya conductividad hidráulica varía entre 0.0036 cm/h, a < 36 cm/h.

A diferencia de suelos con condiciones extremas de infiltración, tales como los *muy pobremente drenados*, donde la restricción está asociada a la presencia de una napa freática superficial y permeabilidad muy baja, que implica la mantención de contaminantes en la capa visible del suelo; y también aquellos suelos que presentan permeabilidad muy alta relacionado con una clase de drenaje excesiva.

A8) Capacidad de Uso de Suelo

Las Clases de Aptitud Frutal Natural, incluidas dentro del Reglamento de Lodos No Peligrosos, han sido consideradas para este trabajo, por su similitud en términos de sus características y distinciones, con la Capacidad de Uso de Suelo.

En este documento, se indica que no se pueden incorporar lodos a suelos que presenten las clases A, B, y C de aptitud frutal natural, que corresponden a las clases de capacidad de uso

con menores limitaciones agrícolas (I, II y III), ya que de acuerdo con CONAMA (2002), estos suelos son profundos, estructurados, de buena fertilidad natural y de baja pendiente. Por estas características son muy buenos sostenedores de vida animal y vegetal, así como participantes activos en el ciclo hidrológico (buen drenaje), y funciones ecosistémicas que hoy se aprovechan para la producción alimentaria.

Por el contrario, en los suelos con capacidad de uso IV, VI, VII y VIII, si pueden aplicarse lodos, ya que poseen limitaciones naturales, y son susceptibles a ser corregidas sus restricciones, por medio de este procedimiento biológico.

b) Factores que inciden en la Erosividad y Erodabilidad del terreno

Tal como lo plantea FERRANDO (1991), la *potencia erosiva* o *erosividad* responde a la energía erosiva de los factores externos. Corresponde a los eventos detonantes y al potencial de energía destructiva externa o energía de posición (pendiente, intensidad de la precipitación, etc). Así, las pérdidas de suelo están estrechamente ligadas con la lluvia y su intensidad, en parte por el poder de desprendimiento del impacto de las gotas al golpear el suelo y, en parte por la contribución de la lluvia a la escorrentía. Esta acentúa particularmente a la erosión por flujo superficial y en regueras, fenómenos para los que la intensidad de la precipitación se considera generalmente, la característica más importante.

La erodabilidad superficial depende de la resistencia a la degradación, la disolución de los materiales y su posterior evacuación. Es decir está en función del estado de los materiales y su grado de cohesión. Además, existe una relación entre permeabilidad del terreno, espesor de los materiales (distancia entre superficie y sustrato), rugosidad del sustrato y cobertura vegetal (FERRANDO, 1991).

Según lo plantea QUINTANILLA (1995), la fragilidad de los ecosistemas naturales periféricos de la ciudad de Santiago ha sido producto principalmente del desequilibrio entre las variables geomorfológicas, climáticas y vegetacionales y el efecto de la actividad antrópica sobre ellas. La vulnerabilidad de la cubierta vegetal y de los componentes del suelo ante las acciones humanas fundamentalmente determinan el grado de fragilidad de los sistemas naturales, y que son los que en definitiva inciden en la erosividad del suelo.

b1) Clima

Considerando al clima como un factor que influye la formación de suelos, es importante advertir los efectos generados por el agua, ya que disuelve los materiales solubles y propicia el crecimiento de plantas y otros organismos que contribuyen con materias orgánicas al suelo; transporta materiales de unas partes del suelo a otras, rompe físicamente los materiales al congelarse y desempeña algunas otras funciones importantes.

La temperatura, como componente del clima, se ha considerado como un factor independiente de la formación de suelos (JENNY, 1941). La temperatura influye en muchas formas sobre las reacciones implícitas en los procesos de formación de suelos. Es el componente principal en el cálculo de la evapotranspiración potencial y, por ende, tiene un control apreciable sobre la cantidad de precipitaciones pluviales reales.

Sin embargo, los factores climáticos también tienen relevancia en la formación y degradación de los suelos; así por ejemplo, los cambios en la temperatura y las lluvias contribuyen a su formación al favorecer la meteorización del material parental. Resulta necesario aseverar que el

suelo corresponde a un estado dinámico, derivado del operar de múltiples factores interactuantes, por tanto, también se le asigna un peso importante a la caracterización del clima, ya que hay prohibición de aplicar lodos en áreas cuyos suelos presenten riesgos de precipitaciones consideradas como altas y muy altas. En este sentido MORGAN (1997), expresa que las pérdidas de suelo están estrechamente relacionadas con la lluvia, en parte por el poder del desprendimiento del impacto de las gotas al golpear el suelo y, en parte, por la contribución de la lluvia a la escorrentía.

b2) Pendiente

Es otro de los factores que influyen en el desencadenamiento de procesos erosivos, ya que se espera que aumente la erosión al aumentar la inclinación y la longitud de la pendiente, como resultado del incremento de la velocidad y volumen de la escorrentía superficial, lo cual es avalado por SEOANEZ (1999), que señala que si el relieve es accidentado, el proceso se intensifica y se provoca una erosión de escorrentía superficial acentuada.

Por el contrario, en una superficie plana las gotas de lluvia salpican las partículas del suelo aleatoriamente en todas direcciones, sin verse accionadas por efecto de la inclinación del relieve.

De acuerdo a la normativa, se puede aplicar lodos en suelos con severas limitaciones agrícolas, cuyos rangos varíen entre un 3 a 15%; los cuales corresponden a suelos planos o que se encuentran débilmente inclinados, en donde la denudación es restringida y se forman suelos profundos, lo que permite el desarrollo de cultivo sin dificultades.

Para el caso de suelos degradados, los rangos de pendientes tolerables varían entre un 15% a 60%. A estas condiciones de inclinación del terreno, se asocia el inicio de diversos tipos de erosión difusa, lineal, y fuertes procesos denudacionales, donde los cultivos presentan restricciones naturales que impiden su desarrollo.

b3) Cubierta vegetal

Con respecto a la cubierta vegetal, que es otro de los factores de formación de suelos, es importante manifestar que si bien en la normativa no se indica algún parámetro específico con respecto a esta variable, si es relevante señalar que se debe tener en cuenta las áreas cubiertas por vegetación ya que el porcentaje de cubrimiento vegetal por unidad de superficie (densidad vegetal), es un criterio que tiene directa relación con el rol protector que ejerce la vegetación sobre el suelo, siendo estabilizadora de pendientes, retardadora de erosión influye en la cantidad y calidad del agua, mantiene microclimas locales, entre otros (GOMEZ OREA, 1996).

En consecuencia, MORGAN (1997) indica que el efecto de la cobertura vegetal actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Los componentes aéreos como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, de modo que su efecto es menor que si actuaran directamente sobre el suelo.

b4) Prácticas de Conservación

Puesto, que la alteración de las condiciones originales en topografía, así como el uso de combinaciones espaciales de los cultivos pueden variar en gran medida las condiciones de erosión, se hizo necesario considerar cualquiera de las modificaciones producidas por el hombre. En este sentido el *uso de suelo* es la variable considerada para definir los usos actuales y futuros tanto de la comuna como de las áreas potenciales de recepción de biosólidos.

2.9 CONTENIDOS DE METALES PESADOS

2.9.1 Metales Pesados en Suelos

Es sumamente importante considerar este aspecto, que dice relación con el contenido de metales pesados en los suelos, ya que se puede generar contaminación por la presencia de estos elementos.

Algunos de estos, son esenciales para la vida de plantas y/o animales, y son denominados *micronutrientes* (Cu, Zn, Cr y Ni). Habitualmente están presentes en concentraciones muy bajas en la solución del suelo por lo que también se les denomina oligoelementos.

Cuando sobrepasan ciertos límites de concentración, a pesar de su esenciabilidad, pueden constituir un problema para el buen funcionamiento del ecosistema, lo cual se traduce en que la lixiviación de algunos de estos elementos puede repercutir en problemas de contaminación de agua superficial, subterránea, bioacumulación en los cultivos, o animales. Las vías de exposición de animales y del ser humano son diversos: por contacto directo, ingestión (alimentos agua potable), inhalación de partículas entre otros, de acuerdo con KNIGHT PIESOLD S.A (1998).

El Reglamento de Lodos de la CONAMA (2006), considera a 6 elementos como aquellos más persistentes en el medio ambiente (Tabla 5), y con mayores implicancias para la salud, debido a su alta toxicidad y contaminación:

Tabla 5: Consecuencias de la presencia de metales pesados

METALES PESADOS	CARACTERISTICAS	IMPLICANCIAS EN SALUD
Arsénico (As)	Asociado a operaciones mineras o metalúrgicas, y actividades agrícolas (pesticidas, y veneno)	Tóxico: se absorbe fácilmente por la piel, pulmones y aparato gastrointestinal.
Cadmio (Cd)	Relacionado con procesos industriales y metalizado electrolítico	Altamente tóxico al ingerirlo o inhalarlo: Disfunción renal, hipertensión, arteriosclerosis.
Cobre (Cu)	Asociado a desechos minerales en producción de cobre	Daño al hígado
Mercurio (Hg)	Presencia de actividad industrial, y producción electrolítica	Bioacumulación en cadena alimenticia como mariscos y pescados
Níquel (Ni)	Procesos de metalizado electrolítico, lixiviación de polvo o escoria de hornos eléctricos	Altamente tóxico
Plomo (Pb)	Contaminación con desechos mineros, metalúrgicos o venenos industriales	Tóxico: Produce anemia, disfunción neurológica y deterioro renal
Zinc (Zn)	Descarga de RILes, desechos de industria minera, metalúrgica o galvanoplastia	Altamente tóxico

Fuente: Elaborado en base a KNIGHT Y PIESOLD S.A (1998)

Dentro de los contenidos máximos de metales pesados que deben poseer los suelos antes de llevar a cabo la aplicación de biosólidos, se establece en función de la siguiente tabla:

Tabla 6: Contenidos máximos de metales en suelos antes de una aplicación de lodos

Metal	Contenido total en mg/kg de suelo en base seca		
	Zona Centro-Norte		Zona Sur
	pH >6,5	pH <6,5	Todo pH
Arsénico	20	12,5	10
Cadmio	2	1,25	2
Cobre	150	100	75
Molibdeno	2	3	3
Plomo	75	50	50
Zinc	175	120	175

Fuente: Reglamento de Lodos No Peligrosos (CONAMA, 2006)

Tomando en consideración que la comuna de Melipilla, está inserta dentro de la Región Metropolitana de Santiago, se utilizó el criterio correspondiente al de la zona centro-norte, en donde se establecieron diferencias en función del contenido de pH existente en los suelos tomando como base el pH 6.5, y se asoció a los contenidos máximos de metales pesados, en función principalmente de arsénico, cadmio, cobre, molibdeno, plomo y zinc.

2.10 CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LODOS SEGÚN LA NORMATIVA

También se debe considerar como otro factor influyente para la disposición de biosólidos, lo que se refiere a los criterios para la aplicación de lodos en agricultura, con lo cual se deben tener muy presentes la *forma, tasa y oportunidad de los lodos, que deben orientarse por criterios sanitarios, agronómicos (contenido de nutrientes requeridos por los cultivos, principalmente medidos como nitrógeno, fósforo y potasio disponibles) y por el contenido total de metales pesados, tanto en los lodos como en el suelo receptor*, según lo que se señala en el artículo 19 del Anteproyecto de ley (CONAMA, 2000).

En la Tabla 7, se indican las tasas máximas de aplicación de lodos, según los distintos tipos de usos de suelo:

Tabla 7: Tasas máximas de lodos según tipo de uso de suelo

Tipos de usos	Tasa máxima Ton/há.año (base seca)
Suelos productivos que presentan severas limitaciones para su aptitud frutal natural y/o en suelos forestales	30
Suelos degradados	50

Fuente: Reglamento de Lodos No Peligrosos (CONAMA, 2006)

También, los lodos clase B se aplicarán según tipos de cultivo de acuerdo a lo siguiente:

- a) En 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 deberán aplicarse **con a lo menos 12 meses** de antelación a la siembra.
- b) No se podrá aplicar lodos en cultivos hortícolas ni frutícolas menores durante el período de crecimiento.
- c) En praderas y cultivos forrajeros, podrá procederse al pastoreo o a la cosecha **sólo transcurrido 30 días** desde la última aplicación.
- d) En suelos de uso forestal, la aplicación de lodos podrá efectuarse solo si se cuenta con un **control de acceso durante los 30 días posteriores de la aplicación**.

Finalmente, según la normativa, antes de la primera aplicación de lodos, deberán efectuarse análisis de los suelos con respecto de: pH, contenido de nitrógeno, fósforo y potasio disponible y contenido total de los metales, y los análisis de suelos deberán ser repetidos en un intervalo de a lo menos dos años. Sin perjuicio de lo anterior, la autoridad competente podrá determinar que se repitan los análisis de suelo en intervalos menores.

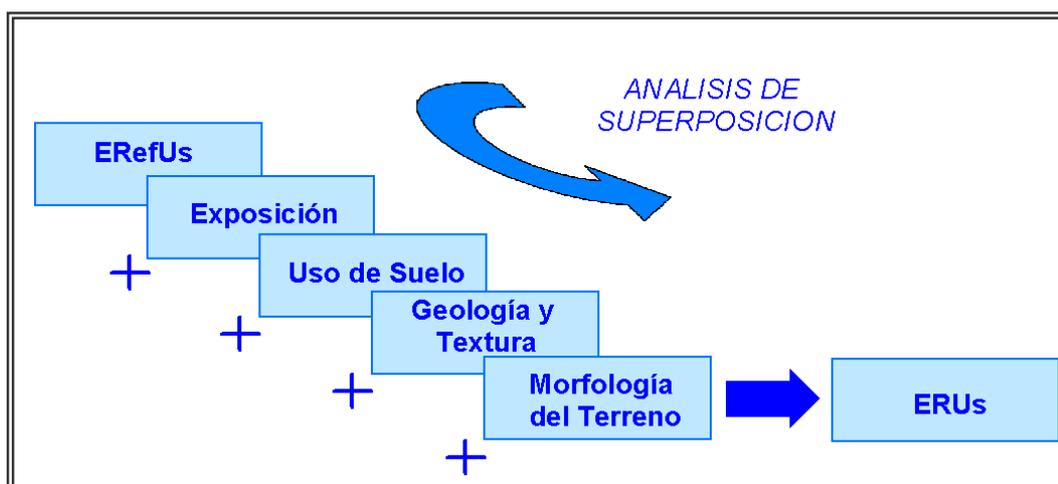
CAPITULO III: METODOLOGIA

En función de los objetivos mencionados anteriormente, se trabajó con los siguientes procedimientos:

En primer lugar, cabe señalar, que la metodología central de esta investigación se apoyó en la definición de las *Unidades Espaciales de Respuesta a la Aplicación de Biosólidos* (BARU's) para la Región Metropolitana, y más específicamente para el área de estudio considerada que corresponde a la comuna de Melipilla.

Estas unidades espaciales, fueron adaptadas de las ERU's (Unidades de Respuesta a la Erosión) de MÄRKER *et al.*, (2001), que integran diferentes escalas temporo-espaciales de los procesos de erosión, tal como se señala en la siguiente figura:

Figura 12: Superposición y parámetros utilizados para la determinación de ERUs



Fuente: MÄRKER *et al.*, (2001)

En este sentido, se conformaron unidades homogéneas a partir de la superposición cartográfica de las variables del medio físico natural, tales como la geología, la geomorfología, pendiente y exposición, para luego enfatizar en la componente del suelo, uso de suelo, cobertura vegetal, y variables socioeconómicas, incluidas la localización de instalaciones vulnerables asociadas al medio urbano propias de la comuna en estudio.

De manera más detallada, se evaluaron y caracterizaron las componentes geográfico físicas de la comuna de Melipilla, con el fin de investigar y comprender los procesos que inciden en la formación de los suelos tales como el clima, la naturaleza del material originario, el paisaje, la vegetación y organismos del suelo entre otros, y que tienen relevancia en la aparición de procesos erosivos.

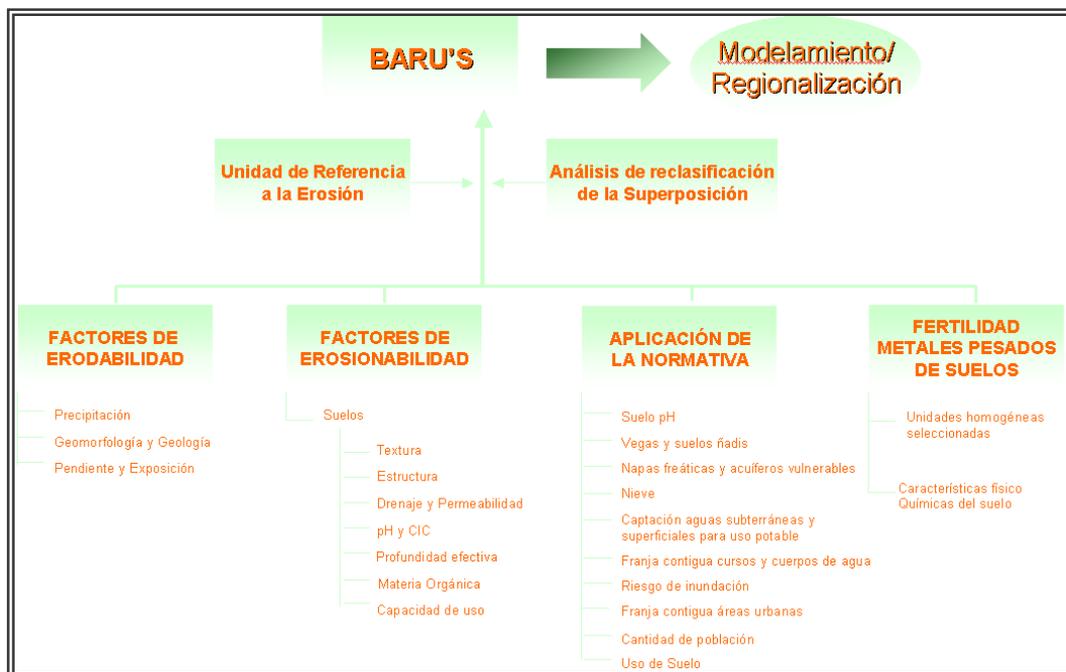
En segundo lugar, se llevó a cabo la aplicación de la normativa o el Reglamento de Lodos No Peligrosos (CONAMA, 2006), excluyendo las áreas que por condiciones de vulnerabilidad o riesgo físico pudieran afectar a la población que habite en las zonas aledañas. Con esta

información generada se procedió a contrastar la información obtenida con las variables de Uso de Suelo y Población a nivel distrital.

Posteriormente, ya identificadas las unidades espaciales potenciales de aplicación de biosólidos, se evaluó y caracterizó el contenido de metales pesados de los suelos, siendo esta otra de las limitantes para incorporar lodos residuales.

A continuación (Fig. 13) se señala un esquema operativo de la metodología (BARU's):

Figura 13: Metodología BARU's



Fuente: Adaptado de MÄRKER (2001) en CASTRO *et al.*, (2007)

De acuerdo con el segundo aspecto señalado, y que es para evaluar las características que deben poseer aquellos suelos potenciales para la recepción de lodos, el Reglamento de Lodos No Peligrosos (CONAMA, 2006), es el documento legal donde se indican los parámetros y características distintivas que deben poseer los suelos en Chile, en función de componentes tales como, la pendiente, los porcentajes de arena, estructura, la permeabilidad (conductividad hidráulica saturada del suelo), el drenaje interno, la profundidad efectiva, pH, y contenido de materia orgánica, lo cual debe ser aplicable para suelos que presenten limitaciones productivas, y también para suelos degradados, como se destaca en las siguientes tablas:

Tabla 8: Parámetros establecidos por normativa para suelos degradados

SUELOS	DEGRADADOS	
Unidades	Exclusión	Aplicación
Capacidad de Uso	I-II-III-VIII	VI-VII
Textura superficial	Arenoso a areno francoso	Franco a arcilloso
pH	< 5	> 5
Clase de drenaje	1-2-6	3-4-5
Permeabilidad (Conductividad hidráulica)	>36 (cm/h)	0.036 - < 36 (cm/h)
Profundidad	Muy delgado	Delgado a profundo (>20 cm)
Estructura superficial	****	Granular y laminar media gruesa
		Columnar y prismática media
		Bloq. angulares y subangulares medios
Pendiente	Montañas (>60%)	Plano a Cerros (<60%)

Fuente: CONAMA (2006)

Tabla 9: Parámetros establecidos por normativa para suelos con limitaciones productivas

SUELOS	SEVERAS LIMITACIONES PRODUCTIVAS	
Unidades	Exclusión	Aplicación
Capacidad de Uso	I-II-III-VIII	IV
Textura superficial	Arenoso a areno francoso	Franco a arcilloso
pH	< 5	> 5
Clase de drenaje	1-2-6	3-4-5
Permeabilidad (Conductividad hidráulica)	> 3.6	0.00036 - <3.6
Profundidad	****	Delgado a ligeramente profundo
Estructura superficial		Todas finas y muy finas
		Granular y laminar gruesa media
		Bloq. angulares y subangulares medios
Pendiente	>15%	3 a 15%

Fuente: CONAMA (2006)

A continuación, se analiza cada una de las componentes del sistema natural señalado con anterioridad, enfatizando en las características más relevantes de las variables, junto con las técnicas más apropiadas para desarrollar los objetivos anteriormente planteados.

3.1 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS (PRECIPITACIÓN)

De acuerdo a la información del Atlas Agroclimático de Chile: Regiones IV a IX (CIREN-CORFO, 1990), se dieron a conocer las principales características generales del área de estudio, en función de los denominados distritos agroclimáticos definidos para el subsector perteneciente al *Valle Central*, en donde se especificaron los datos y valores asociados a

temperaturas (máximas y mínimas), heladas, incidencia de la radicación, evapotranspiración, etc.

- a) **Método de Thiessen**, fue utilizado para calcular la validez areal de la precipitación de una cuenca, distrito, o tal como es el caso de este estudio, de la comuna de Melipilla, y que consistió en la interpolación de datos de distintas estaciones meteorológicas ubicadas al interior de cada límite administrativo.

El método atribuye a cada pluviómetro o estación pluviométrica, una superficie proporcional o de influencia, en donde se unieron con líneas rectas todas las estaciones insertas al interior de la comuna, y con las cuales se generaron figuras geométricas de tipo triangular en su punto central, en función de mediatrices.

Una vez obtenidos todos los polígonos, se procedió a calcular el área de cada uno de ellos. De cada polígono determinado, se multiplicó su superficie (km²) por el módulo pluviométrico (mm), que posteriormente se sumó, generándose finalmente un promedio general.

Para esto se aplicó la siguiente fórmula:

$$\text{Polígonos de Thiessen} = \frac{\sum \text{Monto Total de Pp (1) x Área (2)}}{\text{Superficie total (3)}}$$

- 1: Precipitaciones anuales (mm) por estación pluviométrica
 2: Área de influencia del polígono (Km²) de la estación pluviométrica
 3: Sumatoria de las áreas de todos los polígonos

- b) **Índice de Agresividad climática o Índice Modificado de Fournier** (FOURNIER, 1960), diseñado para determinar la degradación específica de las cuencas hidrográficas. Este consta de la relación p^2/P , donde p es la precipitación del mes más lluvioso del año, en mm, y P la precipitación anual.

La fórmula del Índice y los rangos establecidos por CORINE-CEC (1992) de acuerdo a la susceptibilidad erosiva del terreno, son los siguientes:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2 (\text{Precipitación media mensual})}{P_t (\text{Precipitación media anual})}$$

Tabla 10: Rangos establecidos para el Índice Modificado de Fournier

IMF (mm)	NIVELES DE ERODABILIDAD
< 60	Muy bajo
60-90	Bajo
90-120	Moderado
120-160	Alto
>160	Muy Alto

Fuente: CORINE-CEC (1992)

3.2 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS Y TOPOGRÁFICAS

3.2.1 Geomorfología

- Se trabajó por medio de la fotointerpretación de imágenes, de acuerdo al vuelo CONAF-CONAMA (2001), donde se identificaron las principales unidades y geoformas asociadas al área de estudio.
- Según nomenclatura de ARAYA-VERGARA (1985), y SOTO *et al.*, (2006) se definió la taxonomía para cada sistema, caracterizándolos de acuerdo a:
 - **Sistema de vertientes**, indicando su influencia estructural y procesos morfodinámicos.
 - **Formas de contacto**: Formas de acumulación de depósitos aluviales y coluviales que corresponden a formas que relacionan la evolución de conos a glacis con sus respectivas características asociadas.
 - **Formas fluviales**: Formas polifásicas y terrazas.

3.2.2 Topografía

- Se utilizaron los rangos de pendiente, definidos por ARAYA-VERGARA y BORGEL (1972).

Tabla 11: Rangos de Pendiente en grados

Pendiente (°)	RANGO	DENOMINACION	JUSTIFICACIÓN GEOMORFOLOGICA	NIVELES DE ERODABILIDAD
0-3	1	Plano	Erosión casi nula, sin problemas para cultivos	Muy bajo
3-8	2	Moderadamente inclinado	Empieza erosión laminar. Levigación en forma de sheet wash y rill wash. Posibilidad de cultivos.	Bajo
8-15	3	Inclinado	Erosión lineal frecuente. Surcos y cárcavas, posibles movimientos en masa. Se recomienda cultivos en terraza.	Moderado
15-25	4	Fuertemente inclinado	Fuerte erosión laminar, lineal y deslizamientos en masa. Solo cultivos en terraza.	Alto
25-45	5	Moderadamente escarpado a escarpado	Afloramiento rocoso. Fuerte erosión. Dominio de procesos de gravedad. Solo la forestación es posible.	Muy Alto

Fuente: Elaboración propia en base a ARAYA-VERGARA y BORGEL (1972)

- Se llevó a cabo la elaboración de un Modelo Digital de Terreno (DTM) en base a Cartas Topográficas de Melipilla, y a la utilización del software ARC GIS 9.0.
- Con respecto a las pendientes (en porcentajes), la información fue obtenida a partir de MARKER (2007), y la perteneciente al Estudio Agrológico de la Región Metropolitana (CIREN-CORFO, 1996).

- Se utilizaron cartas topográficas de la comuna de Melipilla a escala 1:50.000 del INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR, para la elaboración de cartografía asociada a pendiente y exposición, en función de información digital de MÄRKER (2006).

3.2.3 Exposición a la Precipitación

Tabla 12: Rangos de Exposición

EXPOSICIÓN	TIPO DE EXPOSICIÓN	NIVELES DE ERODABILIDAD
Sur (135° - 225°)	Sotavento	Bajo
Este (45° - 135°)	Sotavento	Bajo
Cenital (Plano)	Cenital	Medio
Norte (315° - 45°)	Barlovento	Alto
Oeste (225° - 315°)	Barlovento	Alto

Fuente: FERNÁNDEZ (2006)

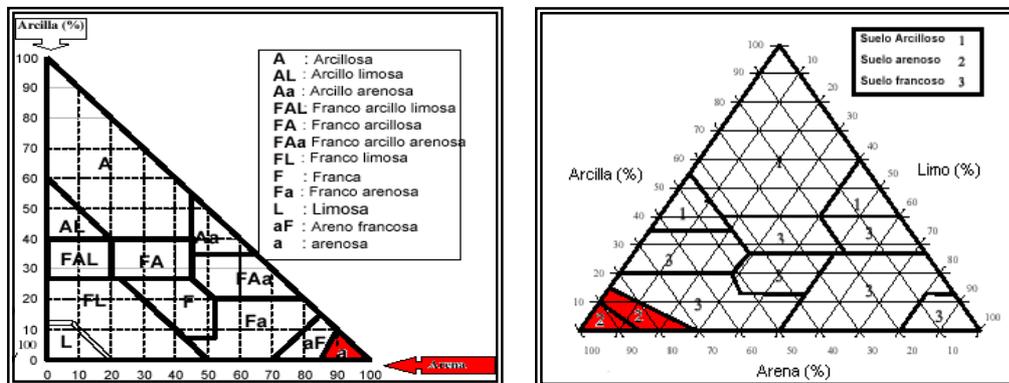
3.2.4 Geología

- Se basó principalmente en el Mapa Geológico del Área San Antonio-Melipilla de WALL, GANA, y GUTIERREZ, (1996), que fue digitalizado previamente, y obtenido en formato shapes para ser trabajado en Arc View 3.2.

3.3 SERIES DE SUELO

- **Textura superficial de suelos**, la determinación de esta composición granulométrica se basó en la proporción de partículas de arena, limo y arcilla, según la clasificación americana (Sistema U.S.D.A), en donde, en la medida que la clase textural tienda a cualquier vértice del triangulo textural se suscitará una serie de inconvenientes.

Figura 14: Triangulo textural y agrupamiento de las clases texturales



Fuente: CASANOVA, *et al.*, (2004)

Posteriormente, considerando cada una de las series de suelo de la comuna de Melipilla, se procedió a clasificarlas de acuerdo a las categorías generales de suelos, siendo incluidos estos dentro del tipo arenoso, francoso o arcilloso, junto a cada clase textural, y el porcentaje de superficie que cubren al interior de la comuna, tal como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 13: Categorías generales de suelos y las clases texturales

CATEGORÍAS GENERALES	CLASES TEXTURALES	NIVELES DE EROSIONABILIDAD
a) Suelos arenosos:	Arenosa (ag, a, af, amf)	Muy Alta
Textura gruesa	areno francosa (aFg, aF, aFf y aFmf).	
b) Suelos francosos:		Alta
Textura moderadamente gruesa.....	Franco arenosa (Fag, Fa, Faf).	
Textura media.....	Franco arenosa muy fina (Famf), Franca, Franco limosa y Limosa.	Moderada
Textura moderadamente fina.....	Franco arcillosa, Franco arcillo arenosa, Franco arcillo limosa.	Baja
c) Suelos arcillosos:	Arcillo arenosa, arcillo limosa, arcillosa.	Muy baja
Textura fina.....		

Fuente: VERA (1998)

- **Estructura Superficial de suelos**, la determinación de esta variable se desarrolló, al igual que la mayoría de las propiedades de las series de suelo, en función del Estudio Agrológico de la Región Metropolitana (CIREN-CORFO, 1996) en donde se especificó el tipo de estructura superficial que posee cada serie de suelo, en función de la siguiente tabla:

Tabla 14: Clases de Estructura y sus características principales

TIPOS DE ESTRUCTURA	CARACTERISTICAS	NIVELES DE EROSIONABILIDAD
Laminar	Los agregados o grupos se disponen en láminas horizontales, relativamente delgadas, hojitas o lentejuelas. Fuertemente influido por materiales originarios.	Baja
Prismático	Los agregados están orientados verticalmente o en pilares. Los cortes de los prismas son planos, igualados y limpios	
Subangular	Los agregados originales han sido reducidos a bloques, de seis caras irregulares y con sus tres dimensiones mas o menos iguales. Posee formas romas.	Moderada
Angular	Parecido al anterior, pero las aristas de los cubos son agudas y las caras rectangulares bien marcadas.	
Granular	Se incluyen todos los agregados redondeados. Estos por lo general están sueltos y se separan fácilmente.	Alta

Fuente: Elaborado en base a BUCKMAN Y BRADY (1993)

En la normativa se indican aquellas clases de estructura de acuerdo al tamaño de la unidad estructural, y a continuación se indican los rangos:

Tabla 15: Clases de estructura de acuerdo al tamaño de la unidad estructural

CLASE	CRITERIO POR TIPO TAMAÑO DE LA UNIDAD ESTRUCTURAL EN mm		
	Granular (1)	Bloques angulares	Columnar
	Laminar (2)	Bloques subangulares	Prismática
1. Muy fina	<1	<5	<10
2. Fina	1 - <2	5 - <10	10 - <20
3a. Media	2 - <5	10 - <20	****
3b. Media	****	****	20 - <50
4a. Gruesa	5-<10	****	****
4b. Gruesa	****	20 - <50	50 - <100
5. Muy Gruesa	≥ 10	≥ 50	100 - <500

Fuente: CONAMA (2006)

- **pH superficial de las series de suelo**, los rangos asociados al pH de los suelos se señalan a continuación:

Tabla 16: Rangos del pH del suelo

DESIGNACION	pH	DESIGNACION	pH
Ultra ácido	< 3.5	Neutro	6.6 - 7.3
Extremadamente ácido	3.5 - 4.4	Ligeramente alcalino	7.4 - 7.8
Muy fuertemente ácido	4.5 - 5.0	Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4
Fuertemente ácido	5.1 - 5.5	Fuertemente alcalino	8.5 - 9.0
Moderadamente ácido	5.6 - 6.0	Muy fuertemente alcalino	> 9.0
Ligeramente ácido	6.1 - 6.5	*****	*****

Fuente: CASANOVA, *et al.*, (2004)

- **Clase de drenaje y permeabilidad**, cada serie de suelo fue relacionada con la clase de drenaje correspondiente, dando a conocer sus características más importantes, de acuerdo lo siguiente:

Tabla 17: Clases de Drenaje y su descripción

CLASE	DESCRIPCION
1. Muy pobremente drenado	El agua es removida tan lentamente que el nivel freático permanece en la superficie del suelo la mayor parte del tiempo. A menos que el suelo sea artificialmente drenado, los cultivos no pueden desarrollarse
2. Pobremente drenado	El agua es removida tan lentamente que el suelo permanece húmedo una gran parte del tiempo. A menos que el suelo sea artificialmente drenado, muchos cultivos no pueden desarrollarse.
3. Imperfectamente drenado	El agua es removida del suelo lentamente, manteniéndolo húmedo por significativos períodos pero no durante todo el tiempo. A menos que el suelo sea artificialmente drenado, el crecimiento de cultivos es restringido.
4. Moderadamente bien drenado.	El agua es removida algo lentamente, manteniendo el suelo húmedo por poca pero significativa parte del tiempo.
5. Bien drenado	El agua es removida del suelo fácilmente pero no rápidamente. Estos suelos retienen cantidades óptimas de humedad para el crecimiento de las plantas después de lluvias o regadío.
6. Excesivamente drenado	El agua es removida del suelo muy rápidamente. Comúnmente presentan texturas gruesas.

Fuente: CONAMA (2006)

Lo expuesto en la tabla anterior, fue la base para inferir las características de permeabilidad de cada suelo, considerando los parámetros de la conductividad hidráulica saturada del suelo, en función de la siguiente tabla:

Tabla 18: Tipo de Permeabilidad y conductividad hidráulica del suelo

PERMEABILIDAD	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	NIVELES DE EROSIONABILIDAD
Muy lenta	< 0.00036	Muy Alta
Lenta	0.0036 - < 0.036	Alta
Moderada	0.036 - < 0.36	Moderada
Moderadamente rápida	0.36 - < 3.6	Baja
Rápida	3.6 < 36	Muy Baja
Muy rápida	> 36	

Fuente: CONAMA (2006)

También, se utilizó la clasificación del Soil Conservation Service (USSCS) que distingue entre infiltración (definida como el movimiento del agua a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo) y transmisibilidad que corresponde al movimiento gravitacional del agua en el perfil, dada por las características de los distintos horizontes.

El USDA-SCS (1964), clasificó hidrológicamente más de 4000 suelos basándose en su potencial de escurrimiento para lo cual los agrupó en cuatro grupos de suelos hidrológicos, los cuales se identifican con las letras A, B, C y D, donde sus características más importantes son las siguientes:

- **Grupo A:** Grupo de suelos con potencial de escurrimiento bajo. Cuentan con altas tasas de infiltración cuando están completamente húmedos. Son fundamentalmente profundos y se encuentran constituidos principalmente de arenas y gravas bien drenadas y muy bien ordenadas. Suelos con alta tasa de transmisibilidad de agua.
- **Grupo B:** Suelos con una moderada capacidad de infiltración cuando se encuentran completamente húmedos. Principalmente son suelos medianamente profundos y con un drenaje moderado a alto, con textura de sus agregados variando entre moderadas finas a gruesas. Tiene velocidades moderadas de transmisibilidad del agua.
- **Grupo C:** Suelos con capacidades de infiltración baja cuando están completamente húmedos, principalmente suelos que contiene una capa que impide el movimiento de agua hacia abajo o suelos con textura fina o moderadamente fina. Estos suelos tienen baja transmisibilidad de agua.
- **Grupo D:** Suelos con capacidades de infiltración muy bajas cuando están completamente húmedos. Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos. Suelos con transmisibilidad del agua muy baja.

Tabla 19: Categorías específicas de Grupos Hidrológicos

GRUPO HIDROLOGICO	POTENCIAL DE ESCORRENTIA	DRENAJE	INFILTRACION	SUELOS TIPICOS	TEXTURAS
A	Escaso	Perfecto	Alta	Arenas y gravas excesivamente drenadas	Arenosa, areno-limosa.
B	Moderado	Bueno a moderado	Moderada	Texturas medias	Franco-arenosa, Franca, Franco arcillo arenosa, Franco limosa.
C	Medio	Imperfecto	Lenta	Textura fina o suelos con una capa que impide el drenaje hacia abajo	Franco arcillosa, Franco arcillo limosa, Arcillo arenosa.
D	Elevado	Pobre o muy pobre	Muy lenta	Suelos de arcillas hinchadas o compactadas o suelos poco profundos sobre capas impermeables	Arcillosa

Fuente: USDA-SCS (1964)

- **Profundidad Efectiva Del Suelo**, ésta se determinó en función de los rangos establecidos por CIREN-CORFO (1996), de acuerdo a las siguientes denominaciones:

Tabla 20: Profundidad efectiva del suelo y rangos asociados

DESCRIPCION	RANGOS (cm)	NIVELES DE EROSIONABILIDAD
Muy delgado	< 25	Muy Alta
Delgado	25 - 50	Alta
Ligeramente profundo	50 - 75	Moderada
Moderadamente profundo	75 - 100	Baja
Profundo	100	Muy Baja

Fuente: CIREN-CORFO (1996)

- **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**, esta variable se estableció en función de los valores que presenta cada una de las series de suelo, según CIREN-CORFO (1996), y en función de los análisis de laboratorio de las muestras extraídas.
- **Porcentajes de Materia Orgánica (M.O)**, definidas al igual que en el caso anterior por medio del Estudio Agrológico de la Región Metropolitana (CIREN-CORFO, 1996) se identificaron los valores que poseen cada serie de suelo, y se clasificaron en función de

los rangos establecidos por el SOIL SURVEY STAFF (1951) en AGUILÓ (2000), tal como se observa a continuación:

Tabla 21: Rangos en porcentajes de la Materia Orgánica

DESCRIPCION	RANGOS (%)	NIVELES DE EROSIONABILIDAD
Muy deficiente	0-1.75	Muy Alta
Deficiente	1.76 – 2.5	Alta
Algo deficiente	2.6 – 4.0	Moderada
Normal	4.1 – 5.0	Baja
Apreciable	5.1 – 8.0	Muy Baja
Humífero	8.1 – 10	
Muy Humífero	> 10	

Fuente: SOIL SURVEY STAFF (1951), en AGUILÓ (2000)

- **Capacidad De Uso De Suelo**, fue establecida en función de CIREN-CORFO (1996), de acuerdo a la agrupación de suelos en clase, subclase y unidades de Capacidad de Uso:

Figura 15 : Clases de Capacidad de Uso de Suelo

CLASES DE CAPACIDAD DE USO	Aumenta la intensidad de uso →							
	Vida silvestre	Pastoreo			Cultivos			
		limitado	moderado	intensivo	limitado	moderado	intensivo	muy intensivo
I								
II								
III								
IV								
V								
VI								
VII								
VII								

Todas las clases pueden destinarse a la vida silvestre
Sólo la Clase I sostendría cultivos muy intensivos

Fuente: CASANOVA (2004)

Tabla 22: Clases de Capacidad de Uso de Suelo y su adaptación a cultivos

CLASES DE CAPACIDAD DE USO	DESCRIPCION	CARACTERÍSTICAS DE SUELOS
I	Muy pocas limitaciones que restrinjan su uso.	Son suelos planos, profundos, bien drenados, fáciles de trabajar, poseen buena capacidad de retención de humedad y la fertilidad natural es buena o responden en muy buena forma a las aplicaciones de fertilizantes.
II	Algunas limitaciones que reducen la elección de los cultivos o requieren moderadas prácticas de conservación.	Son suelos planos con ligeras pendientes. Son suelos profundos o moderadamente profundos, de buena permeabilidad y drenaje, presentan texturas favorables, que pueden variar a extremos más arcillosos o arenosos que la Clase anterior.
III	Moderadas limitaciones en su uso y restringen la elección de cultivos, aunque pueden ser buenas para ciertos cultivos.	Los suelos de esta Clase requieren prácticas moderadas de conservación y manejo.
IV	Severas limitaciones de uso que restringen la elección de cultivos.	Suelos que al ser cultivados, requieren cuidadosas prácticas de manejo y de conservación, más difíciles de aplicar y mantener que las de la Clase III.
V	Escaso o ningún riesgo de erosión, pero presentan otras limitaciones que no pueden removerse en forma práctica y que limitan su uso a empastadas, praderas naturales de secano (range) o forestales.	Los suelos de esta Clase son casi planos, demasiado húmedos o pedregosos y/o rocosos para ser cultivados. Están condicionados a inundaciones frecuentes y prolongadas o salinidad excesiva. Son suelos demasiado húmedos o inundados pero susceptibles de ser drenados, para producción de pasto.
VI	Inadecuados para los cultivos y su uso está limitado a pastos y forestales.	Los suelos tienen limitaciones continuas que no pueden ser corregidas, tales como: pendientes pronunciadas, susceptibles a severa erosión; efectos de erosión antigua, pedregosidad excesiva, zona radicular poco profunda, excesiva humedad o anegamientos, clima severo, baja retención de humedad, etc.
VII	Limitaciones muy severas que los hacen inadecuados para los cultivos.	Las restricciones de suelos son más severas que en la Clase VI por una o más de las limitaciones siguientes que no pueden corregirse: pendientes muy pronunciadas, erosión, suelo delgado, piedras, humedad, sales o sodio, clima no favorable, etc.
VIII	Suelos sin valor agrícola, ganadero o forestal.	Uso está limitado solamente para la vida silvestre, recreación o protección de hoyas hidrográficas.

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

3.5 ANÁLISIS DE LA CUBIERTA VEGETAL

- a) En base a investigaciones de QUINTANILLA (1983 y 1987), se determinaron las principales especies y formaciones vegetales del área de estudio.
 - b) Índice NDVI: Otro método utilizado para determinar la densidad vegetacional de la comuna de Melipilla, corresponde al Índice Normalizado de Diferencias Vegetales, por medio del cual se estableció la productividad vegetal en función de las bandas 03 y 04 de las imágenes satelitales LANDSAT THEMATIC MAPPER (7 TM), perteneciente al año 2002, extraídas de la pagina web Global Land Cover Facility, e ingresadas al software IDRISI 32. (<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>)
- Este índice permite conocer sectores con gran densidad vegetal (valores cercanos a 1), otros de menor densidad (cifras en torno a 0) y sectores con nieve o agua (valores cercanos a -1). Para CHUVIECO (2002), un aspecto de interés que posee este índice es el que fluctúe entre valores conocidos, facilitando notablemente su interpretación. Por esta razón, el NDVI permite la identificación de la erosión presente en función de la vegetación, entregando una base cuantitativa para la clasificación de rangos de densidad.

A continuación (Tabla 23), se indican los rangos establecidos por cobertura vegetal, y que serán utilizados para el área de estudio:

Tabla 23: Rangos de NDVI

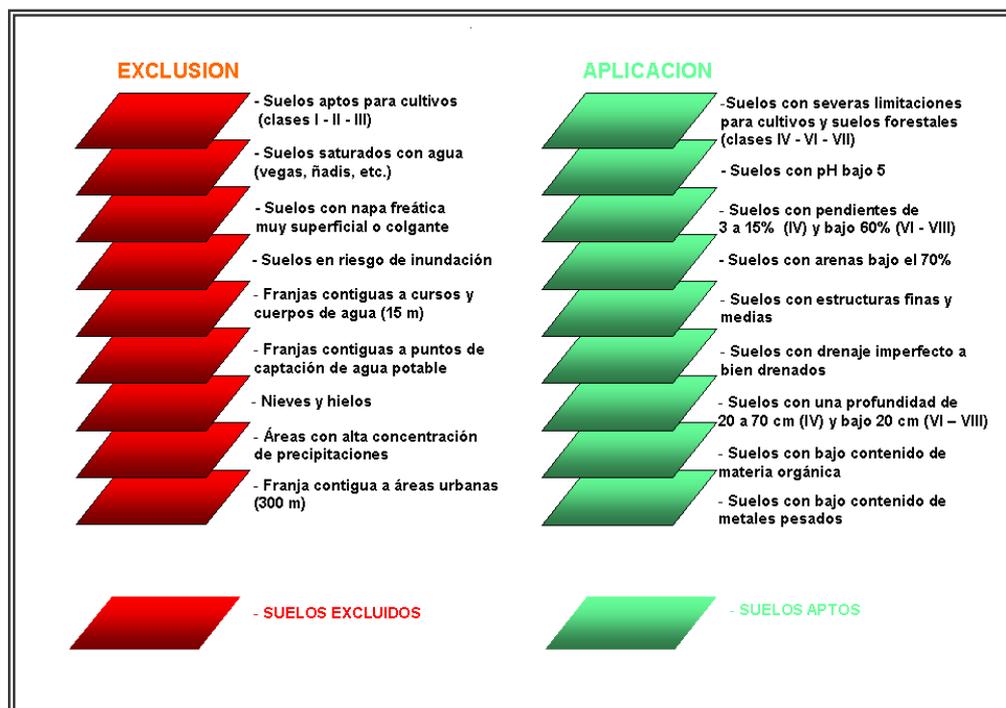
RANGOS	VALORES NDVI	COBERTURA VEGETAL
1	-1.0 a -0.5	Agua y Roca
2	-0.5 a -0.35	Suelo desnudo con menor materia orgánica
3	-0.35 a -0.1	Suelo desnudo con mayor materia orgánica
4	-0.1 a 0	Limite del suelo
5	0 a 0.1	Densidad muy baja
6	0.1 a 0.3	Densidad baja a moderada
7	0.3 a 0.6	Densidad moderada a alta
8	0.6 a 1.0	Densidad Muy Alta

Fuente: CHUVIECO (2002)

3.6 IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS SUSCEPTIBLES A LA APLICACIÓN DE BIOSOLIDOS

En base al *Reglamento de Lodos No Peligrosos* (CONAMA, 2006), se identificaron aquellas áreas que cumplen con las condiciones básicas de incorporación de lodos, superponiendo cada una de las variables y descartando las que tienen restricciones, de acuerdo al siguiente esquema:

Figura 16: Esquema operativo de exclusion y aplicación de Biosolidos



Fuente: Adaptado de CONAMA (2006)

En esta misma etapa, las áreas identificadas fueron complementadas con información del PLAN REGULADOR METROPOLITANO DE SANTIAGO (PRMS, 2006), para indicar la zonificación de los distintos Uso de Suelo al interior de la comuna, además de complementar, con datos del INE (2002), los datos demográficos de los distintos distritos de Melipilla.

3.7 ANÁLISIS DE SUELOS

Ya determinadas las áreas que cumplen con las condiciones básicas con respecto a los sitios de aplicación, se procedió a extraer muestras superficiales de suelo obtenidas en terreno, en el mes de enero del 2007, las fueron enviadas al laboratorio del INIA (La Platina), donde se aplicaron los siguientes métodos:

- **Análisis de Laboratorio:**

- Análisis textural a través del método densimétrico y granulometría de arenas.
- NPK disponibles, N total, CIC, MO (Cu, Fe, Mn y Zn) DTPA.
- Fósforo y Potasio totales.
- Medición de conductividad eléctrica del suelo según el método 9.1 Rev. (1998), de la Comisión de Normalización y Acreditación de la Sociedad Chilena de Ciencia del Suelo. Extracto de Saturación y Conductivimetría.
- La medición de pH se realizó según el método 3.1, Rev.(1998), Comisión de Normalización y Acreditación de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo.

CAPITULO IV: RESULTADOS

Los diversos componentes del sistema natural que inciden en los procesos de erosión de suelo, no actúan de manera aislada, por el contrario, estos son complejos y desempeñan acciones dependientes e integradas, pero que obedecen a un orden jerárquico, encontrando en un primer nivel las variables asociadas al sub-sistema atmósfera (clima), en segundo lugar se encuentra el subsistema morfológico de acuerdo a los factores del relieve y bióticos, y en tercer lugar, se acentúan procesos internos que influyen significativamente en el desarrollo del perfil de suelo. En este sentido, a continuación se caracterizan cada uno de estos factores edafogenéticos al interior de la comuna de Melipilla, y se evalúa su influencia sobre el desencadenamiento de procesos de erodabilidad que son mucho más acelerados e incidentes en las diversas formas del paisaje.

4. FACTORES DE ERODABILIDAD

4.1 CARACTERISTICAS CLIMATICAS

4.1.1 Condiciones Climáticas del Área de Estudio

A nivel del subsistema atmósfera, el clima es el que condiciona y actúa directamente sobre el desprendimiento y desagregación del material parental, de acuerdo a factores tales como las precipitaciones efectivas, temperatura, radiación, evapotranspiración, etc.

De acuerdo a la información extraída de CIREN-CORFO (1990), cabe señalar que la Región Metropolitana ocupa una posición mediterránea definida por los cordones montañosos que rodean la cuenca central, que refuerza la acción dominante del Anticiclón del Pacífico y marca las diferencias estacionales con veranos cálidos y secos, e inviernos fríos y lluvias esporádicas que mantienen la condición de semiaridez dentro del área transicional.

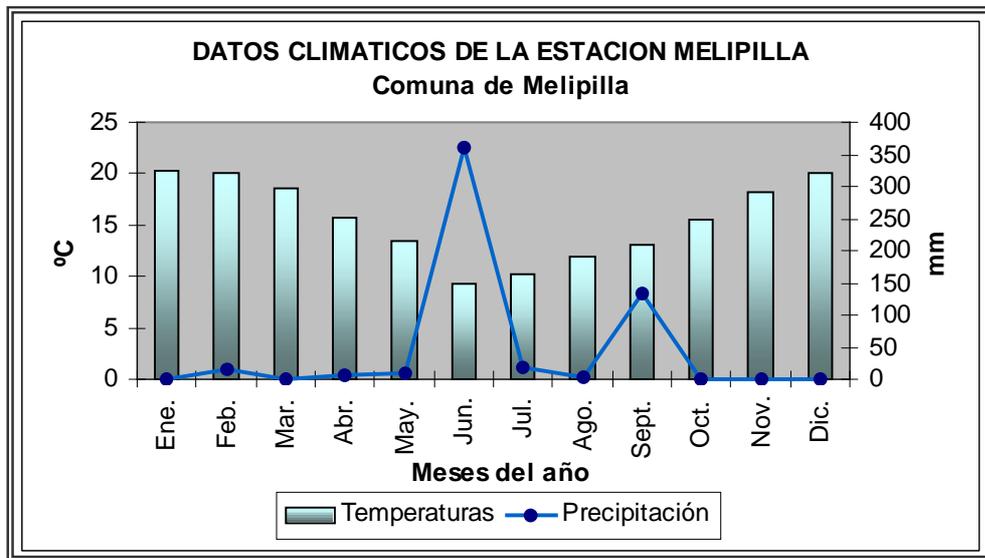
En la Región, es posible distinguir tres subsectores climáticos que separan la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, más seca y calurosa que la occidental presente en la V Región, debido a su propia sombra pluviométrica y al abrigo de la moderación térmica costera; en primer lugar se encuentran *la cuenca de Santiago* y el *valle marginal de Curacaví-Melipilla*, que recibe cierta influencia costera, pero que fundamentalmente desarrolla condiciones climáticas semiáridas reforzadas por la sombra de la Cordillera de la Costa, con importantes oscilaciones térmicas, y un *sector cordillerano andino*, al oriente de la cuenca, en donde prima el factor altura y se recupera del efecto de sombra pluviométrica del cordón costero, permitiendo aumentos de precipitación y su solidificación.

Para efectos de esta investigación, la comuna de Melipilla específicamente se inserta dentro del segundo subsector perteneciente a la Región Metropolitana, y que se denomina *subsector Valle Central*. En éste, se señala la existencia, aguas abajo del Maipo y orientado de norte a sur por la Cordillera de la Costa, del distrito Curacaví-Melipilla-Mallarauco-El Monte, el más beneficiado por la brisa marina que logra penetrar aguas arriba por el valle del Maipo.

Los datos agroclimáticos de la *estación meteorológica Melipilla* (Fig. 17), ubicada al centro de la comuna del mismo nombre, indican que hay registros de temperaturas promedio de 9.3° C en el invierno, específicamente en el mes de junio, que son efectivamente las más bajas a lo largo del año. Y destacan, las temperaturas promedio de 20.3° C, que son las más altas registradas asociadas a los meses estivales.

Para el caso de los montos de precipitaciones (Pp), los promedios fluctúan entre los 0.0 mm, a los 359.6 mm, evidenciándose diferencias significativas en términos de la variabilidad experimentada por la precipitación en el área de estudio, es decir, los registros más bajos corresponden a los meses estivales, y los más altos a los meses invernales. A continuación se indican los datos climáticos de esta estación agro-climatológica:

Figura 17: Datos Medios Mensuales de la Estación Climatológica Melipilla, Comuna de Melipilla



Fuente: Boletín Agroclimático, Dirección Meteorológica de Chile (2000)

4.1.2 Validez areal de la Precipitación: Polígonos de Thiessen y Erodabilidad

El área de estudio, posee cuatro estaciones meteorológicas, las cuales corresponden según el SAG (2006), a *Estero Puangue en ruta 68*, ubicada al NW de la comuna; la *Estación Melipilla*, vista anteriormente, al centro; *Carmen de las Rosas*, al oriente; y *Los Guindos*, al sur de la comuna.

Cada una de ellas, posee datos y registros pluviométricos en función de las precipitaciones anuales, y mensuales, que serán la base para establecer la validez areal de la precipitación de la comuna, tal como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 24: Montos precipitación por cada estación, e Índice de Agresividad Climática, Comuna de Melipilla

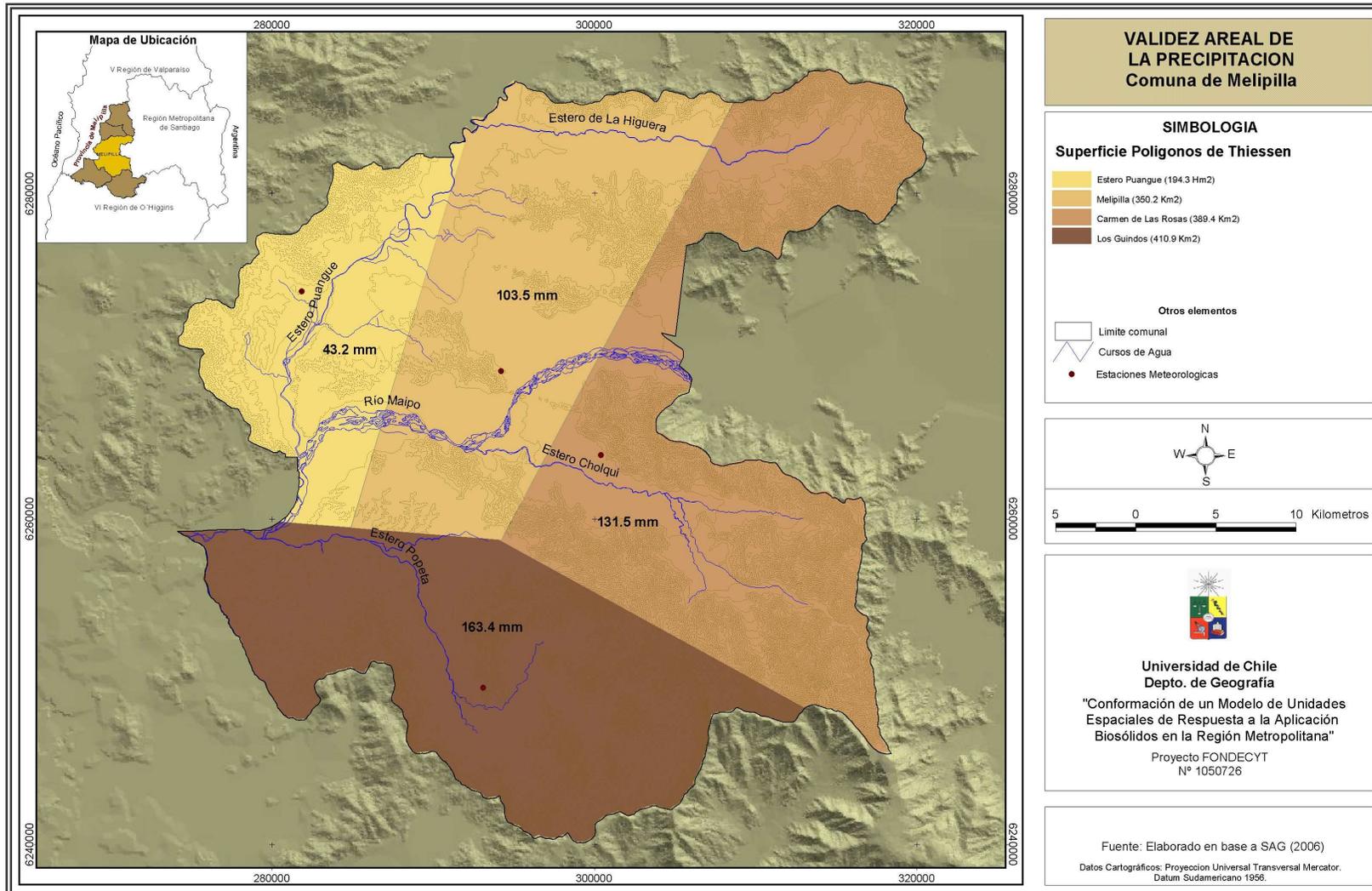
ESTACION METEOROLOGICA	Pp máxima anual (mm)	Pp mínima anual (mm)	Pp ½ anual (mm)	Área de Influencia	$\Sigma P_i \times A_i$ Ac	Agresividad Climática
Estero Puangue en Ruta 68	600.5	34.0	299.5	194.3	43.2	Moderado
Melipilla	759.0	58.8	397.7	350.2	103.5	Alto
Carmen de Las Rosas	996.0	59.5	454.2	389.4	131.5	Alto
Los Guindos	1041.5	82.5	534.9	410.9	163.4	Muy Alto
TOTAL	849.2	58.7	Σ 1686.3 (mm)	-Ac- Σ 1344.8 (km²)	Total 441.6 (mm)	

Fuente: Cálculos elaborados por la autora en base a SAG (2006)

Considerando los valores de precipitación media anual (mm), se demuestra que los registros más bajos son pertenecientes a la estación de *Estero Puangue en Ruta 68*, ubicada en el sector occidental de la comuna de Melipilla. De acuerdo a la exigua presencia de precipitaciones, el área de influencia de esta estación presenta un ambiente de sequedad, pero se debe evaluar con otros factores del medio natural, la susceptibilidad de estos terrenos a ser erosionados, ya que según el Índice de Agresividad Climática, esta zona se inserta dentro del grado de *moderado*, ocupando $\frac{1}{4}$ de la superficie total de la comuna, con 23.004 hás.

Por el contrario al caso anterior, las estaciones de *Carmen de las Rosas* y *Melipilla*, ubicadas al NE y centro de la comuna respectivamente, poseen altos registros de precipitación, los cuales varían entre 398 a 455 mm. En este macro-sector, que cubre alrededor del 50% de la superficie comunal (68.243 hás), se encuentran condiciones propicias para el desencadenamiento de procesos de erodabilidad de acuerdo al Índice Modificado de Fournier, con lo cual estos sectores poseen mayor disposición a problemas de erosión, al igual que en el caso de la Estación de *Los Guindos*, en donde los grados de erodabilidad son *muy altos*, y el impacto de la gota de lluvia es mucho mas significativo por su alta intensidad.

Figura 18: Adaptación de Polígonos de Thiessen, Comuna de Melipilla



4.2 CARACTERIZACION MORFOLOGICA (Material Parental)

4.2.1 Unidades Geológicas

De acuerdo con LUZIO Y CASANOVA (2006), el material parental, crea las condiciones adecuadas para que, eventualmente, sirvan de sustrato para la formación del suelo. Así la litología del material parental determina la naturaleza física y la composición mineralógica que tendrá el suelo. Es por este motivo que adquieren gran importancia las formaciones geológicas presentes en el área de estudio, que poseen un número significativo puesto que son alrededor de 28 las unidades insertas dentro de la comuna, en función de lo planteado por WALL y GANA (1996), las cuales de acuerdo a sus materiales asociados, y los periodos correlativos de formación, poseerán mayor susceptibilidad a ser erosionados.

4.2.1.1 Unidades Geológicas del Cuaternario (Q)

Al analizar la carta geológica, se destaca que hay una importante superficie cubierta por una serie de depósitos de distintos orígenes, pero que a la vez son los más recientes de acuerdo a la escala geológica, entre los cuales destacan depósitos aluviales, coluviales, fluviales y fluviales antiguos,.

Los *depósitos aluviales* (Qa), en primer lugar, corresponden a sedimentos no consolidados, ubicados en zonas de planicie, que se localizan al NE de la comuna, en un reducido sector de rinconada cercano a la cabecera del estero de La Higuera. Estos se componen principalmente de depósitos gravitacionales (flujos de barro, flujos de detritos), compuestos por gravas, arenas, y limos.

Por su parte, los *depósitos coluviales* (Qc), corresponden al igual que los anteriores a sedimentos no consolidados, ubicados en las cabeceras de las quebradas; en sectores distales de cordones de cerros al NE y centro del área de estudio. Estos constan de depósitos gravitacionales derivados de flujos en masa, de muy mala selección granulométrica, que pueden incluir desde bloques hasta arcillas, generados por pequeños cursos de agua, permanentes o esporádicos.

Los *depósitos fluviales* (Qf), se encuentran asociados a la presencia del Río Maipo, al centro de la comuna, los que han sido generados por este mismo curso fluvial en su avance y divagar. Predominan materiales con forma de bolones, de baja esfericidad, y en parte imbricados. También se aprecian depósitos con estas mismas características pero de mayor antigüedad, denominados *depósitos fluviales antiguos* (Qfa) y *depósitos fluviales subactuales* (Qfs), los cuales se localizan aledaños a los cursos de agua, tales como el estero Popeta, estero Puangue, y río Maipo, compuestos por sedimentos no consolidados que generan formas de terrazas; y con materiales predominantes tales como gravas, arenas y limos, ubicadas a alturas de 3-30 m con respecto al curso fluvial actual.

Con menor representatividad areal al interior de la comuna de Melipilla, están los *depósitos de remoción en masa* (Qrm) que corresponden a depósitos de movilización gravitacional correspondientes a flujos de detritos, de barro, deslizamientos, con materiales muy mal seleccionados.

Finalmente, una gran superficie de Melipilla, está conformada por la *Ignimbrita Pudahuel* (Qip), perteneciente al Pleistoceno superior. Esta superficie corresponde a depósitos de origen piroclástico de ceniza y lapillo pumiceo, de composición riolítica, de amplia distribución en la

Depresión Central, con una potencia máxima observada de 5 m al sur de Melipilla. La Ignimbrita Pudahuel cubre depósitos aluviales y está disectada por los cursos fluviales, en especial, de los esteros Puangue, Popeta y del río Maipo; posee color blanco amarillento a pardo claro, rosado, medianamente a bien consolidado, con estructuras de flujo laminar matriz-soportado, los cuales corresponden a los productos de una erupción explosiva de la Caldera Diamante (Complejo volcánico Maipo), 130 Km hacia el sureste, en la Cordillera Andina.

4.2.1.2 Unidades Geológicas del Neógeno

Asociado a este período, se encuentran los *Estratos de Potrero Alto* (TQpa), ubicados al SW de la comuna, compuestos por depósitos sedimentarios medianamente a bien consolidados de conglomerados, areniscas, limonitas, arcillolitas con restos vegetales mal preservados, limolitas grises y niveles de diatomitas, limonitas verdosas con trazas fósiles. Esta cubre a intrusivos paleozoicos a jurásicos y posee, a su vez, sedimentos aluviales y suelos cuaternarios.

4.2.1.3 Unidades Geológicas del Cretácico

Pertencientes al Cretácico, se encuentran las formaciones *Veta Negra* (Kvn) y *Lo Prado* (Klp), ubicadas al sur-oriente de la comuna de Melipilla, en sectores de pendientes abruptas.

Para el primer caso, la *Formación Veta Negra*, corresponde a la unidad volcánica y, en parte subvolcánica, que incluye andesitas con grandes fenocristales de plagioclasa (ocoitas), lavas andesíticas porfídicas y afaníticas con intercalaciones sedimentarias.

La *Formación Lo Prado*, por su parte, es la unidad sedimentaria marina y volcánica, dispuesta en aparente concordancia sobre la *Formación Horqueta* e infrayacente, concordantemente, a la *Formación Veta Negra* y a los *Estratos de Horcón de Piedra*. En su miembro superior (Klps), destacan las calizas fosilíferas marinas, areniscas y conglomerados con intercalaciones de rocas volcánicas andesíticas a dacíticas; con mayor presencia de rocas volcánicas hacia el sur. En su miembro medio (Klpm), hay presencia de lavas, lavas brechosas y tobas, de composición andesítica, dacítica y riolítica con intercalaciones sedimentarias subordinadas. Finalmente, su miembro inferior (Klpi), posee areniscas, areniscas calcáreas fosilíferas marinas, lutitas calcáreas, areniscas y conglomerados con escasas intercalaciones de lavas andesíticas y dacíticas.

En el sector este-noreste de Pomaire, hay depósitos de *rocas intrusivas*, con brechas intrusivas compuestas por clastos graníticos de grano grueso, y tonalitas de anfíbola-biotita-piroxeno, con grandes cristales de anfíbola, en matriz gris oscura de grano fino, y se designan como Kb, Kdgt, y Kdp.

4.2.1.4 Unidades Geológicas del Cretácico y Jurásico Indiferenciado

Conformando *rocas intrusivas*, se encuentran materiales litológicos del Jurásico tales como las asociadas a Jkp, y Jkgb correspondiente a pórfido andesítico de anfíbola. Rocas de color gris medio verdoso, con fenocristales de plagioclasa y anfíbola, en una masa fundamental fuertemente alterada de textura intergranular, formada por plagioclasa, cuarzo, anfíbola y gránulos opacos.

4.2.1.5 Unidades Geológicas del Jurásico

Asociado a la presencia de *rocas estratificadas*, se encuentran la *Formación Horqueta* (Jh), que corresponde a una secuencia volcánica subaérea con intercalaciones sedimentarias

continentales, constituida por tobas, lavas andesíticas a riolíticas, areniscas y conglomerados volcanoclásticos de color pardo rojizo.

La *Formación Cerro Calera* (Jc), es una unidad predominantemente sedimentaria, marina y transicional, constituida por limolitas y areniscas calcáreas, areniscas y conglomerados volcanoclásticos, areniscas y conglomerados cuarzo-feldespáticos e intercalaciones de tobas.

También afloran rocas intrusivas, con tonalitas y granodioritas de anfíbola y biotita; que incluyen pequeños cuerpos dioríticos al norte de Pomaire, denominados con la sigla Jlt, y Jp, y corresponden a rocas de color gris claro, grano medio, que contienen inclusiones máficas (<1 %) subesféricas, microdioríticas.

4.2.1.6 Unidades Geológicas del Jurásico – Triásico

Con la denominación de TrJtv, ubicados al W de la comuna, se encuentran sienogranitos de biotita, y monzogranitos de biotita y anfíbola, estas corresponden a rocas de color gris claro a amarillento rosáceo, de grano medio a fino.

4.2.1.7 Unidades Geológicas del Paleozoico

Estas corresponde a los depósitos más antiguos en términos de datación geológica, por la existencia de rocas intrusivas, al SW de la comuna, en donde sobresalen la presencia de tonalitas y granodioritas de anfíbola y biotita, y otro tipo de materiales, donde sobresalen Pzmg, y Pzp.

De acuerdo a las unidades y formaciones que conforman el sustrato geológico del área de estudio, estas también poseen una relevancia dentro de los factores que inciden en la erodabilidad de la comuna, por lo cual la composición mineralógica y la estructura de la roca permiten establecer diversas unidades espaciales susceptibles a ser erosionadas (Tabla 25), las cuales varían de *sedimentos clásticos*, con rango catalogado de *alta* erodabilidad, a *rocas graníticas* con un rango de erodabilidad *bajo*.

Las rocas y materiales *granitoides*, que cubren 34.086 hás, pertenecientes a intrusiones paleozoicas y jurásicas, son los que en sí no presentan ningún riesgo elevado a ser erosionados según KUHNI y PFIFFNER (2001), ya que los materiales por su antigüedad presentan mayor consolidación y dureza, sin embargo, este factor aislado no es determinante en el desencadenamiento de procesos erosivos, ya que se deben integrar otros elementos tales como unidades geomorfológicas y topográficas.

Por su parte, aquellas unidades cuaternarias compuestas por materiales geológicos recientes y más blandos por la presencia de depósitos no consolidados, reúnen la mayor cantidad de superficie comunal (69.864 hás), los que son más proclives de experimentar desagregación o algún tipo de alteración de sus componentes. No obstante, también se debe evaluar si estos depósitos se encuentran en una posición morfológica favorable a la inestabilidad de los materiales o al desgaste de ellos.

Las rocas con menor representatividad comunal (23.745 hás), corresponden a diversas formaciones estratificadas como *Veta Negra* y *Horqueta*, de un origen volcánico subaéreo, con presencia de intercalaciones sedimentarias en su composición; y las formaciones Cerro La

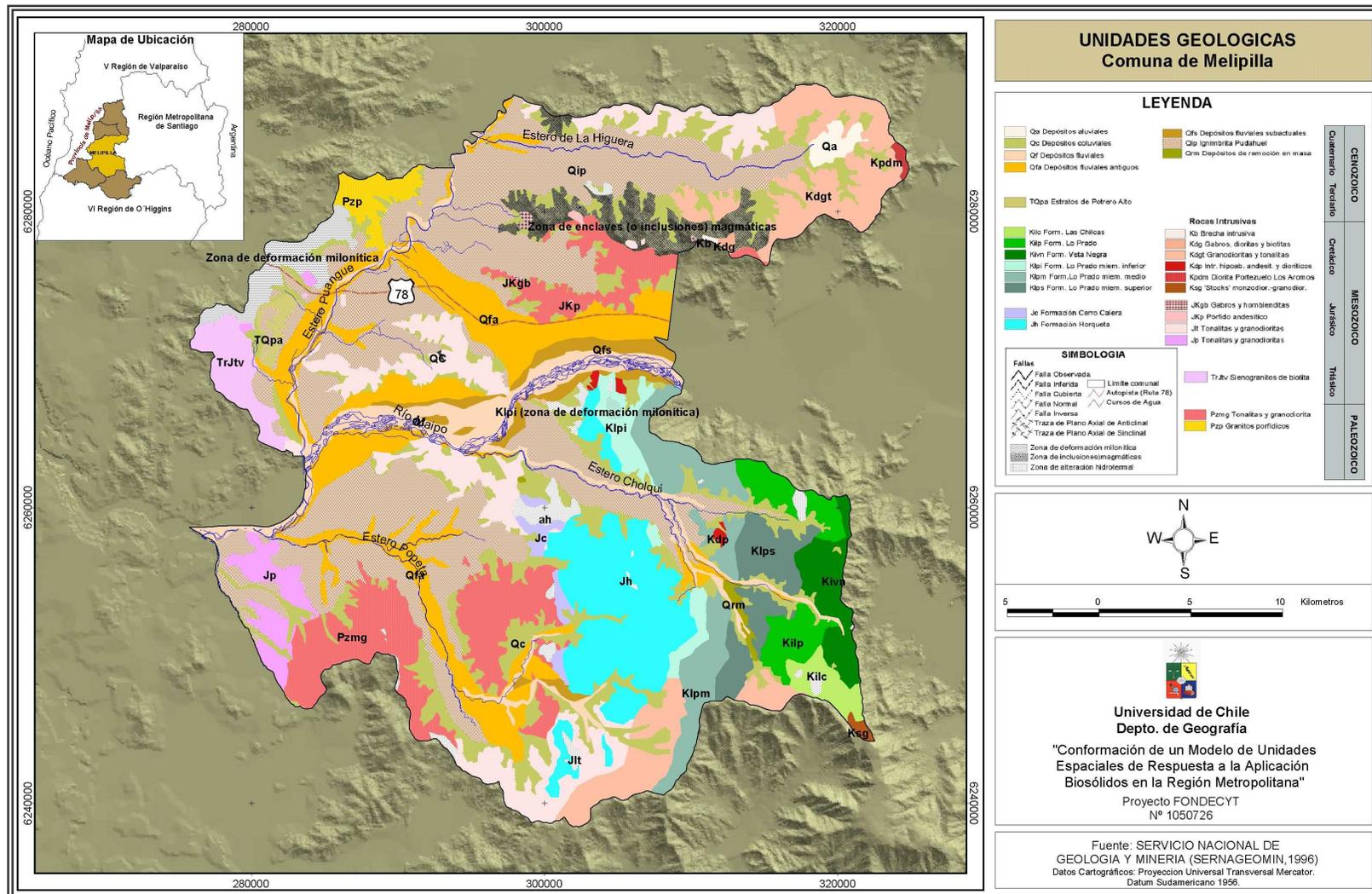
Calera, y Lo Prado, cuyo origen marino transicional indica evidencias de fauna fósil, por lo cual el rango de erodabilidad es *medio*.

Tabla 25: Unidades geológicas y erodabilidad, Comuna de Melipilla

TIPOS DE ROCA Y MATERIALES	COMPOSICION	UNIDADES	NIVELES DE ERODABILIDAD	SUPERFICIE (HÀS)
Depósitos no consolidados	Sedimentos clásticos	Aluvio coluviales, fluviales, y piroclásticos	Alto	69.863,8
Rocas estratificadas	Carbonatos Mesozoicos	Formación Veta Negra Formación Lo Prado Formación Cerro Calera Formación Horqueta	Medio	23.745,6
Rocas Intrusivas	Granitoides	TrJtv Jlt-Jp Kdp-Kdg-kdgt Kb Pzmg-Pzp	Bajo	34.086,2

Fuente: Elaboración propia en base a KUHNI y PFIFFNER (2001)

Figura 19: Carta Geológica, Comuna de Melipilla



4.2.2 Unidades Geomorfológicas

La caracterización geomorfológica de la comuna de Melipilla (Fig. 20), en el contexto de secano interior, se desarrolla en base al análisis de formas estructurales y procesos, que conforman la naturaleza genética de las principales unidades identificadas como son, los *Sistemas de Vertientes*, las *Formas Depositacionales*, y las *Formas de Fondo de Valle* o de terrazas y lechos de ríos. A continuación se especifican las principales características de cada uno de ellos:

4.2.2.1 Sistemas de Vertientes

De acuerdo a la información geológica, y su relación con las características de morfoestructura y tectónica que señalan WALL y GANA (1996), en el área de estudio se presenta una dinámica que ha sido influida por procesos de tipo intrusivo, lo que ha generado las denominadas *Vertientes intrusivas macizas*, que destacan en la comuna por su importante presencia en términos de superficie, las cuales exhiben un modelado sobre un sustrato cristalino cuya homogeneidad litológica hace especular, como ya lo planteó MEDINA (1987), en ARAYA VERGARA (1996), en las influencias exógenas del modelado, con lo cual cobra gran importancia las distintas edades de estos cuerpos intrusivos.

En función de lo anterior, las unidades geomorfológicas se aprecian en la Figura 20, en donde se evidencian los diversos tipos de vertientes que se subdividen en:

- **Vertientes intrusivas macizas altas**

Estas vertientes, se emplazan en el límite sur de la comuna, en las áreas culminantes más altas asociadas a la presencia de los Cerros El Durazno y el Maitén, con alturas superiores a los 1000 m. Constan de una edad relativa perteneciente al Cretácico superior (entre 83 y 92 m.a), las que intruyen a las formaciones estratificadas volcano-sedimentarias, especialmente las situadas en la zona de Altos de Cantillana. En esta última zona, se distinguen importantes áreas relacionadas a superficies de erosión residual. Al respecto estas *mesetas* han sido descritas por distintos autores como WEBER (1946), y BORDE (1966) en FIGUEROA (1992).

Según BORDE (1966), estas superficies formaron parte de una antigua área peneplanizada durante el Paleógeno, que sufrió dos solevamientos hasta alcanzar su nivel actual, el primero durante el Oligoceno superior a Mioceno Inferior, y el segundo durante el Plioceno Inferior. Estas superficies pueden ser consideradas como verdaderos *relictos geomorfológicos*, ya que representarían los últimos vestigios del nivel de base de la peneplanicie paleógena en la región.

- **Vertientes intrusivas macizas bajas**

Se emplazan preferentemente en la zona occidental y nor-occidental de la comuna, y se caracterizan por ser intrusivos de mayor antigüedad asociados al Paleozoico-Triásico (160 a 289 m.a).

Las vertientes en general, están representadas por macizos plutónicos que por su antigüedad se deduce su alto grado de desgaste y rebajamiento, como también su mayor desestabilidad (se cuenta con numerosas explotaciones de canteras de maicillo en este sector). Poseen un relieve bajo y suavizado (sus alturas no sobrepasan los 900 m.s.n.m y en promedio se sitúan entre los 500 m.s.n.m), presentándose altamente incididos por la acción de la escorrentía superficial.

Ahora, según la taxonomía de ARAYA-VERGARA (1985), su validación para otras áreas de montaña (ARAYA-VERGARA, 1996) y la adaptación de SOTO *et al.*, (2006) para áreas de baja y media montaña, se distinguen otras unidades tales como:

- **Vertientes estructurales monoclinales en sustrato volcánico-sedimentario**

Se caracterizan por presentar un modelado esculpido en secuencias estratificadas de rocas volcano-sedimentarias, de estilo estructural monoclinal, en el cual se han desarrollado sistemas de vertientes que obedecen a la dirección de buzamiento de los estratos. Lo anterior se analiza en detalle en SOTO *et al.*, (2006), para el borde meridional de la cuenca del río Maipo, observándose un conjunto de vertientes inversas (subsecuentes o anaclinales) y conformes (consecuentes o cataclinales).

Se asume que este juego de vertientes corresponde a lo que en general se puede encontrar en esta clase de vertientes, especialmente en los sectores más altos de las estribaciones montañosas y en sectores de mayor rexistasia.

- **Vertientes estructurales monoclinales en sustrato calcáreo**

Se distingue un modelado en sustrato volcano-sedimentario marino (rocas calcáreas y areniscas), diferenciado por los miembros superior, medio e inferior de la Formación lo Prado (WALL *et al.*, 1996), lo cual en teoría, se asume de menor resistencia a los procesos erosivos.

4.2.2.2 Formas depositacionales de base de vertientes

Considerando las unidades geomorfológicas de piedmont que define ARAYA VERGARA (1985) y las consideraciones de BLIRKA *et al.*, (1998), estas formas corresponden a depósitos coluvio-aluviales, los cuales poseen un alto nivel de antropización y enmascaramiento de sus rasgos superficiales generados por la cobertura vegetal.

En general, estos depósitos se presentan en contacto con superficies de fondo de valle. En las zonas bajas de los valles (de mayor amplitud y menor pendiente), estos depósitos se encuentran en contacto con depósitos polifásicos fluviales; en cambio, en las zonas altas de los valles (de menor amplitud y mayor pendiente) se encuentran en contacto con otros depósitos coluvio-aluviales, formando a veces complejos sistemas donde se observa interacciones de coalescencia y superposición, como en las subcuencas del sistema Aculeo (SOTO *et al.*, 2006). Este sistema presenta un avanzado desarrollo respecto al resto de los depósitos observados. Este mayor desarrollo se evidencia por la presencia de un glacis de derrame bastante amplio.

En el área baja del valle del estero Popeta, los depósitos coluvio-aluviales, se presentan en contacto y sobre imponiéndose a depósitos de cinerita, asociados en términos geológicos, a la unidad de *Ignimbrita Pudahuel*.

Si bien, la mayoría de estos depósitos son considerados como formas relictas heredadas del Cuaternario, presentan un funcionamiento dinámico actual, principalmente vinculado a flujos de detritos de carácter estacional. En este sentido, la zona de Altos de Cantillana, se configura como el principal agente exportador de sedimentos y regulador de la dinámica hidrológica crinival estacional del área de estudio. También es importante destacar el aporte de materiales desde las vertientes (sobre todo cuando las condiciones morfoestructurales permiten un mayor

aporte); material que puede alcanzar grandes distancias, rodando sobre depósitos basales en estado de biostasia.

4.2.2.3. Formas de Fondo de Valle

En este grupo de formas, se encuentran en primera instancia, las formas fluviales, en donde se da relevancia a las *formas polifásicas*, a través, de la noción de *terrazza* (ARAYA VERGARA, 1985). Es así, como se distinguen a lo menos dos niveles de terraza, además del cauce actual. Estos son:

- **Terraza T` (Holoceno):** Corresponde a depósitos de sedimentos de gravas, arenas y limos no consolidados de cursos fluviales abandonados o esporádicamente inundados. Pueden presentar una cobertura vegetal incipiente.
- **Terraza Pleistocénica (Pleistoceno Superior Holoceno):** Corresponden a depósitos de sedimentos gravas, arenas y limos no consolidados, presentando un marcado aterrazamiento, además de una cobertura de suelo bien desarrollada y vegetación nativa o cultivos.
- **Cauce actual:** Representa los cauces fluviales activos (ya sea en época de estiaje y crecida) compuestos por gravas clasto-soportadas y bancos de arena.

Por otro lado, las formas de terrazas de cineritas, son las que en general se encuentran altamente intervenidas por la actividad agrícola.

- **Terraza de Cinerita:** Estos depósitos, en el área de estudio, abarcan una gran extensión, ocupando casi toda la parte baja del estero Popeta y la rinconada de Culiprán. También estos ocuparían gran parte del valle del estero Cholqui, sin embargo, según el estudio de suelos de CIREN-CORFO (1996), dichos depósitos sólo comprenden una pequeña parte en la zona de Chocalán.

Morfológicamente, estos depósitos corresponden a una *terrazza de cinerita* (ARAYA VERGARA, 1985), la cual cubre depósitos aluviales y se encuentra fuertemente disectada por cursos fluviales formando un relieve ondulado con una gran cantidad de desniveles de 20 a 30 m. de altura. También se encuentra aterrazada por depósitos fluviales antiguos (Pleistoceno) del estero Popeta y por depósitos coluvio-aluviales de base de vertiente.

En términos de la superficie y las condiciones de erodabilidad generadas en base a la geodinámica de las formas identificadas (Tabla 26), es importante mencionar que gran parte de la comuna de Melipilla, está cubierta por sistemas de vertientes (48%), que varían de *vertientes monoclinales y plegadas* en sustrato volcánico sedimentario, a *vertientes de excavación* al SE del área de estudio, que asemeja un corte de cuchara gigantesco de acuerdo a TRICART *et al.*,(1965) en ARAYA-VERGARA (1985), en donde las paredes abruptas del alveolo proporcionan abundantes materiales a las zonas más bajas, con lo cual hay una condición geodinámica muy activa.

Se ha hecho una integración con respecto a las formas basales, puesto que la escala utilizada no permite distinguir de mejor manera el origen de cada uno de estos depósitos, en efecto, estos presentan menor expresión areal al interior de la comuna de Melipilla con sólo 12%. Los conos coluviales, están conformados por depósitos gravitacionales correlativos provenientes de

las pendientes abruptas de los sistemas de vertientes, por lo cual su condición es inestable y susceptible de desestabilización teniendo una condición geodinámica activa, en contraposición a los conos aluviales que poseen una estructura mas regular y por tanto pasiva.

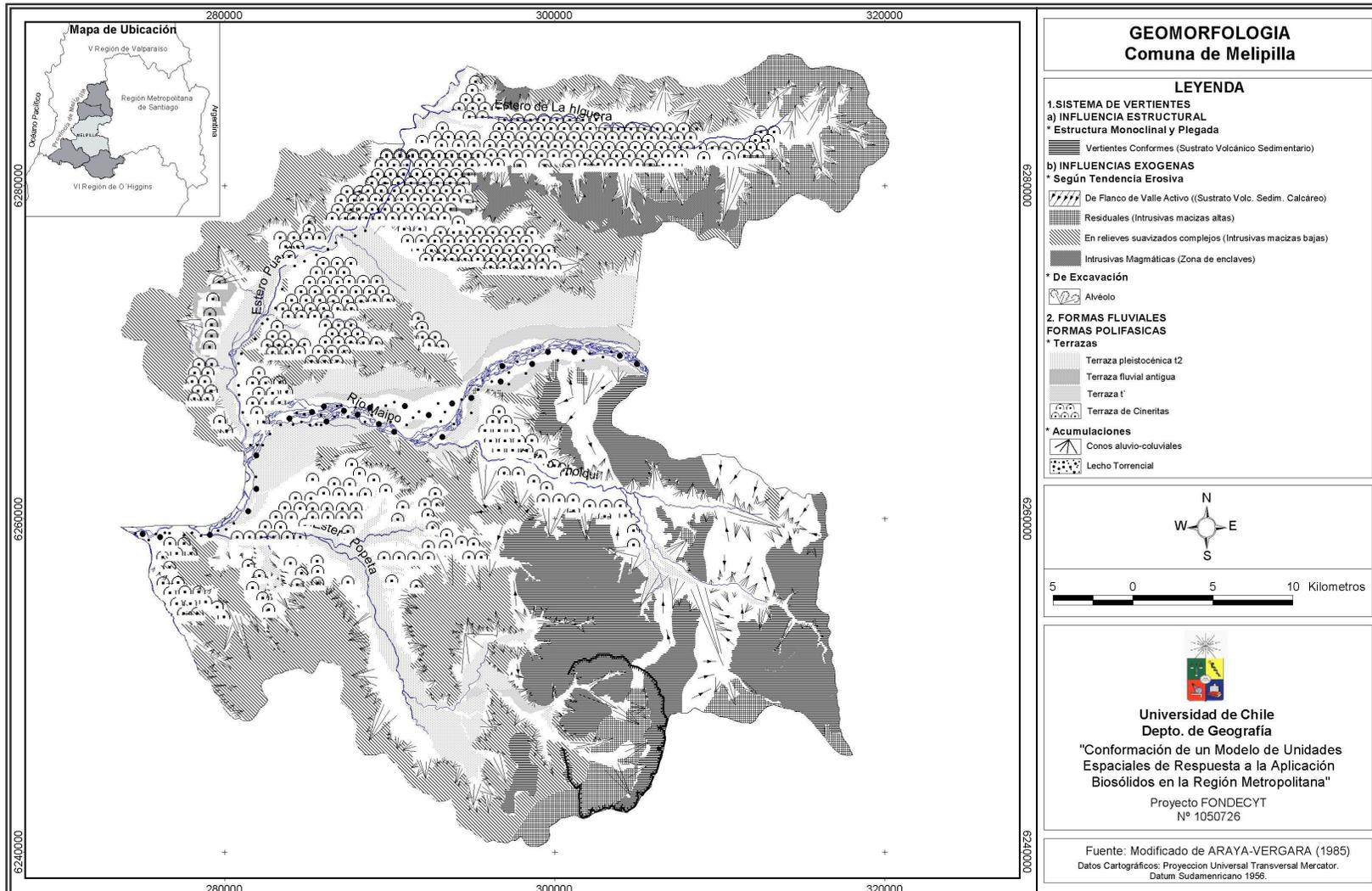
Finalmente, las formas de *Fondo de Valle* cubren el 40% de la comuna, en donde para el caso de las *Terrazas*, tienden a ser más pasivos en términos de la dinámica del paisaje, por encontrarse en zonas con pendientes horizontales que no generan mayores aportes de material, ni tampoco desagregación de estos. No obstante, esta situación se ve modificada en sectores cuyo cauce es de características torrenciales, ya que poseen una hidrodinámica tal, que constantemente se genera desgaste de las riberas del río Maipo, ubicado al centro de la comuna, incorporándose frecuentemente al cauce principal materiales en curso.

Tabla 26: Condición geomorfológica y erodabilidad, Comuna de Melipilla

UNIDAD GEOMORFOLOGICA	SUB-UNIDADES	CONDICION GEODINAMICA	SUPERFICIE (HÁS)
VERTIENTES (64.158 háas) 48%	Monoclinales y Plegadas	Moderadamente activa	16.197,5
	Residuales	Moderadamente activa	8.450,8
	Relieves suaves complejos	Moderadamente activa	28.097,0
	Flanco de Valle Activo	Muy Activa	8.030,2
	Intrusivas Magmáticas	Activa	3.382,8
	Excavación (Alvéolo)	Muy activa	
FORMAS DE BASE O DE CONTACTO (16.076 háas) 12%	Conos aluviales	Pasiva	16.076,3
	Conos coluviales	Activa	
FORMAS DE FONDO DE VALLE (54.288 háas) 40%	Terraza Pleistocénica	Pasiva	9.389,8
	Terraza Fluvial Antigua	Pasiva	4.865,1
	Terraza de Cineritas	Pasiva	31.296,5
	Terraza T´	Activa	2.163,1
	Lecho torrencial	Muy activa	6.573,3

Fuente: Elaboración propia en base a ARAYA-VERGARA (1985), y SOTO *et al.*, (2006)

Figura 20: Carta Geomorfológica, Comuna de Melipilla



4.2.3 Topografía

La topografía se caracteriza, según CASANOVA, *et al.*, (2004), por los ángulos de las pendientes y la longitud y formas de las mismas.

En este sentido la topografía es un importante factor para determinar la erosión del suelo, las prácticas de control de la erosión y las posibilidades de labranza mecanizada del suelo, lo cual influye directamente sobre la aptitud agrícola de éste. LUZIO y CASANOVA (2006), mencionan que el relieve, como factor de formación de suelos, tiene su papel más importante en la distribución del agua en el interior de este, de tal manera que los patrones de distribución de los suelos en el paisaje seguirán una relación catenaria, lo cual permite describir y predecir la ocurrencia de determinados suelos.

Siguiendo con lo estipulado, se indica una relación directamente proporcional entre el ángulo de la pendiente del terreno, con respecto a la erosión del suelo, ya que se expresa en un aumento de escorrentía superficial. Considerando este antecedente, es importante mencionar la división según tipo de pendientes y los rangos asociados, que indica CIREN-CORFO (1996), y considerar posteriormente su representatividad a nivel de superficie al interior de la comuna de Melipilla.

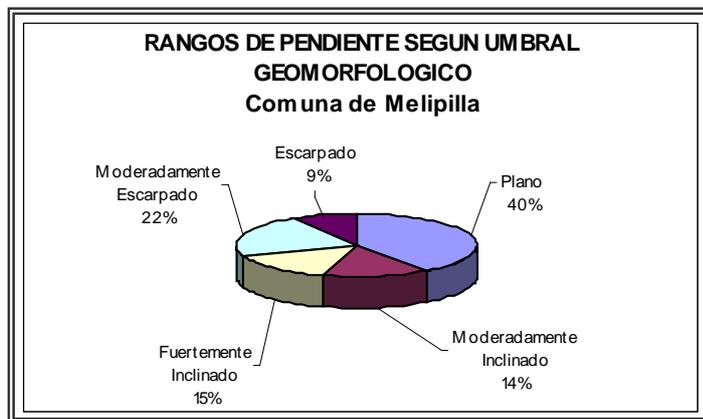
4.2.3.1 Rangos de Pendientes

Al interior de la comuna, se observa que hay un predominio areal de pendientes *planas* o *casi planas*, cubriendo el 40% del área de estudio. Estos sectores poseen rangos de inclinación que varían de 0° a 3°, y se relacionan con sectores de fondo de valle en donde se aprecian depósitos regulares que si bien están compuestos por materiales recientes y no consolidados, estos no se ven activados por efecto de la gravedad, por lo cual se mantienen estables. Esta superficie, por ende, ha sido la base para el desarrollo de la pedogénesis y el funcionamiento de los procesos internos que conforman los suelos, en unidades geomorfológicas de *terrazas fluviales* y *terrazas de cineritas*, encontrándose condiciones que no favorecen en mayor medida la erodabilidad.

En segundo lugar, se aprecian laderas de tipo *moderadamente inclinadas* (3°-8°) y *fuertemente inclinadas* (8°-15°), que en su conjunto reúnen el 29% de la superficie comunal. Los procesos que se generan de acuerdo a estos rangos de pendientes se relacionan con la aparición incipiente de erosión, los cuales se ven aún más incididos en pendientes *moderadamente escarpadas* (15°-25°) donde hay procesos de erosión intensivos ligados a deslizamientos de laderas. Finalmente, con un 9% se sitúan las laderas de tipo *escarpadas*, con predominio de fuertes procesos denudacionales, en pendientes que van desde los 25° a 45° ubicadas en el sector SE de la comuna.

A continuación, se resumen los porcentajes, de acuerdo al siguiente gráfico (Fig. 21):

Figura 21: Superficie a nivel comunal de los tipos de pendiente, Comuna de Melipilla



Fuente: CIREN-CORFO (1996), y ARAYA-VERGARA (1972)

La caracterización de la susceptibilidad erosiva según pendiente se resume en la Tabla 27, donde se revela la correlación existente entre las formas del relieve y los procesos que se desencadenan a ciertos umbrales.

Aunque normalmente, como lo señala MORGAN (1993), se podría esperar que aumente la erosión al aumentar la inclinación y longitud de la pendiente, como resultado del incremento de la velocidad y volumen de la escorrentía superficial, no se debe dejar al margen el hecho de que en una superficie plana las gotas de lluvia salpican las partículas del suelo aleatoriamente en todas direcciones.

Las pendientes planas, cuyas gradientes varían de 0° a 3° , son las que prevalecen al interior de la comuna por sobre las demás (70.190 hás), y se asocian a niveles de erodabilidad *muy bajos*, en este sentido la erosión es casi nula, lo cual no presenta limitaciones para los cultivos.

A los 3° de inclinación de la pendiente, ya empiezan a desarrollarse procesos de erosión lineal, en donde junto al impacto de las precipitaciones en un determinado sector, se genera un lavado superficial de las partículas del suelo. En Melipilla, este proceso se genera en laderas *moderadamente inclinadas*, por lo cual los rangos de erodabilidad no son tan significativos.

En la comuna, hay 22.950 hás que presentan superficies de tipo *inclinadas*, y cuyos rangos de erodabilidad son *moderados*. En estas laderas el impacto de la gota de lluvia es tal, que la erosión lineal da paso a la formación de surcos y cárcavas. Según CASTRO (1990), al interior de la cárcava son frecuentes los derrumbes en paquete de materiales provenientes de las paredes verticales, que evolucionan paralelamente. Esto indica que la cárcava no solo se desarrolla por efecto del escurrimiento del agua, sino también por fenómenos de gravedad que contribuyen al ensanchamiento de la misma.

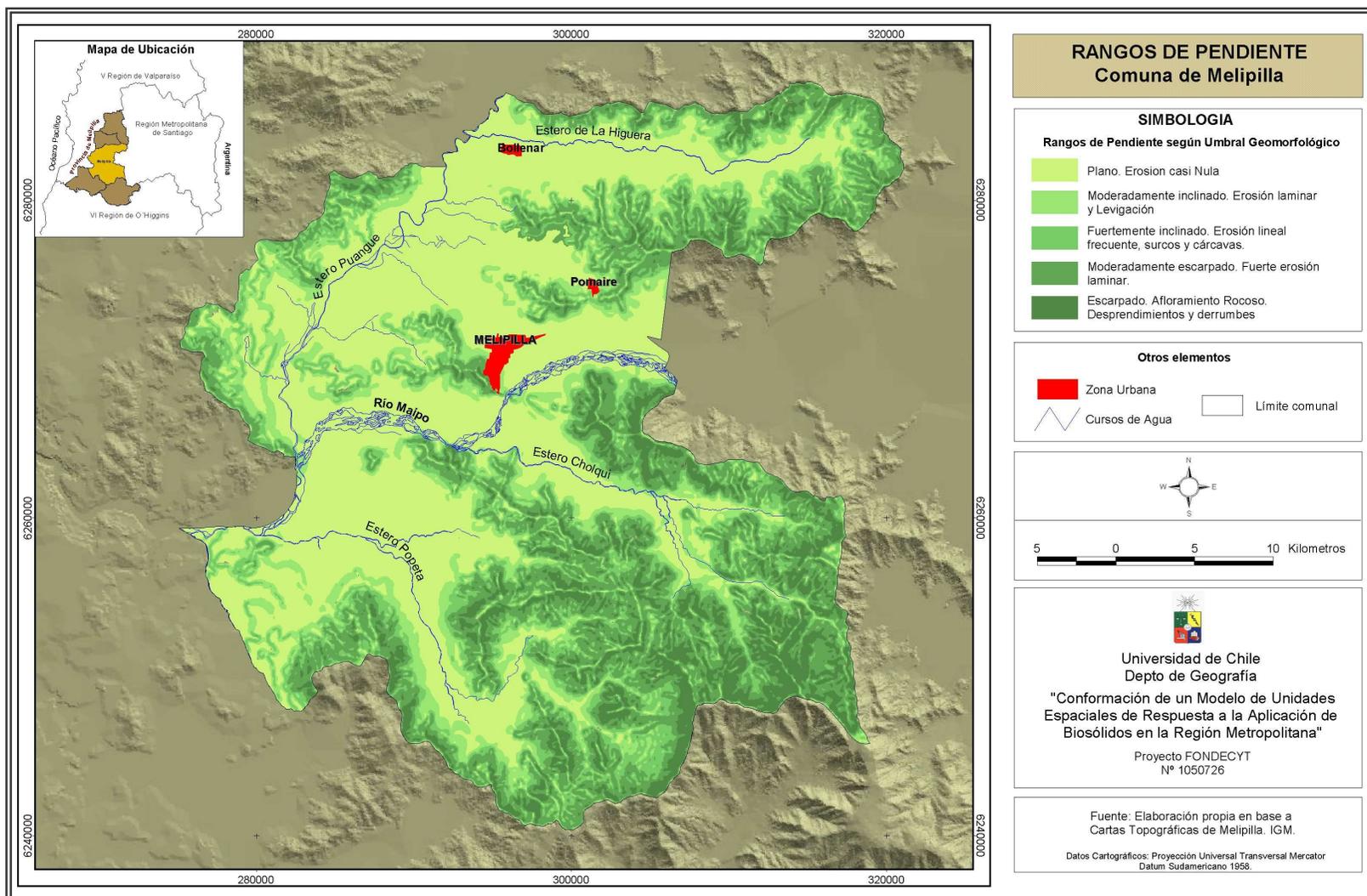
Los niveles críticos (*alto* y *muy alto*) de erodabilidad, se encuentran en laderas con grados de inclinación que oscilan entre los 8° a 45° , las cuales reúnen 17.000 hás. La erosión laminar y lineal que se genera en estos sectores, trae como consecuencia directa deslizamientos en masa con fuertes procesos denudacionales asociados, y afloramiento de la roca fundamental que inhibe la formación de suelos.

Tabla 27: Pendiente y caracterización geomorfológica, Comuna de Melipilla

PENDIENTE (°)	DENOMINACION	DESARROLLO EROSION	SUPERFICIE (HAS)	NIVELES DE ERODABILIDAD
0-3	Plano	Erosión casi nula, sin problemas para cultivos	70.910	Muy bajo
3-8	Moderadamente inclinado	Empieza erosión laminar. Levigación en forma de sheet wash y rill wash. Posibilidad de cultivos.	23.330	Bajo
8-15	Inclinado	Erosión lineal frecuente. Surcos y cárcavas, posibles movimientos en masa. Se recomienda cultivos en terraza.	22.950	Moderado
15-25	Fuertemente inclinado	Fuerte erosión laminar, lineal y deslizamientos en masa. Solo cultivos en terraza.	13.160	Alto
25-45	Moderadamente escarpado a escarpado	Afloramiento rocoso. Fuerte erosión. Dominio de procesos de gravedad. Solo la forestación es posible.	3.840	Muy Alto

Fuente: Elaborado en base a ARAYA VERGARA Y BORGEL (1972)

Figura 22: Rangos de Pendiente, Comuna de Melipilla



4.2.4 Exposición a la Precipitación

La exposición a la precipitación, dice relación con la presencia del relieve frente a las masas de aire húmedas provenientes del Océano Pacífico, en donde el relieve actúa como biombo climático, lo cual se relaciona al efecto Foëhn.

Este factor, según LUZIO y CASANOVA (2006), está relacionado con la cantidad de radiación solar que recibe la superficie del suelo, siendo los efectos más pronunciados en áreas de pendientes fuertes que en terrenos planos, manifestándose en cambios de las propiedades de los suelos.

Si el relieve tiene una disposición transversal o normal a la dirección de los vientos y por ende a las masas de aire húmedas, hay cambios, y se generan condiciones de mayor humedad que en la vertiente opuesta. Esta característica es típica de las vertientes de *barlovento*, que enfrentan el choque de frentes de precipitación en sus laderas por lo que están más sometidos a este agente de agresividad, lo cual influye en el desgaste del relieve, y en una mayor erodabilidad del área. Es efectivamente este tipo de exposición la predominante en la comuna, con un 52%.

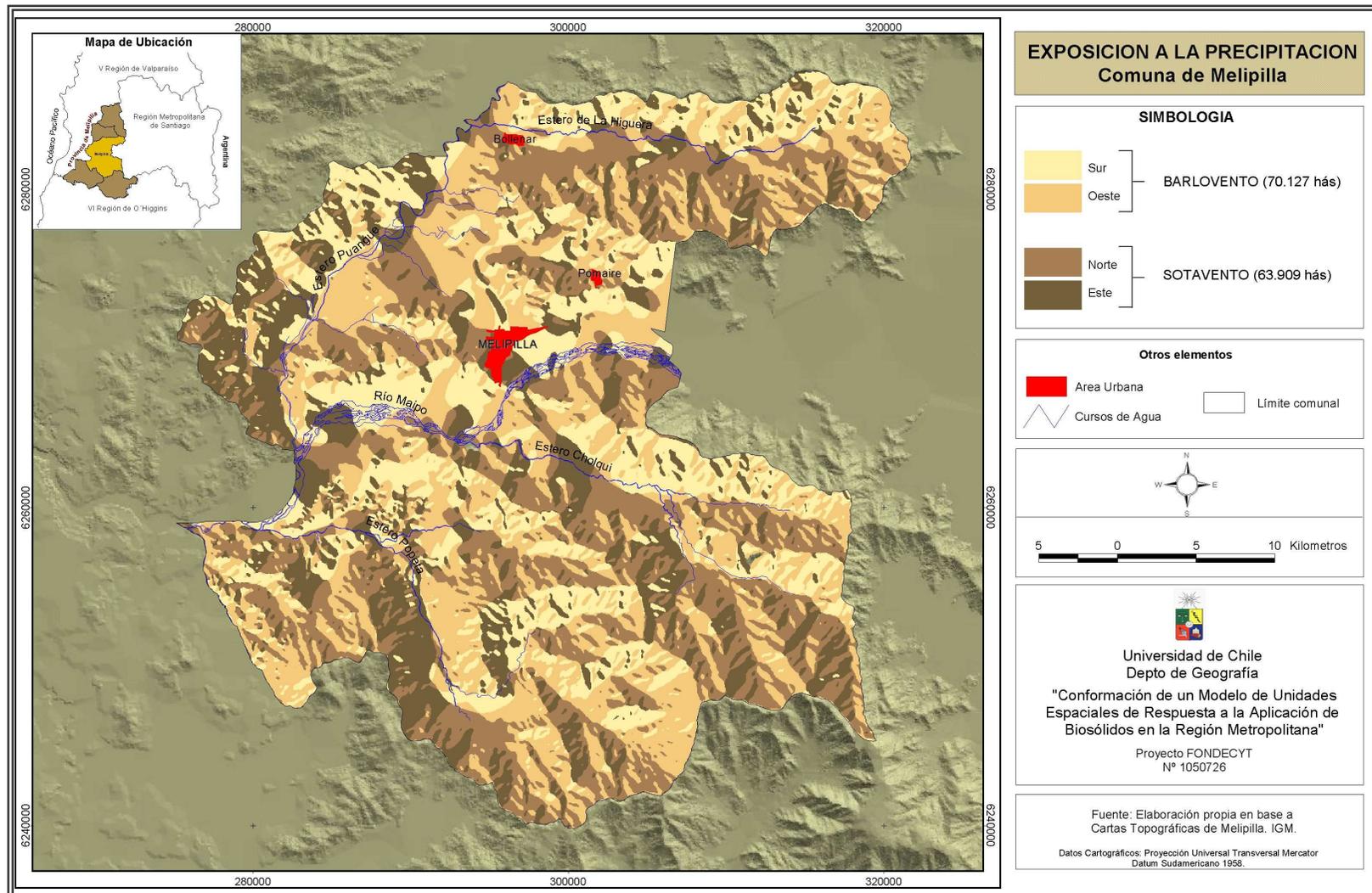
Por su parte, la vertiente de *sotavento*, que es la ladera opuesta a los frentes húmedos, si bien en estos llueve, no reciben la influencia directa de la precipitación, por lo que tienden a ser más secos y se asocian a condiciones de abrigo. La superficie abarcada es de un 48%, y tiene rangos de erodabilidad bajos.

Tabla 28: Superficie comunal por exposición de las laderas, Comuna de Melipilla

TIPO DE EXPOSICION	SUPERFICIE (HAS)	NIVELES DE ERODABILIDAD
Sotavento	63.909,1	Bajo
Cenital	*****	Medio
Barlovento	70.127,5	Alto

Fuente: Elaboración propia en base a FERNÁNDEZ (2006)

Figura 23: Exposición a la Precipitación, Comuna de Melipilla



4.3 CUBIERTA VEGETACIONAL

El rol que cumple la vegetación, entendido como otro de los agentes externos que influye en la generación de la erodabilidad del sistema suelo, presenta beneficios si se encuentra cubriendo densamente parte de un área, ya que como lo menciona FOURNIER (1975), es muy importante contra el batido del suelo y la destrucción de su estructura en superficie. Pero las vegetaciones permanentes, praderas y bosques, juegan, por otra parte, un papel fundamental por la de modificación y mejoramiento de la estructura del suelo por sus sistemas de raíces.

Considerando las capacidades que posee la cubierta vegetal sobre una superficie determinada, es que se ha utilizado el Índice Normalizado de Diferencias Vegetacionales (NDVI), para dar cuenta de la productividad vegetal del área de estudio, de acuerdo a los contenidos de clorofila existentes en las hojas y los niveles de biomasa, con el fin de comprobar las diferencias de densidad vegetacional que amortiguan y protegen el suelo, de los agentes erosivos, tales como la precipitaciones, la radiación, el viento, y los movimientos en masa.

Así, se generaron siete categorías (Tabla 29), cuyos tres primeros niveles dan cuenta de superficies sin cobertura vegetal o escasa presencia de vegetación. El nivel cuatro, es identificado mediante el sensor por la existencia de suelo o *limite de suelo*; y el resto, establece la presencia de coberturas vegetales significativas alcanzando altas densidades vegetales.

Se observa, que al interior de la comuna, hay un 38% de superficie que posee una densidad vegetacional crítica puesto que no presenta niveles reconocibles de biomasa; de este porcentaje, hay aproximadamente 33.000 hás que se identifican con *agua y roca*, en donde se evidencia un desmantelamiento de la vegetación natural, afloramiento de batolito que no presenta una cubierta edáfica que sustente follaje o espesura vegetal, presencia de cursos de agua, o que también no presenta vegetación por la estación del año de la imagen analizada (agosto) que puede verse modificada en otro periodo del año. Todas estas condicionantes inciden en el desarrollo de *alta y muy alta* erodabilidad al interior de la comuna.

Es destacable señalar, que hay una importante superficie que ha sido destinada a explotación agropecuaria en esta área, y ha sido definida por QUINTANILLA (1993), como *Sectores Sin Vegetación Nativa bajo diversos grados de artificialización en la Región Mediterránea*, lo cual ha conformado la base para el desarrollo de actividades económicas extractivas, con primacía en la agricultura y ganadería, localizándose preferentemente en sectores dispersos, pero que armonizan con condiciones propicias para la implantación de cultivos, tales como pendientes suaves, suelos incipientes con niveles exigüos de materia orgánica. No obstante, la presencia importante de población en el centro de la comuna, y el surgimiento de diversos asentamientos, ha favorecido la expansión de los límites urbanos, lo cual ha influido en el desarrollo de infraestructura vial, y en el despeje y reducción de áreas con cubierta vegetal.

Por otro lado, hay preponderancia de superficies cubiertas con altas densidades de vegetación en sectores con gradientes elevadas y de más difícil acceso, representando el 53% de la comuna (46.227 hás), y reconocidos por QUINTANILLA (1993), como pertenecientes al *Piso Submontañoso Húmedo Invernal*, con formaciones de *matorral claro esclerófilo mesomórfico*. Esta cobertura conforman una fuente directa de cúmulo de materia orgánica que al descomponerse acentúa la actividad de microorganismos del suelo enriqueciéndolo y contribuyendo en la Pedogénesis, y en la formación de los horizontes del suelo.

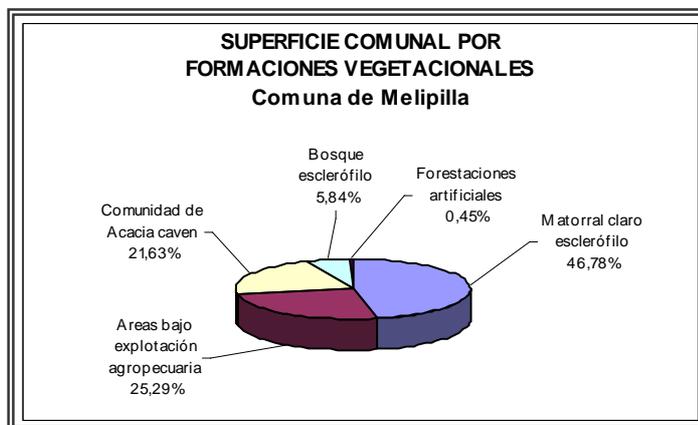
Tabla 29: Categorías de NDVI, Comuna de Melipilla

INDICE	RECLASIFICACION	DENSIDAD VEGETACIONAL	SUPERFICIE (HÁS)	NIVELES DE ERODABILIDAD
1	< (0.75)	Agua y Roca	32.998,5	Muy alta
2	(-0.75) - (-0.45)	Suelo desnudo < MO	854.3	Alta
3	(-0.45) – (-0.15)	Suelo desnudo > MO	153.4	
4	(-0.15) – 0.15	Limite del suelo	172.5	Moderada
5	0.15 – 0.45	Densidad Baja	2.865,0	Baja
6	0.45 – 0.75	Densidad Moderada	5.516,4	
7	> 0.75	Densidad Alta	46.226,7	Muy Baja

Fuente: Elaboración propia en base a CHUVIECO (2002), y YOKENS (2001)

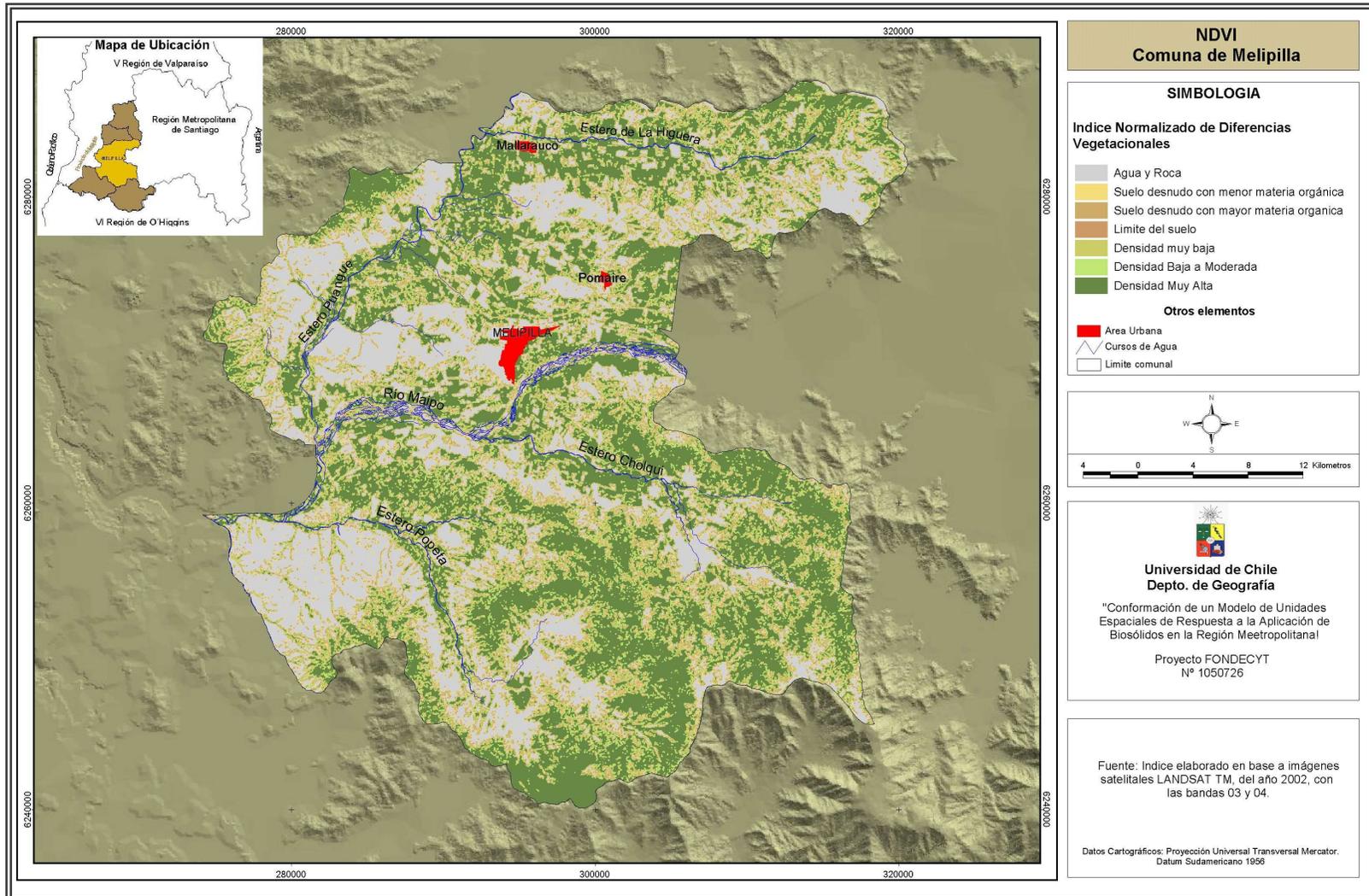
Las Formaciones vegetales existentes en la comuna de Melipilla de acuerdo con QUINTANILLA (1987), se configuran de acuerdo al siguiente gráfico (Fig. 24), en donde, como se menciono anteriormente el grupo que posee mayor superficie es el de *matorral esclerófilo* (46.78%), le siguen aquellas *áreas bajo explotación agropecuaria* (25.29%), una importante superficie cubierta con comunidades de *Acacia caven*, en tercer lugar, y reuniendo menos del 7% un parche de *Bosque esclerófilo* (5.84%), y forestaciones artificiales de *Eucaliptus globulus* y *Pino radiata*, con 0.45%.

Figura 24: Formaciones Vegetales, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaborado en base a QUINTANILLA (1993)

Figura 25: NDVI, Comuna de Melipilla



Las componentes del medio natural que actúan como agentes erosivos, han sido abarcados desde niveles macro, destacándose las condiciones climáticas del área de estudio, los procesos gravitacionales generados por la gradiente del terreno, la composición litológica de los materiales y su geodinámica, y finalmente la cobertura vegetal.

En un nivel integrado, los procesos exógenos subaéreos del modelado del relieve reflejan que el sistema natural del área de estudio posee niveles vulnerables, lo que incide en una mayor susceptibilidad de terrenos a ser afectados por la erodabilidad (Fig. 26).

De acuerdo a las características climáticas de la comuna de Melipilla, se distingue que el régimen e intensidad de precipitaciones posee condiciones favorables para el surgimiento de procesos de erodabilidad, ya que una importante superficie, alrededor de 82%, presenta niveles de agresividad del clima alarmantes, con categorías de *alto* y *muy alto* en 111.640 hás; el resto, 17.6% equivalente a 24.003 hás, esta dentro de niveles *moderados*.

A un nivel más local, las tendencias de erodabilidad y vulnerabilidad de los terrenos con exposición *barlovento* son igualmente considerables, puesto que el 52% de la superficie comunal presenta laderas que reciben una mayor radiación, lo cual ha generado ambientes secos y suelos pobres en materia orgánica. La erodabilidad por tanto, es *alta* en estos sectores.

Las pendientes al interior del área de estudio, son predominantemente superiores a los 15° alcanzando, en sectores con mayor altitud y que marcan el fin del límite comunal, los 45°, favoreciéndose la caída libre de materiales geológicos inestables, ya que se ha superado el umbral de equilibrio de la gradiente generándose erodabilidad en estas zonas. Aparte de esto, los procesos geomorfológicos vinculados a estructuras antiguas en términos de datación geológica (Cretácico-Jurásico), le asignan a estos sectores un estado de fragilidad natural, ya que hay preponderancia de *sistemas de vertientes* con una marcada geodinámica activa sobre materiales graníticos intrusivos sometidos a efectos cataclásticos y a alteraciones de la roca fundamental, con potencial aporte sedimentario; y la presencia, en zonas más bajas, de formas basales, como conos coluvio-aluviales que son elementos indicativos de la geodinámica externa.

Finalmente, la cubierta vegetal existente en la comuna de Melipilla, es indicadora de que sobre estas superficies, con las condiciones mencionadas, no posee mayor representación que de alguna forma pudieran amortiguar el impacto de las precipitaciones. Esto por tanto, deriva en una menor capacidad de infiltración, que tiende a escurrir aguas abajo, arrastrando materiales y desgastando las laderas, ya que como lo menciona SUAREZ DE CASTRO (1980), el tamaño y la cantidad de material que el flujo superficial puede arrastrar o llevar en suspensión, depende de la velocidad con que esta fluye, la cual a su vez, es resultado de la longitud y pendiente del terreno. El grado de erodabilidad asociado a la vegetación, es por consiguiente *alto* y *muy alto*, impidiendo o dificultando a su vez, la formación de unidades pedológicas que tenderían a estabilizar el terreno, y evitar la erodabilidad del área.

5. FACTORES DE EROSIONABILIDAD

5.1 UNIDADES EDAFICAS

Las variables físico-naturales contempladas en el apartado anterior, subrayan el contexto edafológico que posee la comuna de Melipilla, con lo cual es ineludible considerar la influencia ejercida por los diversos factores de formación como la geomorfología, el clima, los organismos, la topografía y el tiempo.

El suelo es el producto sintético final derivado de las componentes del medio natural, por lo cual es necesario considerar las características físicas, químicas y biológicas de este, ya que es una entidad que evoluciona conservada en un flujo de materiales geológicos, biológicos, hidrológicos y meteorológicos. Los cuerpos de suelos individuales y sus correspondientes horizontes individuales juegan papeles diferentes debido a la distribución desigual de materiales (BUOL, 1990).

Por tanto, es necesario identificar las series de suelo presentes en la comuna de Melipilla, estableciendo las relaciones existentes con otras componentes del medio físico-natural, ya que según BUCKMAN, y BRADY (1993), un suelo silíceo, un suelo arcilloso y un suelo margoso, son ejemplos de suelos específicos que, conjuntamente, se complementan para formar el suelo que cubre grandes extensiones de terreno.

5.1.1 Origen de suelos de la comuna de Melipilla

El aspecto morfológico del terreno, junto a las características constitutivas del sustrato geológico, y la naturaleza geomorfológica, indican que los suelos formados en la comuna de Melipilla son parte de siete grandes unidades definidas según CIREN-CORFO (1996), como orígenes, *granítico*, *aluvial*, *aluvio-coluvial*, *aluvio-granítico*, *lacustre*, *andesítico*, y *coluvial* (Fig. 27).

De todos los identificados, sobresalen aquellos suelos de origen *granítico*, que se localizan cubriendo el 61% de la superficie de la comuna (77.769 hás), ubicados en sectores con pendientes fuertes en cordones de cerros, cuya naturaleza litológica es de rocas intrusivas jurásicas y cretácicas con predominio de *granitoides* (granodioritas y dioritas), que presentan diversos grados de alteración del material. Esto se complementa con la información de ARAYA-VERGARA (1966), que indica que la acción climática del pasado, las rocas o gran parte de los minerales del Batolito Costero (como el feldespató, en el caso de la familia de los granitos), presentan alteraciones que pueden alcanzar varios metros de profundidad. Esta alteración es consecuencia de una serie de procesos tales como: arenización de la roca; descomposición esferoidal concéntrica; desintegración esferoidal y diaclasamiento. Los granitos y granitoides se encuentran afectados profundamente por procesos de arenización. Esta misma desagregación del material original ha permitido que los suelos asociados presenten una gran cantidad de poros en su masa, siendo favorable la permeabilidad e infiltración del agua.

En segundo lugar, se encuentran los suelos de origen *coluvial*, con un 21%, y que se ubican en posición de fondo de valle. Estos se han formado a partir de la existencia de *terrazas de cineritas*, que geológicamente corresponden a los depósitos de *Ignimbrita Pudahuel*, caracterizadas por poseer un amplio sector con material piroclástico y de ceniza depositado por la explosión del Volcán Maipo, ubicado en la cordillera andina de la Región Metropolitana, por lo

cual se puede establecer de manera indirecta, la magnitud de la explosión, y la distancia alcanzada por los materiales y proyectiles de origen volcánico.

Con un 10% de la superficie comunal (12.556 hás), se encuentran los suelos de origen *aluvial*, y que se ubican bordeando los principales cursos de agua de la comuna, tales como el río Maipo, el estero Popeta, estero Cholqui, etc. Estos se han formado por efecto de la existencia de sedimentos no consolidados, en posición de terrazas fluviales pleistocénicas, compuestas generalmente por materiales de diversas categorías granulométricas, como gravas, arenas, limos, etc.

Por otra parte, con un 3% para cada uno se encuentran suelos cuyo origen es de tipo *lacustre* y *aluvio coluvial*. En el primer caso, y cubriendo una superficie de 3.719 hás, estos suelos se ubican por lo general en posición de pendientes bajas, y se caracterizan por poseer problemas de drenaje, ya que la confluencia de cursos de agua menores como quebradas permanentes en el área de Mallarauco, saturan la zona generando suelos con características hidromórficas, ya que los materiales predominantes son por lo general finos, encontrándose limos y arcillas.

Para suelos de origen *aluvio-coluvial*, que poseen 3.717 hás al interior de la comuna, los materiales no están consolidados y poseen diversas categorías granulométricas, los cuales se asocian a *depósitos fluviales antiguos* en posición geomorfológica de *terraza pleistocénica*.

Finalmente, con 1% de representación comunal se encuentran los suelos de origen *aluvio-granítico* ligados a la unidad geológica denominada *Estratos de Potrero Alto*, ubicados en un reducido sector al poniente de la comuna; los suelos *andesíticos*, por su parte, también reúnen el 1% de la comuna, y se ubican en el único sector con pendientes escarpadas de la comuna, al SE.

A continuación (Tabla 30), se especifican las características y porcentajes de superficie que cubren los distintos orígenes de suelo, de acuerdo a lo siguiente:

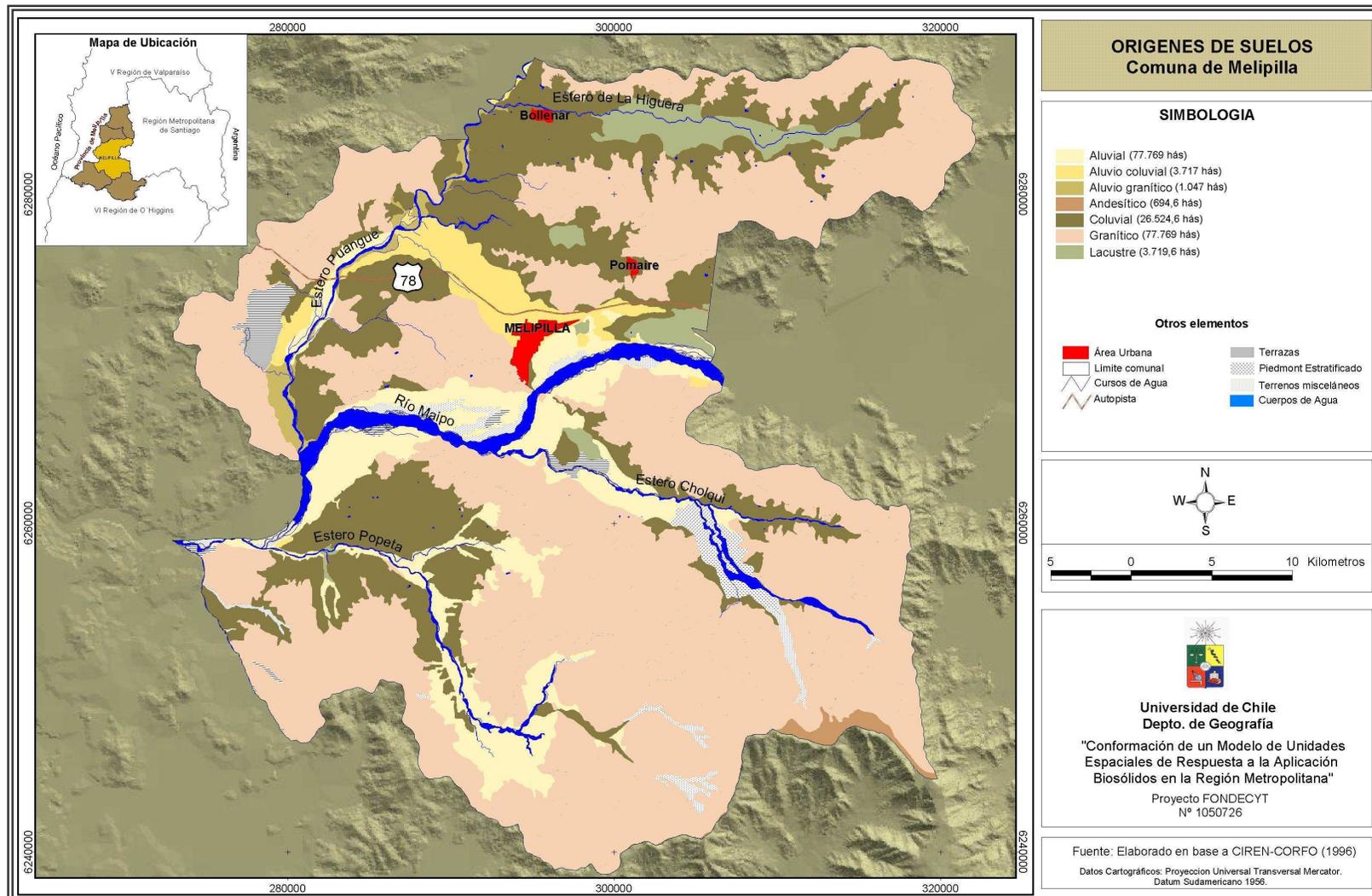
Tabla 30: Características morfológicas y orígenes de suelo, Comuna de Melipilla

UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	UNIDADES GEOLOGICAS	COMPOSICION LITOLOGICA	TOPOGRAFÍA (PENDIENTE)	ORIGEN UNIDADES EDAFOLOGICAS	SUPERFICIE (HÁS)
Sistema de Vertientes	Rocas Intrusivas	Clastos graníticos; granodioritas de anfíbola y biotita y cuerpos dioríticos	Moderadamente a Fuertemente inclinado	Granítico	77.769,5
Terrazas	Depósitos no consolidados	Sedimentos	Plano	Aluvial	12.556,4
Vertientes Residuales	Rocas intrusivas	Pórfido andesítico, plagioclasa	Escarpado	Andesítico	694,6
Terraza Pleistocénica	Depósitos fluviales antiguos	Gravas, arenas, limos	Plano	Aluvio coluvial	3.717,0
Terraza Pleistocénica	Estratos Potrero Alto	Conglomerados, areniscas, limolitas	Moderadamente inclinado	Aluvio granítico	1.047,9
Terrazas cineritas	Ignimbrita Pudahuel	Material Piroclástico y cenizas	Plano	Lacustre	3.719,6
Terrazas cineritas	Ignimbrita Pudahuel	Material Piroclástico y cenizas	Plano	Coluvial	26.524,6

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Considerando que gran parte de la superficie de la comuna cuenta con diversos orígenes que ya fueron tratados, a continuación se señalarán las principales características físicas, químicas y biológicas que poseen las series de suelo de la comuna de Melipilla, y el grado de susceptibilidad erosiva que poseen, mencionándose variables tales como su color, textura, estructura, pH, materia orgánica etc.

Figura 27: Orígenes de suelos de comuna de Melipilla



5.1.2 Características de las Series de Suelo

Al interior de la comuna de Melipilla, existen 28 series de suelo, que cubren una superficie comunal del 94% (Fig. 28), de las cuales destaca por su mayor representatividad a nivel comunal, la serie *Lo Vásquez* (LVZ), con 56.000 hás, equivalente al 48.44% de la comuna. Ésta, es un miembro de la *Familia franca fina, mixta, térmica de los Ultic Haploxeralfs (Alfisol)*, son suelos moderadamente profundos a profundos. Posee una textura franco arcillo arenosa en superficie y arcillosa en profundidad; y su color es pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR variando a pardo amarillento oscuro en el matiz 7.5YR.

Otra serie de suelo destacable al interior de la comuna, con 17.29% (21.774 hás), es la *Asociación Mansel* (MN), que al igual que la serie *Lo Vásquez*, es miembro de la *Familia franca fina, mixta; pero pertenece a los Typic Xerochrepts*, cuyo orden es Inceptisol. Posee una textura superficial franco arcillo limosa y color pardo oscuro en el matiz 7.5YR; de textura franco arcillosa y colores pardo fuerte en el matiz 7.5YR a pardo rojizo y rojo amarillento en el matiz 5YR en profundidad.

Con un 12.07%, equivalente a 15.995 hás, se encuentra la serie *Pudahuel* (PUD), que es miembro de la *Familia franca gruesa, mixta de los Vitradic Durixerolls*, perteneciente al orden de los Mollisoles. Se caracteriza por presentar suelos ligeramente profundos, con un horizonte superficial de color pardo oscuro en matices 10YR ó 7.5YR y textura moderadamente gruesa, a diferencia del horizonte más profundo que presenta un duripán de color pardo pálido en matiz 10YR, textura gruesa o moderadamente gruesa, no estructurado.

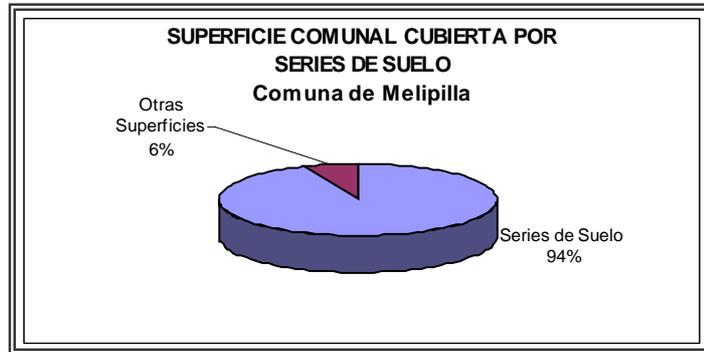
Las series de suelo con menor representatividad a nivel comunal, corresponden a las series *Puangue* (PUG), *Los Cardenales* (CRD) y *Chiñihue* (CHG), que en su conjunto reúnen sólo 179.7 hás (1.4%).

La serie *Chiñigue* (88.9 hás), es un miembro de la *Familia franca fina sobre arenosa squeletal, mixta, térmica de los Fluventic Haploxerolls (Mollisol)*. Son suelos moderadamente profundos cuyo horizonte A presenta un color negro en el matiz 10 YR ó 5YR, y una textura franca a franco arcillosa. Por su parte el horizonte IIIC2, el más profundo, está constituido por un sustrato de gravas de piedras con 30% de matriz franco arenosa fina, de color pardo grisáceo oscuro.

Los Cardenales, es un miembro de la *Familia limosa fina, mixta, térmica de los Fluventic Haploxerolls (Mollisol)*, y posee suelos profundos. Su horizonte A es de color pardo muy oscuro (10 YR) y de textura franca; en cambio el horizonte IIC2, es de color pardo grisáceo muy oscuro en el matiz 10YR; textura franco arcillo limosa y ligero contenido de gravas subangulares.

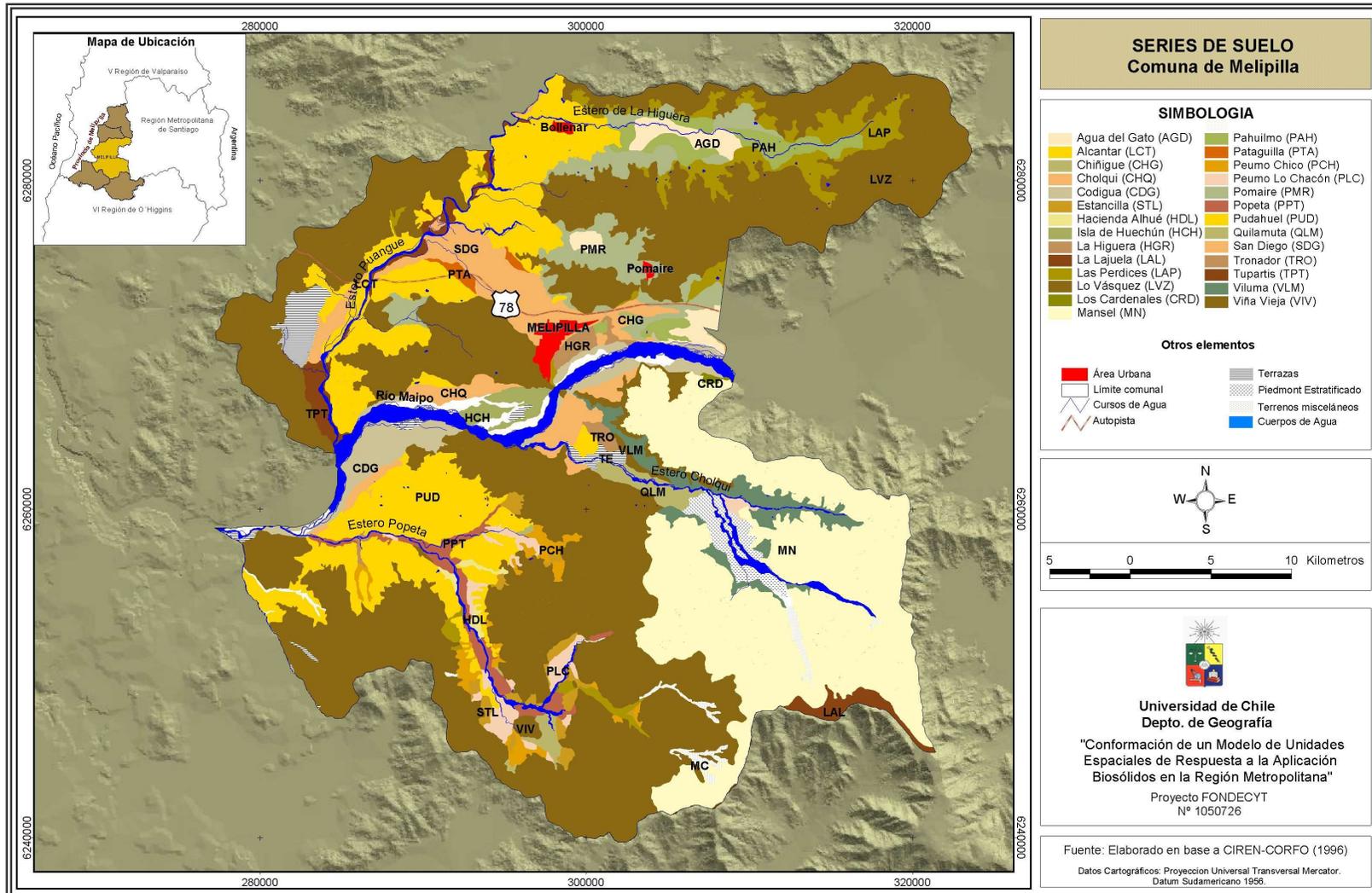
Las otras series de suelo presentes en la comuna corresponden a: *Pomaire* (PMR), *Las Perdices* (LAP), *San Diego* (SDG), *Codigua* (CDG), *Viluma* (VLM), *Pahuilmo* (PAH), *Cholqui* (CHQ), *Agua del Gato* (AGD), *Popeta* (PPT), *Peumo Lo Chacón* (PLC), *Peumo Chico* (PCH), *Tupartis* (TPT), *Quilamuta* (QLM), *Estancilla* (STL), *Isla de Huechún* (HCH), *Alcantar* (LCT), *Viña Vieja* (VIV), *La Higuera* (HGR), *La Lajueta* (LAL), *Tronador* (TRO), *Pataguilla* (PTA) y *Hacienda Alhué* (HDL), las que se observan en la Fig. 29.

Figura 28: Representatividad de las series de suelo, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaboración propia en base a CIREN-CORFO (1996)

Figura 29: Series de Suelo, Comuna de Melipilla



5.1.3 Textura superficial de suelos

La textura de un suelo es una de sus características morfológicas más importantes, y dice relación con la distribución del tamaño de las partículas que lo constituyen, relacionada con el material originario y su composición (CONAMA, 1994).

Los suelos de la comuna de Melipilla poseen diversas clases texturales, en donde las más representativas corresponden a suelos del tipo *francoso*, cubriendo un 93% del área de estudio se localizan preferentemente en zonas de fondo de valle y en sectores de pendientes fuertes. Estos suelos, se caracterizan por poseer una mezcla de partículas de arena, limo calcáreo y arcilla que exhiben propiedades ligeras y pesadas casi en iguales proporciones (BUCKMAN y BRADY, 1993).

Muy por debajo de este porcentaje (Fig. 30), se encuentran suelos arenosos, que cubren solo el 0.52% de la superficie comunal, y que se ubican preferentemente al centro de la comuna, en posición geomorfológica de terraza fluvial, los cuales se caracterizan por permitir el drenaje fácilmente desde la superficie al interior del perfil de suelo, por el amplio espacio poroso que poseen, pero que a su vez impide que las plantas puedan retener el agua para subsistir, ya que como menciona (BUCKMAN y BRADY, 1993), estos son con frecuencia demasiado sueltos y abiertos y faltos de capacidad para adsorber y guardar suficiente humedad y nutrientes.

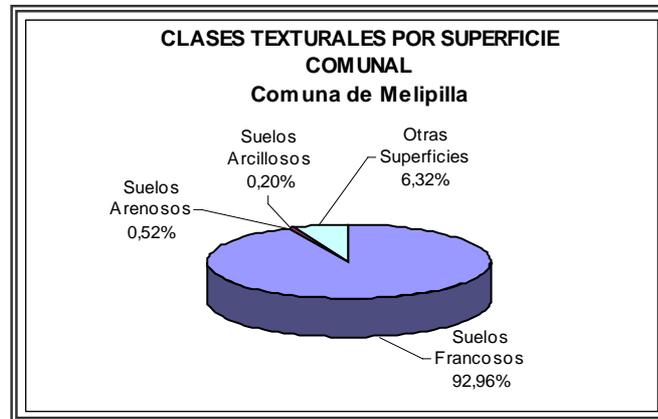
VERA (1998) también señala, que las clases texturales extremas como en el caso de las arenosas, determinan suelos con las siguientes características:

- Buena conductividad hidráulica
- Baja capacidad de retención de humedad
- Bien aireado
- Bajo contenido de nutrientes
- Baja capacidad de adsorción

Por el contrario, en los suelos arcillosos, ubicados en una reducida superficie al SE de la ciudad de Melipilla (cobertura menor al 1%), se da la situación inversa, ya que los poros son demasiado pequeños y actúan como tapón impidiendo la percolación del agua, lo cual se debe principalmente a que la estructura molecular de la arcilla se expande o hincha con este elemento, generándose un suelo con condiciones impermeables, y por ende, con limitaciones al drenaje. Por consiguiente, el suelo que tenga un elevado contenido en arcillas y limos dificultará la penetración de las raíces a través del perfil.

Finalmente, con alrededor de un 7% se distinguen otras superficies, como misceláneos, terrazas, área urbana, etc, que no se han considerado para efectos de este análisis.

Figura 30: Clases Texturales y Superficie Comunal, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

De las clases texturales analizadas, se deben considerar los rangos de erosionabilidad que poseen cada una de ellas (Tabla 31), ya que los tamaños y compuestos de las partículas, reaccionan de distinta forma frente a los agentes erosivos. De acuerdo a esto, aquellas texturas catalogadas como *arenosas* o *areno francosas* poseen una *muy alta* susceptibilidad a la erosión, debido a que las fracciones gruesas de suelo están desagregadas, lo que genera menores posibilidades de fusión o cohesión de las partículas. Al interior de la comuna de Melipilla, existe sólo una serie de suelo con este tipo de características, la que corresponde a *Isla de Huechún* ubicada al centro de la comuna, específicamente en un reducido sector al norte del río Maipo (702 hás), que junto al efecto de la divagación de este cauce natural y las condiciones de baja pendiente en que se encuentra, permite que la depositación de arenas en su lecho.

La textura *franco arenosa* por su parte, también posee una erosionabilidad *alta*, y cuatro series de suelo se identifican con tales características, *Las Perdices*, *Pudahuel*, *Estancilla*, y *Puangue*, las que se asocian a formas de contacto en el sector NE de la comuna, en los faldeos de los cerros del cordón de Mallarauco, y al SW donde se encuentra el estero Popeta. En total reúnen 4772 hás.

Los rangos *moderados* de erosionabilidad, se relacionan con cuatro clases texturales, de las cuales tres están dentro de la comuna, estas son las texturas *franco arenosa fina*, y *muy fina*; *franca* y *franco limosa* que en su conjunto poseen una superficie total de 34.925 hás, pertenecientes a 13 series de suelo.

A medida que disminuye el tamaño de las partículas de suelo, también se reduce la generación de erosionabilidad, alcanzando niveles bajos y muy bajos. En el caso de suelos con texturas *franco arcillosa*, *franco arcillo arenosa*, y *franco arcillo limosa*, se diferencian 9 series de suelo, que cubren la mayor parte de la superficie comunal, con 85.336 hás.

La serie Tronador, ubicada en una pequeña sección areal al SE de la ciudad de Melipilla (272 hás), posee una textura de tipo *arcillosa* con menores probabilidades de ser sometida a procesos de erosión, pero que presenta otros inconvenientes en términos de permeabilidad e infiltración de agua en el terreno.

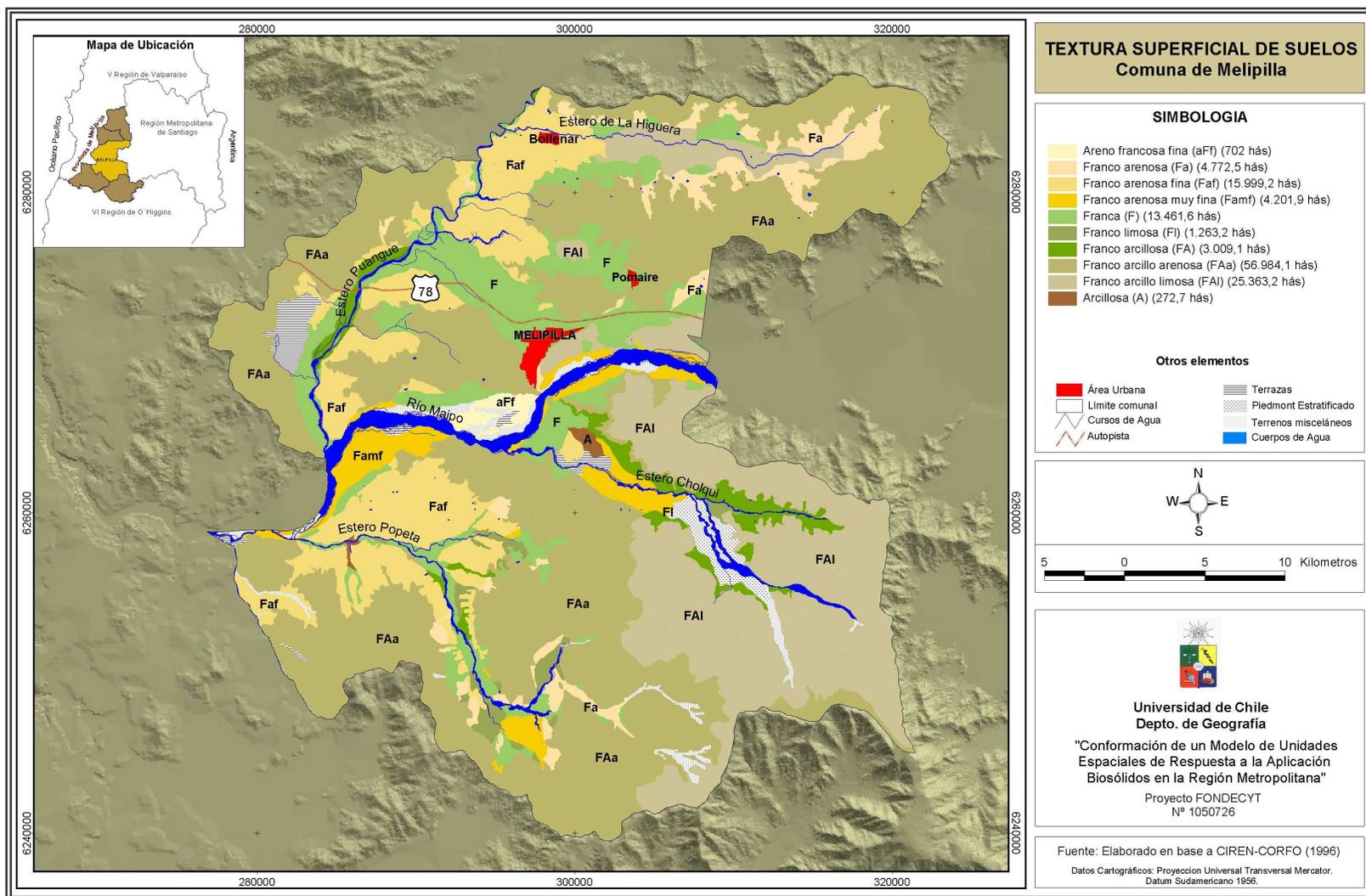
Tabla 31: Clases texturales y Series de Suelo, Comuna de Melipilla

CLASES TEXTURALES	SERIES DE SUELO	SUPERFICIE (HAS)	NIVELES DE EROSIONABILIDAD
Suelos arenosos			
Arenosa	****	702	Muy alta
areno francosa	Isla de Huechun		
Suelos francosos			
Franco arenosa	Las Perdices, Pudahuel, Estancilla, Puangue	4.772,50	Alta
Franco arenosa muy fina	Codigua, Viña Vieja, Quilamuta	34.925,90	Moderada
Franca	Pomaire, Tupartis, San Diego, Popeta, Peumo Chico, Pataguilla, Chiñigue, Cholqui, Los Cardenales		
Franco limosa	Peumo Lo Chacon		
Limosa	****		
Franco arcillosa	Alcantar, Viluma, Hacienda Alhué	85.336,40	Baja
Franco arcillo arenosa	Lo Vásquez, La Lajuela		
Franco arcillo limosa.	Pahuilmo, Agua del Gato, La Higuera, Mansel		
Suelos arcillosos			
Arcillo arenosa	****	272,7	Muy baja
arcillo limosa	****		
arcillosa.	Tronador		

Fuente: S.C.S (1981)

La Fig. 31, indica las superficies asociadas a cada clase textural y los tamaños de las partículas que poseen.

Figura 31: Textura de series de suelo, Comuna de Melipilla



5.1.4 Estructura del Suelo

Las estructuras de los suelos de la comuna de Melipilla (Fig. 32), no se presentan desvinculadas de las características texturales anteriormente vistas, ya que en función de sus partículas, estas tenderán a agruparse o dividirse dependiendo los procesos físicos y químicos que hayan experimentado los factores de la pedogenesis, lo cual puede evidenciarse en la profundidad de cada horizonte y los procesos mecánicos que ocurren en cada uno de ellos.

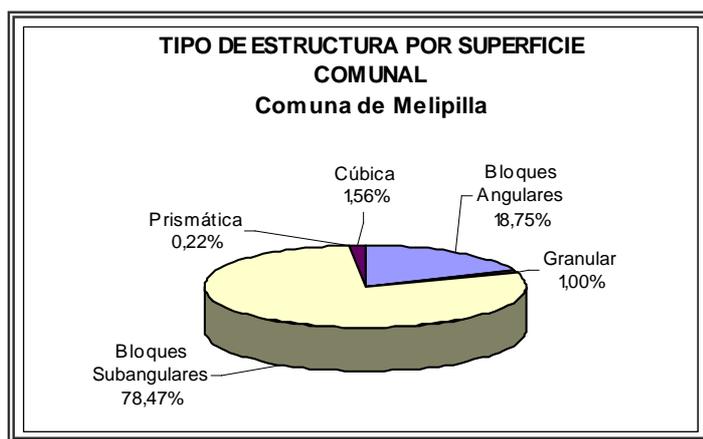
De modo general, en las series de suelo del área de estudio, hay preponderancia de estructuras superficiales de *bloques subangulares*, ya que cubren el 78.47%. El aspecto que tienen estos bloques son de fragmentos irregulares con diversos tamaños, que caracterizan a la mayor cantidad de series de suelo del área de estudio (19).

Le siguen en segundo lugar, las estructuras de *bloques angulares*, con un 18.75%, con tres series de suelo (*Agua del Gato, Alcantar y Mansel*), y que se identifican en la Fig. 33, con tonos ocres al N y E de la comuna.

En menor medida, hay existencia de estructuras *cúbicas*, que ocupan un 1.56% de la superficie comunal, con sólo una serie de suelo asociada (*Pahuilmo*), en los sectores de fondo de valle de la zona de Malarauco, al NE de la comuna.

Finalmente, la serie *Tronador* que posee una textura de tipo *arcillosa*, presenta condiciones estructurales *prismáticas*, cuyos agregados están orientados verticalmente o en pilares de acuerdo con BUCKMAN y BRADY (1993). La serie *Peumo Lo Chacón*, ubicada en sectores aledaños al estero Popeta, posee una estructura del tipo *granular*, y sus agregados se presentan redondeados y separados de la matriz original.

Figura 32: Tipos de Estructura superficial de suelos, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Los niveles de erosionabilidad existentes (Tabla 32), son preferentemente *moderados* de acuerdo a los tipos de estructuras de bloques subangulares y angulares, de manera tal que la susceptibilidad erosiva conforme a esta variable no presenta condiciones intrínsecas que fomenten el desgaste de las superficies lo cual se evidencia en 22 series de suelo.

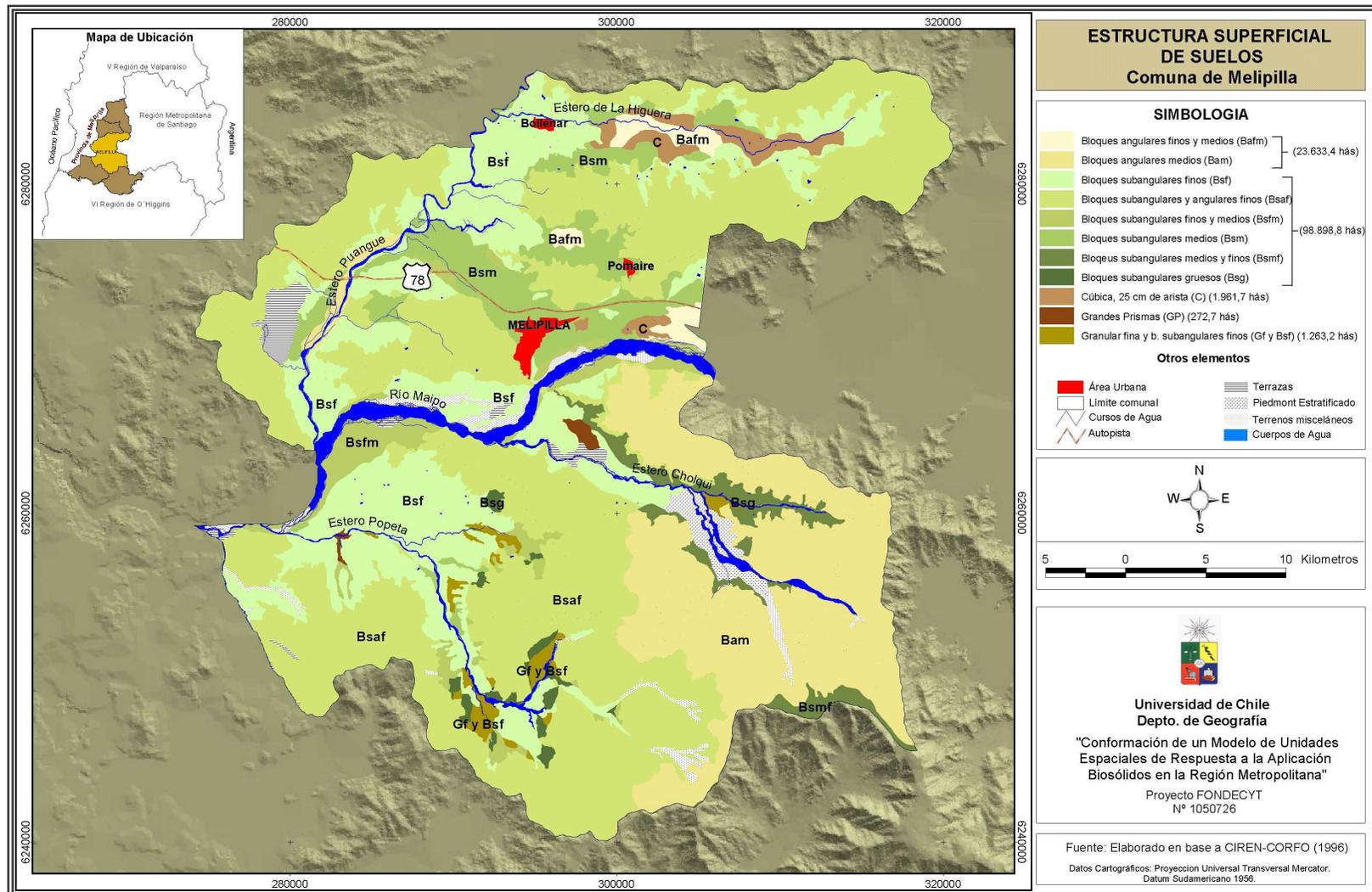
Por el contrario, hay 3 series que poseen características extremas, como son las series *Peumo Lo Chacón* y *Pahuilmo*, que tienen rangos de erosionabilidad altos, pero que solo representan el 3% del total comunal; la serie Tronador, por su parte, posee un nivel de *erosionabilidad bajo* ya que los agregados se disponen en laminas horizontales, relativamente delgadas compuestos de materiales muy finos que tienden a agregarse por efecto del agua.

Tabla 32: Tipos de estructura y erosionabilidad por series de suelo, Comuna de Melipilla

TIPOS DE ESTRUCTURA	SERIES DE SUELO	SUPERFICIE (HAS)	NIVELES DE EROSIONABILIDAD
Laminar	No existe en el área de estudio	****	Baja
Prismático	Tronador	272,7	
Sub-angular	Lo Vásquez, Las Perdices, Pudahuel, Estancilla, La Higuera, Viña Vieja, Los Cardenales, Pataguilla, Hacienda Alhué, Pomaire, Quilamuta, Popeta, Isla de Huechún, Puangue, Chiñihue, Codigua, Cholqui, Peumo Chico, Viluma.	95.898,80	Moderada
Angular	Agua del Gato, Alcantar, Mansel	23.633,40	
Granular	Peumo Lo Chacón	1263,2	
Cúbica	Pahuilmo	1961,7	Alta

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Figura 33: Estructura de suelos, Comuna de Melipilla



5.1.5 Clases de Drenaje y Permeabilidad de la comuna de Melipilla

En la comuna de Melipilla, se percibe que gran parte de su superficie, alrededor de un 61%, posee suelos con características de *buen drenaje interno* (Fig. 34). Estas condiciones se han generado, por la importante presencia de texturas superficiales francas, las cuales exhiben una mezcla proporcionada de partículas de arena, limo y arcilla; y que posteriormente se han agregado y conformado estructuras en bloques.

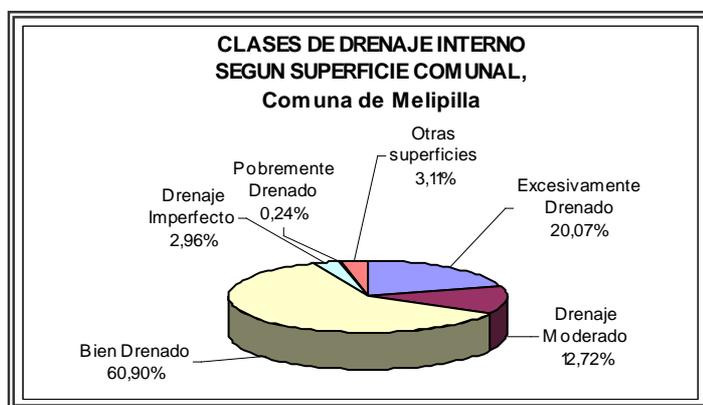
Debido a la heterogénea composición granulométrica de los fragmentos del suelo en el caso de suelos francosos, se han establecido facilidades en la circulación vertical de las aguas a través del sustrato, por ende, el agua es removida del suelo fácilmente, y su infiltración es *rápida*. Estos suelos retienen cantidades óptimas de humedad para el crecimiento de las plantas después de las lluvias o regadío, lo cual va en beneficio directo de las raíces.

Los suelos que presentan un drenaje *excesivo*, representan un 20% de la comuna, y se localizan en sectores cuyos materiales geológicos se presentan bien seleccionados, por efecto del alto grado de alteración de la matriz original, lo que ha influido en la conformación de mayor cantidad de poros en su masa generándose condiciones de alta permeabilidad; es así como el agua es removida de la superficie muy rápidamente. Estos presentan texturas gruesas y tienen una conductividad hidráulica saturada del suelo *alta* (3.6 - < 36 cm/h), a *muy alta* (>36 cm/h).

Los suelos con drenaje *moderado e imperfecto*, reúnen el 16% de la superficie comunal. En el primer caso, el agua es removida algo lentamente, manteniendo el suelo húmedo por poco tiempo. Con frecuencia se asocia a clases de *permeabilidad lenta* (0.00036 - < 0.036 cm/h) a *moderadamente lenta* (0.036 - < 0.36 cm/h), ubicados en diversas zonas de fondo de valle, con pendientes suaves, en donde se han formado suelos con materiales finos sobre *depósitos fluviales antiguos*. Por este motivo, las clases texturales asociadas tienden a ser *franco arcillosas* las cuales limitan de alguna manera, la infiltración del agua.

Para suelos con drenaje interno *imperfectamente drenado*, el agua es removida del suelo lentamente, manteniéndolo húmedo en superficie por significativos períodos, pero no durante todo este. A menos que el suelo sea artificialmente drenado, el crecimiento de cultivos es restringido, ya que el sistema radicular de las plantas poseen restricciones que impiden la absorción de agua en profundidad. Por lo general, estos se encuentran en condiciones topográficas planas, y con texturas de tipo *franco arcillo limosas*, cuya clase de conductividad hidráulica saturada del suelo varía de *lenta* (0.0036 - < 0.036 cm/h), a *muy lenta* (< 0.0036 cm/h). Finalmente, ocupando 0.24% de superficie comunal, se encuentran los suelos *pobrementemente drenados*, en donde el agua es removida tan lentamente que permanecen húmedos una gran parte del tiempo. A menos que el suelo sea artificialmente drenado, muchos cultivos no pueden desarrollarse. Poseen una clase de conductividad hidráulica saturada del suelo *lenta* (0.0036 - < 0.036 cm/h), a *muy lenta* (< 0.0036 cm/h). Estos se observan en tonos oscuros en la Fig. 35, y son indicadores de la saturación del espacio poroso del suelo, por lo que se generan condiciones de anegamiento e impermeabilidad.

Figura 34: Clases de Drenaje y superficie comunal, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

La siguiente tabla (Tabla 33), indica las clases de drenaje insertas en el área de estudio, el tipo de permeabilidad y conductividad hidráulica asociada, y los rangos de erosionabilidad que poseen cada una de las series de suelo.

A modo general, es importante señalar, que hay series de suelo que se repiten e incluyen en más de una clase de drenaje, lo que se debe principalmente a las clases texturales que posee cada una y también, a la ubicación o el origen donde se ha desarrollado la serie de suelo.

La erosionabilidad predominante en la comuna es *baja* (108.927 hás), en suelos con buenas condiciones de infiltración de agua tales como los *excesivamente drenados* y *bien drenados*, el desgaste o erosión de superficies se ve dificultada por el efecto de la humedad bien proporcionada en todo el perfil de suelo, lo que se torna en una ventaja para el crecimiento de las plantas y la vegetación en general ya que estabilizan el suelo y evitan la remoción de las partículas.

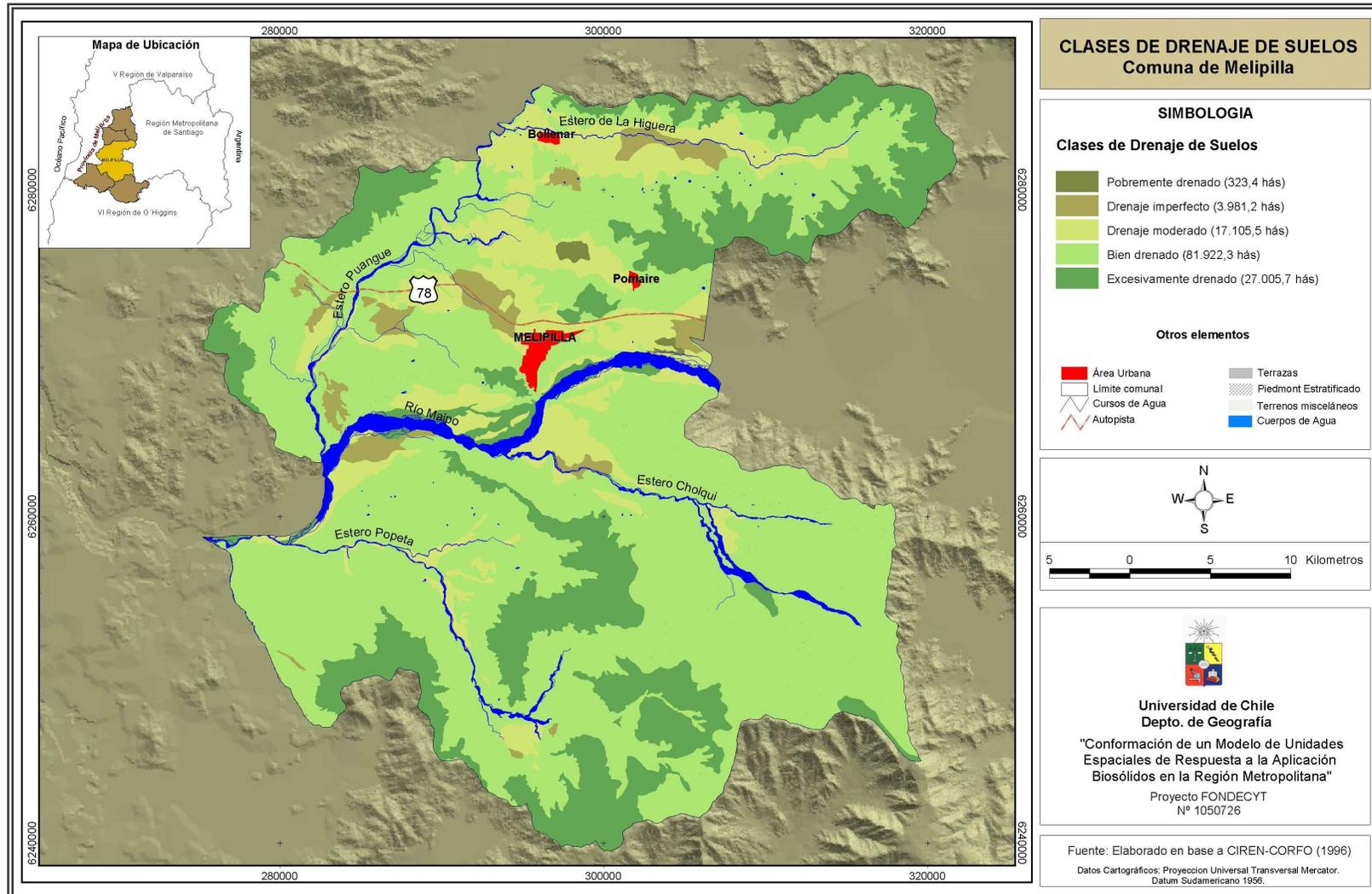
La *erosionabilidad moderada*, se observa preferentemente al centro de la comuna, cercana a las riberas del río Maipo, y a esteros menores tales como el Puangue y el estero de La Higuera al S de la ciudad de Melipilla, en el distrito de Bollenar. Las características de este tipo de erosionabilidad, y en mayor medida en el caso de *erosionabilidad alta*, se produce por la presencia de texturas finas, como son el caso de las franco arcillosas en el área de estudio, que en condiciones de intensas precipitaciones sobresaturan el suelo, impidiendo la infiltración del agua en terreno y generándose escurrimiento superficial. Esto trae como consecuencia directa la remoción y arrastre de partículas junto a deslizamientos de terreno.

Tabla 33: Clases de Drenaje, permeabilidad y series de suelo, Comuna de Melipilla

CLASE DE DRENAJE	PERMEABILIDAD	C. HIDRÁULICA (CM/H)	SERIES DE SUELO	SUPERFICIE (HAS)	RANGOS DE EROSIONABILIDAD
Excesivamente drenado	Rápida a Muy Rápida	(3.6 - < 36) a (> 36)	Lo Vásquez, Isla de Huechún, Estancilla, La Lajuela	27.005	Baja
Bien drenado	Rápida	(3.6 - < 36)	Lo Vásquez, Las Perdices, Pudahuel, Tupartis, Pomaire, San Diego, Alcantar, Chiñigue, La Higuera, Codigua, Cholqui, Los Cardenales, Isla de Huechún, Viluma, Mansel, Quilamuta, Estancilla, Peumo Lo Chacon, Peumo Chico, Popeta, La Lajuela	81.922	
Moderadamente bien drenado	Lenta a Moderadamente lenta	(0.0036 - < 0.036) a (0.036 - < 0.36)	Pomaire, Pahuilmo, Pudahuel, Pataguilla, San Diego, Alcantar, Cholqui, Codigua, Isla de Huechún, Tronador, Viña Vieja, Peumo Lo Chacón, Quilamuta, Popeta, Hacienda Alhué, Agua del Gato	17.105	Moderada
Drenaje imperfecto	Lenta a Muy lenta	(0.036 - < 0.36) a (< 0.00036)	Agua del Gato, Pomaire, San Diego, Pudahuel, Codigua, Peumo Lo Chacon.	3.981	Alta
Pobremente Drenado	Lenta a Muy lenta	(0.036 - < 0.36) a (< 0.00036)	Agua del Gato	323,4	

Fuente: Elaborado en base a CONAMA, (2006), y CIREN-CORFO (1996)

Figura 35: Clases de Drenaje y Permeabilidad, Comuna de Melipilla



5.1.6 Grupos Hidrológicos de la comuna de Melipilla

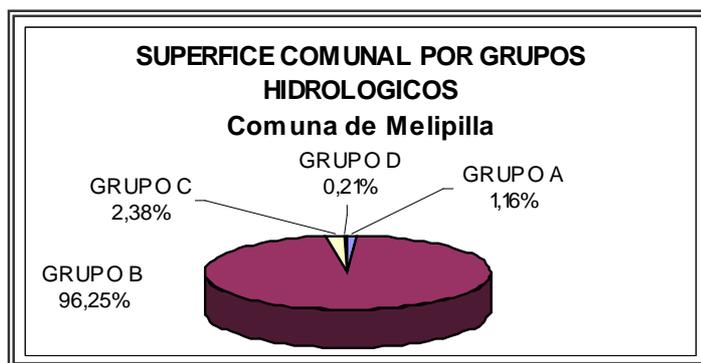
Complementando la información señalada anteriormente, de acuerdo a las *clases de drenaje internos* existentes en la comuna de Melipilla, el análisis de grupos hidrológicos, según lo expresado por GALLARDO (2006), corresponde al establecimiento de una clasificación hidrológica de suelos cuyo objetivo es establecer la condición hidrológica de un suelo a partir del tipo de suelo, la naturaleza de este y el tipo de cobertura existente anteriormente a la condición de humedad.

En este sentido, la utilización de la clasificación del Soil Conservation Service (USSCS), es relevante puesto que integra variables relacionadas con la infiltración del agua en el suelo, definida como el movimiento del agua a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo, y el concepto de transmisibilidad, que corresponde al movimiento gravitacional del agua en el perfil, dada por las características y particularidades de los distintos horizontes.

Considerando esto, es que se ha homologado cada característica de los Grupos Hidrológicos con los suelos que poseen algún tipo de riesgo de inundación (Fig. 36), y que corresponden a los suelos pertenecientes a los grupos C y D. Estos suelos, son los que presentan mayores condiciones de anegamiento, y problemas de infiltración de agua en el suelo, y al interior del área de estudio representan sólo alrededor del 3% del total comunal. Estos suelos poseen un potencial de escorrentía medio a elevado, con drenaje interno imperfecto a pobre, con lenta infiltración de los suelos, asociada a texturas finas con alto porcentaje de arcillas donde se ha generado una capa impermeable que impide la percolación del agua al subsuelo.

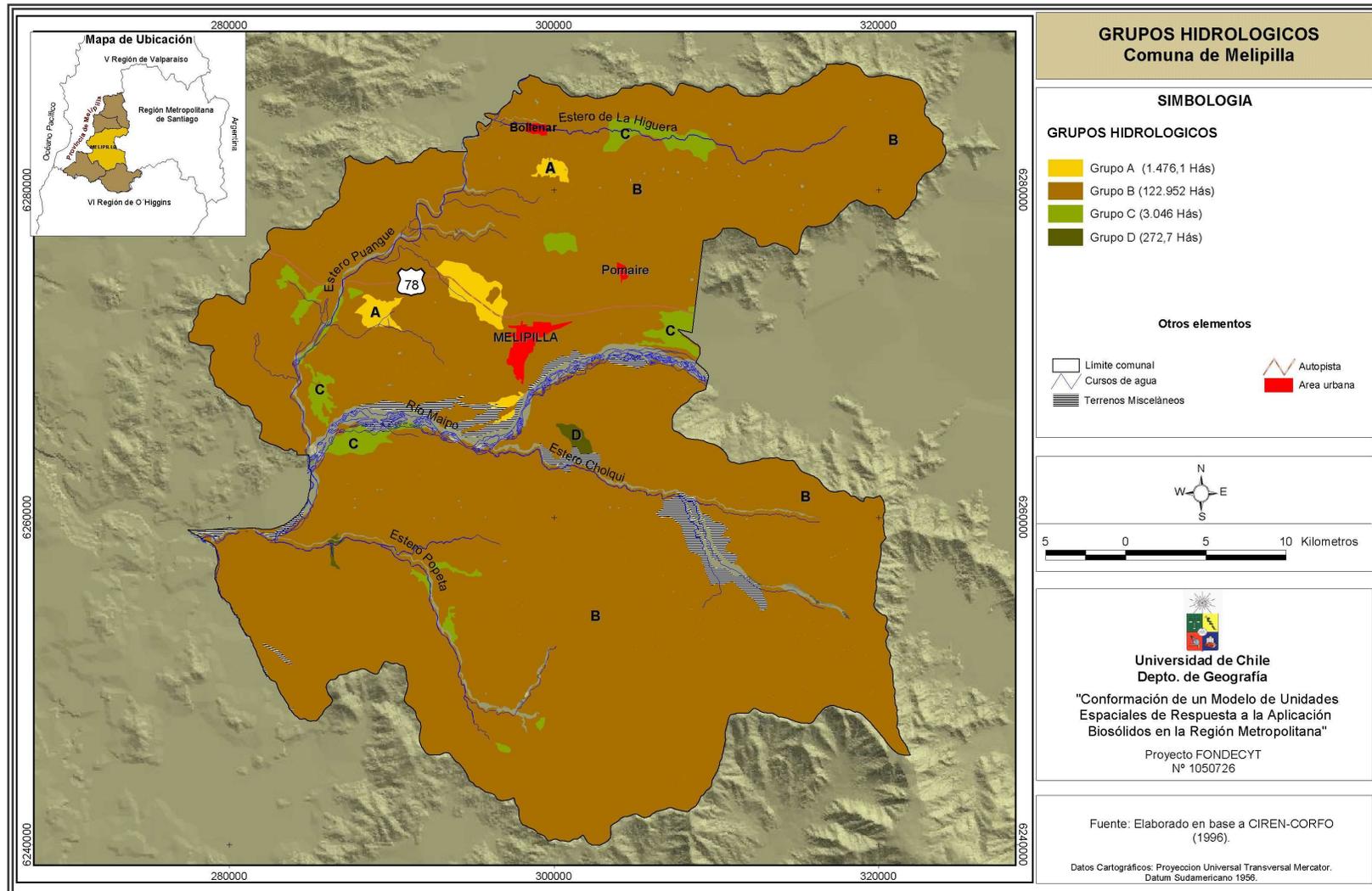
Por el contrario, suelos pertenecientes a los Grupos A y B (Fig. 37), son los que destacan por su extensa superficie, cubriendo en el caso del Grupo A 1.16%, y en el caso del Grupo B, 96.5% de la comuna de Melipilla. Estos suelos son los que poseen las mejores condiciones de precolación de agua, con un potencial de escorrentía escaso o moderado, drenaje bueno a moderado, una alta tasa de infiltración de suelos, lo cual se asocia directamente a la presencia de suelos con texturas mas bien gruesas y medias del tipo franca.

Figura 36: Suelos asociados a Grupos Hidrológicos, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaboración Propia en base a CIREN-CORFO (1996)

Figura 37: Grupos Hidrológicos, Comuna de Melipilla



5.1.7 Profundidad Efectiva del Suelo

Un suelo *profundo* por lo general, es más evolucionado, ya que se encuentra en asociación a condiciones de planicie, con pendientes suaves en donde se restringen las posibilidades de ser sometido a procesos de gravedad que pudieran afectar la estabilidad del terreno. Por ende, estos suelos son óptimos receptores de materiales y sedimentos que tienden a disponerse en capas, lo cual conforma una ventaja para el desarrollo del sistema radicular de la vegetación, puesto que las raíces absorben el agua que se encuentra en profundidad.

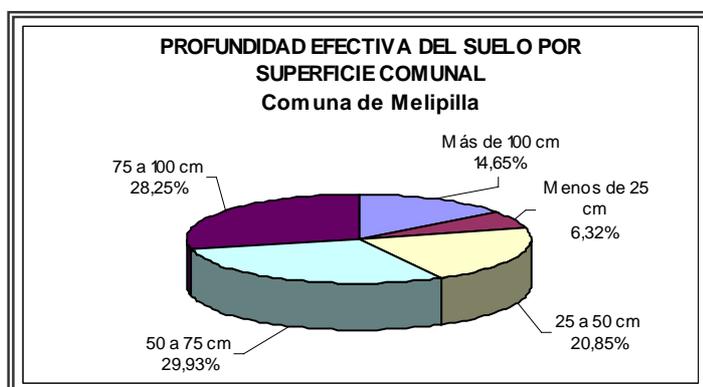
Al interior de la comuna, existen *suelos profundos* en sectores de fondo de valle, que se observan en la Fig. 38, con colores oscuros, y que representan 14.65% de la superficie comunal. Estos suelos, se han formado sobre unidades geomorfológicas denominadas *terrazas de cineritas*, y también sobre *terrazas fluviales pleistocénicas*, donde su espesor supera los 100 cm.

En segundo lugar, existen suelos con profundidades que varían entre 75 a 100 cm, y cubren el 28.2% de la comuna, estos corresponden a suelos *moderadamente profundos* y se ubican en algunas zonas de baja pendiente, al centro del área de estudio; y también en relieves ondulados cuyas pendientes van de 3° a 5°.

Por otra parte, hay preponderancia de suelos cuya profundidad efectiva varía entre 50 a 75 cm, cuya denominación es de *ligeramente profundo*, cubriendo la mayor parte de la superficie total, con un 29.93%. Estos se sitúan en los alrededores de la comuna, en algunos sectores de pendientes planas tales como al NW, cerca de Bollenar y el estero de La Higuera; al SW cerca del estero Popeta; y en las faldas de cerros al SE, aledaño al estero Cholqui.

A medida que se hace un alejamiento del centro de la comuna, el espesor del suelo se va haciendo más incipiente, lo cual se asocia a la configuración del relieve, ya que en los sectores marginales, que rodean a la comuna, hay mayor presencia de lomajes y cerros pertenecientes al Batolito Costero, con afloramientos de roca fundamental que impiden el desarrollo de una cubierta edáfica. En efecto, en estos sectores hay presencia de suelos *delgados* y *muy delgados* (27%), con profundidades menores a los 50 cm.

Figura 38: Profundidad efectiva del suelo por superficie comunal, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Con respecto a la susceptibilidad erosiva (Tabla 34), los suelos *delgados* y *muy delgados*, que tienen una superficie de 34.920,2 hás en los alrededores de la comuna, son los más propensos a ser afectados por procesos de erosión. Al desarrollarse la delgada capa de suelo, generalmente sobre superficies onduladas, a cierto umbral de la pendiente, como se observa en la Fig. 39, este material es sometido a la gravedad, que junto al accionar de las lluvias, es arrastrado por la lamina de agua que se mueve pendiente abajo, y elimina con ello los nutrientes del suelo.

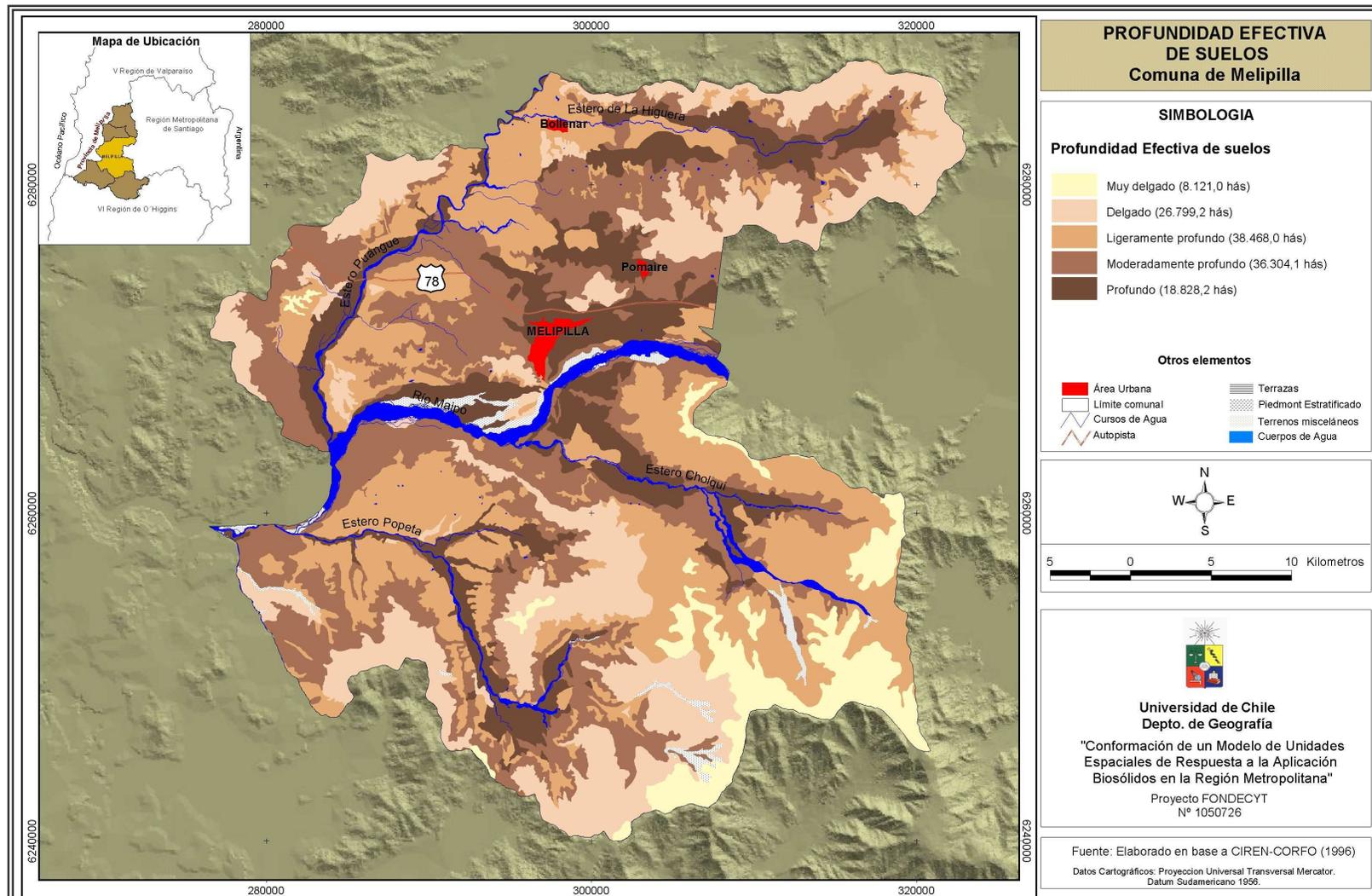
A pesar del alto impacto o el daño erosivo producido sobre estas superficies por efecto natural, en el área de estudio se presentan en mayor cantidad aquellos suelos con un amplio espesor de (50 a 100 cm) representando a 74.772 hás, asociado a unidades *ligeramente* y *moderadamente profundas*, donde hay menores probabilidades de que se presente erosionabilidad. En estos sectores, la gradiente del relieve tiende a ser reducida, por tanto la erosión lineal y el transporte de materiales es también menor. Sin embargo, la situación puede revertirse si sobre estas zonas se ha llevado a cabo algún tipo de manejo antrópico inadecuado, como la destrucción de la vegetación o el pisoteo que tiende a desestabilizar el suelo.

Tabla 34: Erosionabilidad según profundidad efectiva, Comuna de Melipilla

DESCRIPCION	RANGOS (CM)	SUPERFICIE	NIVELES DE EROSIONABILIDAD
Muy delgado	< 25	8.121,0	Muy alta
Delgado	25-50	26.799,2	Alta
Ligeramente profundo	50 a 75	38.468,0	Moderada
Moderadamente profundo	75 a 100	36.304,1	Baja
Profundo	>100	18.828,2	Muy baja

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996), y CASTRO *et al.*, (1990)

Figura 39: Profundidad Efectiva del suelo, Comuna de Melipilla



5.1.8 Materia Orgánica (M.O)

La materia orgánica posee gran relevancia, ya que influye en las propiedades físicas y químicas de los suelos, y es una prueba real del aporte de nutrientes derivados del tejido vegetal, y de la actividad de los microorganismos.

Al interior del área de estudio destaca con un 63%, suelos con *deficiente materia orgánica*, cuyos contenidos varían entre 1.76% a 2.5%. La extensión de terreno ligada a estos rangos no es excluyente de zonas con pendientes abruptas, o suelos formados sobre planicies. Como se aprecia en la Fig. 40, solo reducidas áreas ubicadas al SE de la comuna, y al centro, no presentan estas condiciones. El resto, es indicador de bajo contenido de materia orgánica, con carencia de horizontes superficiales orgánicos, lo que se debe por una parte, a las condicionantes físico-naturales de Melipilla, sometida constantemente a procesos de erodabilidad y erosividad que desgastan las superficies, y también debe incluirse la gran superficie cubierta por vegetación de tipo estepárico, que tal como lo señala BRIGNARDELLO y GEORGUDIS (1997), no aportan una gran cantidad de materia orgánica al suelo.

Como se indica en la Fig. 40, un 17% de la superficie comunal no presenta datos asociados al contenido de materia orgánica, lo que según CIREN-CORFO (1996) corresponde a la *Asociación Mansel*. A pesar de la falta de información, se puede inferir el comportamiento de los factores naturales, y si estos favorecen el desarrollo pedogenético del área, de acuerdo a las condiciones de emplazamiento.

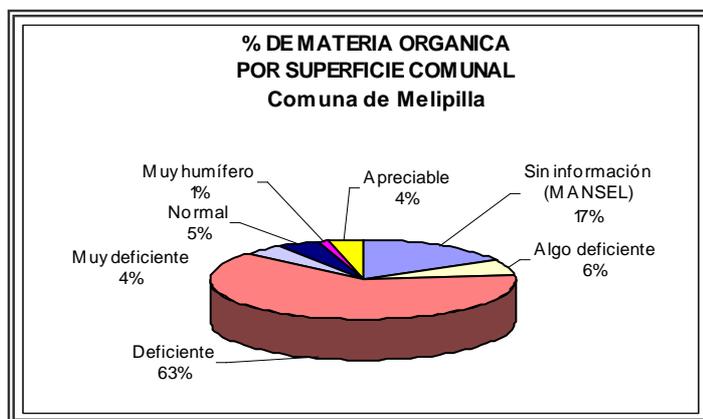
En una primera aproximación, de acuerdo al *Estudio Agrológico de la Región Metropolitana*, se destaca que *Mansel*, se ha formado en topografía de cerros cuyo origen se relaciona con la formación granítica. El sustrato geológico que conforma el material parental, presenta rocas con alto grado de meteorización las cuales se fracturan con facilidad. Al analizar el pedón de la serie, se establece que los horizontes superiores a C, cada vez más alterados y desagregados han generado material mucho más fino, que en superficie se identifica con texturas *franco arcillo limosas*. El rol de la arcilla en cantidades proporcionadas le asignan al suelo la capacidad de cohesionar sus partículas, lo cual es uno de los rasgos distintivos de la materia orgánica. En efecto, tal como lo plantea BUCKMAN y BRADY (1993), la fertilidad natural de los suelos minerales no puede ser alta sin este particular producto de la síntesis de la meteorización. Así el humus coloidal pasa a suplementar a la arcilla coloidal en la retención de nutrientes.

Por otro lado, se indica en el estudio, que hay presencia abundante de vegetación nativa en este sector, información que se respalda con la aplicación del Índice Normalizado de Diferencias Vegetacionales (NDVI), analizado anteriormente, que le asigna a esta área una *Densidad Alta*. El acumulación vegetal sobre la superficie, generan una especie de *cama de hojas*, que al descomponerse conforman la materia orgánica. En efecto, en los horizontes superficiales destaca la presencia de actividad biológica abundante, lo cual puede ser correlacionado con el contenido de materia orgánica de manera indirecta.

Continuando, con los otros contenidos de M.O, hay un 6% de la superficie comunal que está dentro de la categoría *algo deficiente*, cuyos rangos varían desde el 2.6% al 4%, este se aprecia en sectores de fondo de valle ligado a cursos de agua.

Las concentraciones de materia orgánica definidas como *normales*, *muy deficientes* y *apreciables*, se presentan en similares porcentajes, alrededor del 4 a 5% en sectores bajos; finalmente también se encuentra el tipo *muy húmifero*, asociado a la serie Peumo Lo Chacón, en posición geomorfológica de *conos de deyección*.

Figura 40: Porcentajes de M.O. por superficie comunal, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

La erosionabilidad en el área (Tabla 35), es *alta*, con 80.146 hás que presenta escaso contenido de materia orgánica. Tal como lo señala GIESA (1999), en LIENLAF (2003), la insuficiencia de materia orgánica genera escasez de nutrientes indispensables para el crecimiento de las plantas (especialmente N, P y K), baja capacidad de intercambio catiónico y pH moderadamente ácido a neutro, todo lo cual restringe el crecimiento de la vegetación y consecuentemente aumenta la susceptibilidad a la erosión.

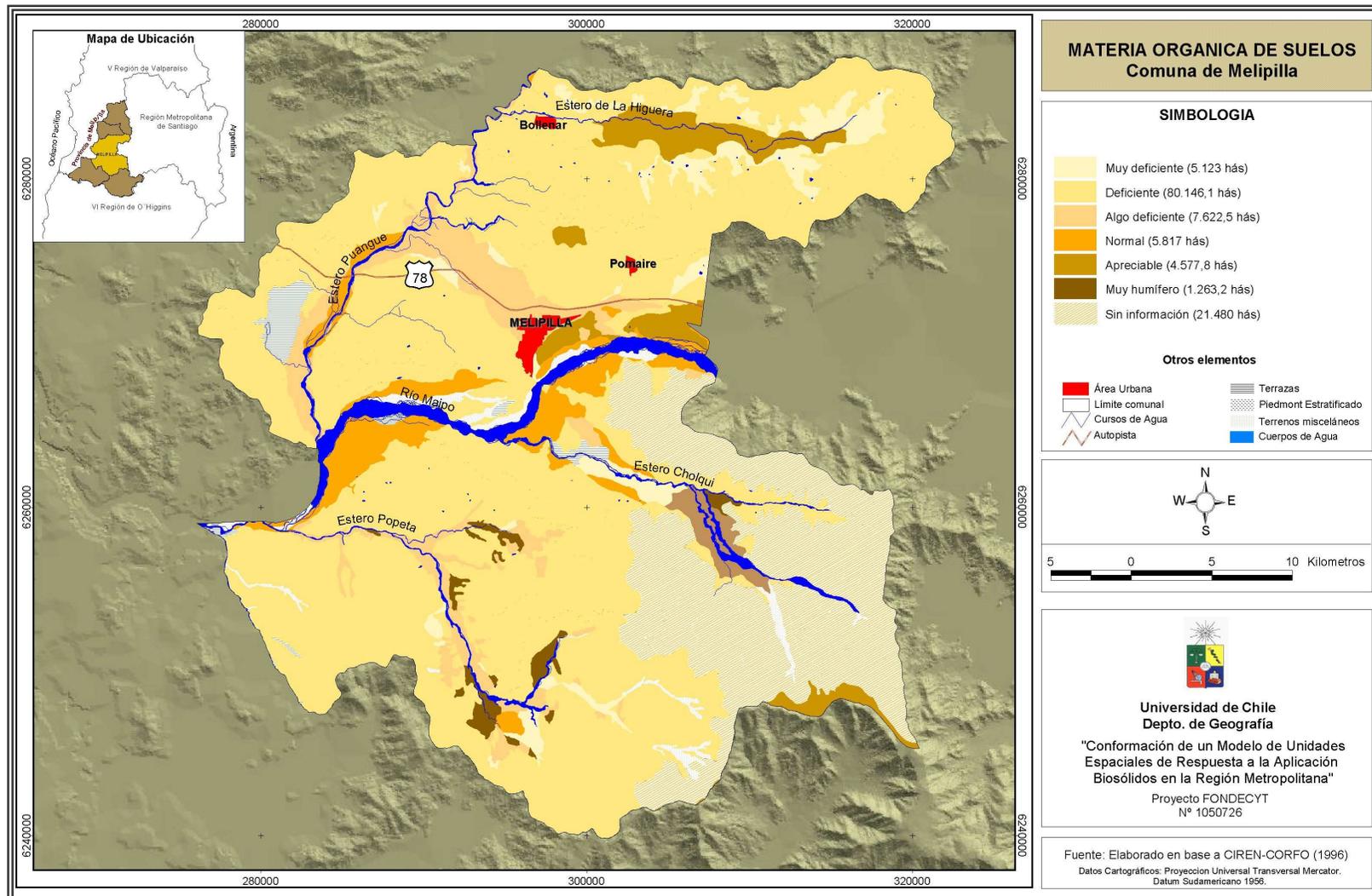
La susceptibilidad erosiva *baja* y *muy baja*, se asocia a rangos de materia orgánica que varían de 4.1% a 10%, en los sectores que morfológicamente se asocian a bajas pendientes, por lo cual se generan menos probabilidades de que exista una eliminación del sustrato pedológico por efecto de los agentes erosivos. Por el contrario, la lluvia que se deposita en las zonas bajas influye en las clases de drenaje interno de los suelos. BUCKMAN y BRADY (1993), indica que los suelos *pobremente drenados* a causa de sus altas cifras de humedad y relativa pobre aireación son casi siempre mucho más ricos en materia orgánica y nitrógeno que sus equivalentes mejor drenados.

Tabla 35: Erosionabilidad según rangos de Materia Orgánica, Comuna de Melipilla

DESCRIPCION	RANGOS (%)	SUPERFICIE (HAS)	NIVELES DE EROSIONABILIDAD
Muy deficiente	0-1,75	5.123,0	Muy alta
Deficiente	1,76-2,5	80.146,1	Alta
Algo deficiente	2,6-4,0	7.622,5	Moderada
Normal	4,1-5,0	5.817,0	Baja
Apreciable	5,1-8,0	4.577,8	Muy baja
Humífero	8,1-10	*****	
Muy Humífero	>10	1.263,2	

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Figura 41: Rangos de Materia Orgánica, Comuna de Melipilla



5.1.9 pH de suelos

El pH indica el tipo de reacción de la solución del suelo, en función de conceptos tales como la acidez, neutralidad o la alcalinidad.

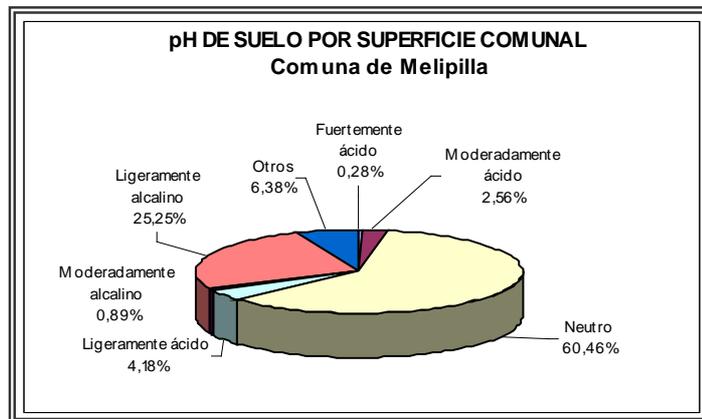
Gran parte de los suelos de la comuna de Melipilla poseen pH neutro (6.6 a 7.3), los cuales cubren el 61% de la superficie comunal (Fig. 42). Este rango de pH, si bien es muy beneficioso para la actividad agrícola, tienden a localizarse preferentemente en terrenos con fuertes pendientes al interior del área de estudio, lo cual inhabilita el desarrollo de cultivos. No obstante, es muy favorable para el crecimiento de otro tipo de vegetación, permitiendo el desarrollo de una cobertura arbórea y herbácea que en definitiva, permite estabilizar las laderas de los cordones de relieve de la comuna de Melipilla.

En segundo lugar, se debe indicar que hay un 25.25% de suelos asociados a pH de tipo alcalino o básico, cuyas variaciones correspondientes son las de *ligeramente alcalinos* y *moderadamente alcalinos*. Estos se encuentran ubicados en zonas de fondo de valle, donde están emplazados los principales asentamientos tales como la ciudad de Melipilla, Bollenar por el N, y el pueblo de Pomaire. En términos morfológicos, esta zona es definida como *terrazza de cineritas*, y por efecto de su composición geológica de ceniza y lapillo pumiceo, hay mayor presencia de sales en forma de carbonatos, elementos que influyen en el tipo de reacción del suelo al existir alto grado de saturación de bases.

Finalmente, los suelos ácidos o con pH máximo de 6.5, cubren el 8% de la superficie de la comuna de Melipilla, ubicándose en las partes bajas de las laderas de los cerros de, en depósitos de tipo *coluvial*, al norte de la comuna; y también en sectores de contacto entre las laderas del Cerro Alto del Espino y las *terrazas fluviales* en los alrededores del estero Popeta, al NW de la comuna. Esta acidez es común en las regiones donde la precipitación es alta, lo suficiente como para lixiviar apreciables cantidades de bases intercambiables de los niveles superficiales de los suelos (BUCKMAN y BRADY, 1993).

Los porcentajes de superficie de acuerdo al tipo de pH, se distinguen en el siguiente gráfico:

Figura 42: Superficie comunal y pH asociado, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

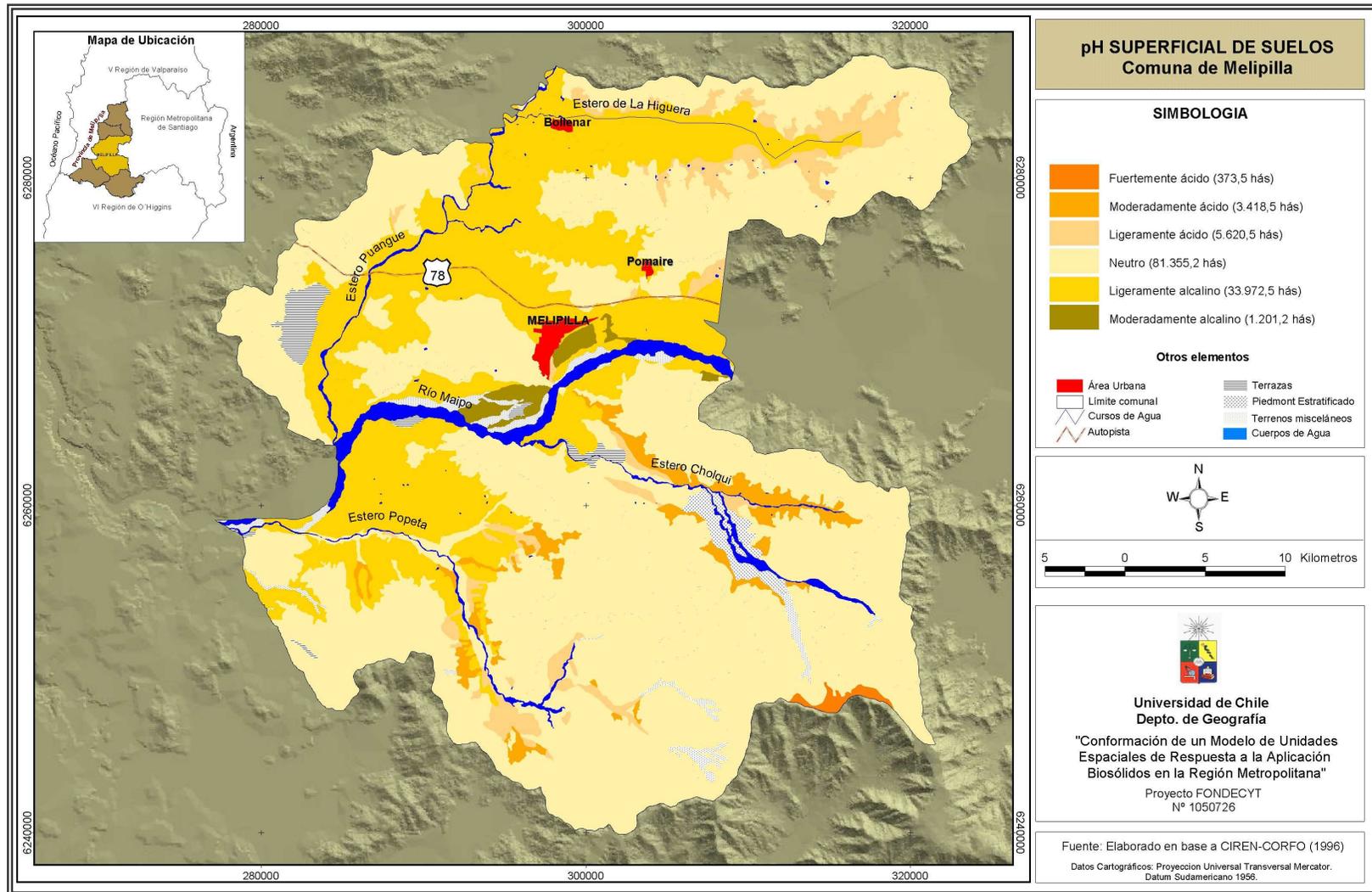
En la Tabla 36, se indican los rangos asociados al pH de las series de suelos perteneciente a la comuna de Melipilla, y su respectiva denominación, con lo cual se evidencian rangos que varían desde el *moderadamente ácido*, cuya serie asociada es la *Lajueta*, y que posee un pH de 5.4, al *moderadamente alcalino*, y cuyas series de suelo correspondientes son, *Los Cardenales* (pH 8), e *Isla de Huechún* y *La Higuera*, con pH de 8.1.

Tabla 36: pH de las series de suelo de la comuna de Melipilla

DESIGNACION	pH	SERIES DE SUELO
Ultra ácido	< 3.5	No existe en área de estudio
Extremadamente ácido	3.5 – 4.4	No existe en área de estudio
Muy fuertemente ácido	4.5 – 5.0	No existe en área de estudio
Moderadamente ácido	5.1 – 5.5	La Lajueta
Moderadamente ácido	5.6 – 6.0	Peumo Chico-Hacienda Alhué-Viluma
Ligeramente ácido	6.1 – 6.5	Viña Vieja-Las Perdices- Peumo Lo Chacón
Neutro	6.6 – 7.3	Lo Vásquez-Estancilla-Popeta-Mansel-Quilamuta-Tronador-Puangue
Ligeramente alcalino	7.4 – 7.8	Alcantar-Pudahuel-Pahuilmo-Tupartis-Pataguilla-San Diego-Codigua-Cholqui-Pomaire-Agua del Gato
Moderadamente alcalino	7.9 – 8.4	Los Cardenales-Isla de Huechún-La Higuera
Fuertemente alcalino	8.5 – 9.0	No existe en área de estudio
Muy fuertemente alcalino	> 9.0	No existe en área de estudio

Fuente: CIREN-CORFO (1996)

Figura 43: pH de series de suelo, Comuna de Melipilla



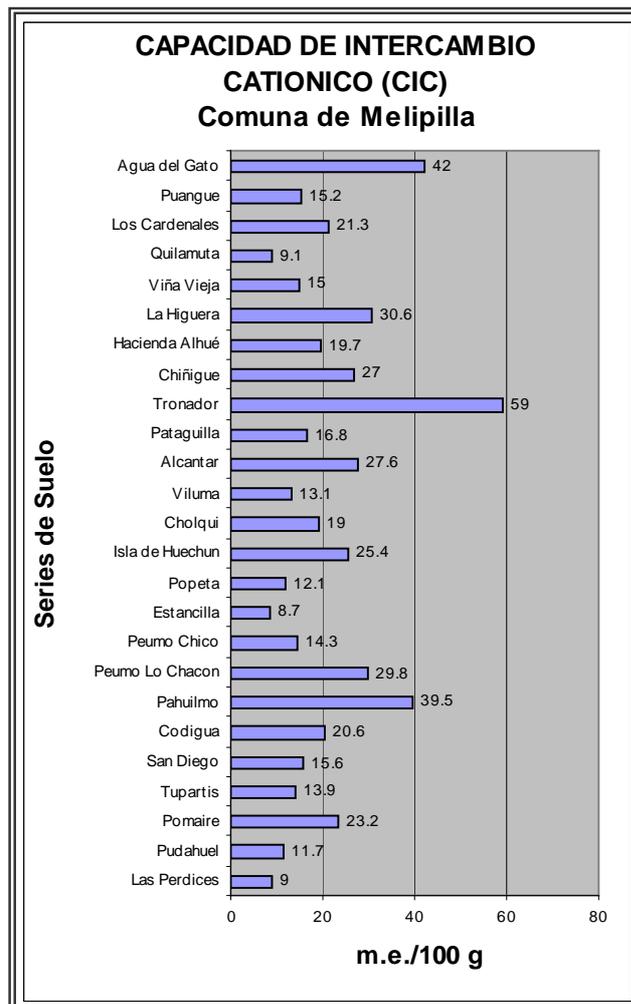
5.1.10 Capacidad de Intercambio (C.I.C)

La Capacidad de Intercambio Catiónico, según los datos arrojados por CIREN-CORFO (1996), son heterogéneos al interior de la comuna (Fig. 44), ya que se presentan valores que van desde 8.7 cmol+/Kg correspondiente a la Serie *Estancilla*, hasta 59 cmol+/Kg, asociado a la serie *Tronador*.

Se comprueba en esta zona, lo establecido por BUCKMAN y BRADY (1993), en el sentido de que habría una correlación entre la capacidad de intercambio y las texturas superficiales de los suelos, evidenciándose una relación directamente proporcional entre la existencia de gran cantidad de arcilla coloidal, y que también es correlacionable a los altos porcentajes de materia orgánica.

En este sentido, la serie Tronador, que es la que presenta mayores valores de CIC al compararse con las demás series de suelo, efectivamente posee una textura arcillosa, y porcentajes de materia orgánica del orden del 3.1%. Por el contrario, la serie *Estancilla* posee textura de tipo franco arenosa, y el porcentaje de materia orgánica es de 2.25%, disminuyendo con la profundidad.

Figura 44: Capacidad de Intercambio Catiónico por serie de suelo, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

5.1.11 Clases de Capacidad de Uso de Suelo

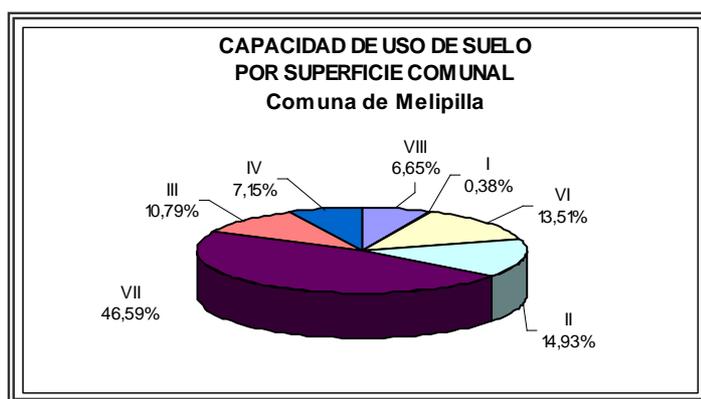
Analizando todas las componentes relativas a las propiedades de los suelos, es que se ha generado un agrupamiento técnico con la finalidad de determinar las mejores condiciones para el desarrollo agrícola, es así como se clasifica la tierra según el uso sostenido más conveniente que puede hacerse de ella, dándole una adecuada protección de la erosión y de otros medios de deterioro. Las clases de uso I, II y III, de acuerdo a estos autores, presentan suelos profundos, bien drenados, con estructura estable y cuya pendiente varía solamente entre 1 a 2%, puede ser cultivada intensamente casi por tiempo indefinido, con poco peligro de degradación. En contraste, una zona donde se hallan suelos delgados o pobremente drenados, o en donde las pendientes abundan, tendrán aptitudes limitadas y, también, muchas limitaciones de uso.

De acuerdo a esta última descripción, son efectivamente este tipo de terrenos no arables, los que se hallan en primer lugar de acuerdo a la superficie al interior de la comuna de Melipilla, con un 46.59% (Fig. 45). Estos suelos poseen capacidad de uso VII, y presentan fuertes obstáculos que restringen su uso agrícola. Las limitaciones físicas tales como, la pendiente, rocosidad, u otros, son las mismas que las de la clase de capacidad VI, y llegan a ser tan severas que el beneficio del pasto es impracticable.

Para el caso de suelos arables (I, II y III), se encuentra en la comuna con un porcentaje reducido de 14%, suelos con clase de capacidad de uso II, ubicados en sectores de fondo de valle. Estos presentan sólo ligeras limitaciones en su uso y son de buena fertilidad, pero contrastan en gran forma con el predominio areal de suelos con imposibilidad para el desarrollo adecuado de cultivos.

Los suelos de capacidad de uso I, de acuerdo a la Fig. 46, que si bien cumplen con óptimos requisitos para la explotación agrícola, en términos de sus características, por la existencia de pendientes planas, fertilidad natural, textura y estructuras adecuadas, solo representan el 1% de la superficie comunal.

Figura 45: Capacidad de Uso de Suelo, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Como se demostró inicialmente, cada una de las propiedades físicas y químicas del suelo posee condicionantes intrínsecas que influyen en los mecanismos de arrastre y transporte de sus partículas. Ya que como mencionó MORGAN (1993), la erosionabilidad define la resistencia del suelo a los procesos de desprendimiento y transporte. Aunque la resistencia de un suelo a la erosión depende, en parte de su posición topográfica, pendiente y grado de alteración, como por ejemplo mediante el laboreo, las propiedades del suelo son los determinantes más importantes. La erosionabilidad varía con la textura del suelo, la estabilidad de los agregados, la resistencia al esfuerzo cortante, la capacidad de infiltración y los contenidos minerales y orgánicos.

La Fig. 47, indica como la susceptibilidad de los suelos al desencadenamiento de procesos erosivos, se ha acrecentado por efecto de la naturaleza constitutiva de sus propiedades, tales como la profundidad efectiva, la textura, estructura superficial, y materia orgánica, entre otras. Todas estas componentes en su conjunto, reúnen una superficie superior al 70% que posee problemas de erosión.

Con respecto al primer caso, la erosión generada por profundidades efectivas reducidas, indica la presencia de suelos poco evolucionados en todos aquellos tramos en donde la inclinación de la pendiente es superior a los 15°. Esta situación se aprecia en los sectores marginales de la comuna, al NE, por el cordón de Mallarauco, en la zona centro sur en el Cordón de Culiprán, etc. A este nivel, la velocidad de la escorrentía se ve incrementada, lo cual influye en el arranque de los elementos constitutivos del suelo donde se afecta su resistencia y se contribuye a su eliminación.

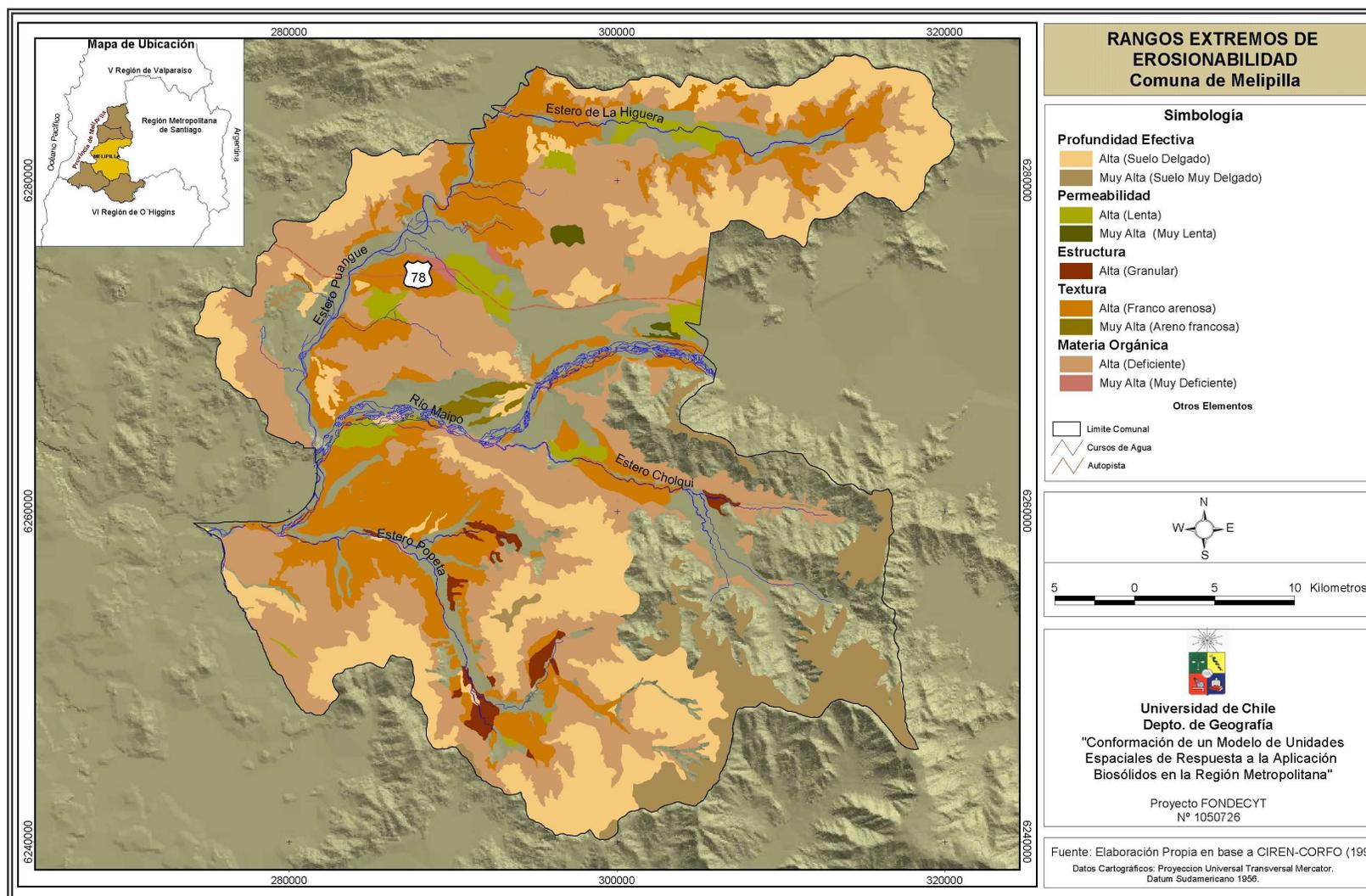
La capacidad de infiltración del agua en el suelo, posee rangos extremos de erosionabilidad en sectores específicos de fondo de valle, los cuales poseen diversas proporciones en términos de superficie. Estas categorías, implican que el agua posee serias limitaciones para percolar en el suelo, ya que como lo señala FOURNIER (1975), al agua se detiene en su descenso; la parte superior del suelo se satura y se facilita por tanto la escorrentía. Humedeciendo más el suelo, se alcanzará el límite líquido y el suelo comenzará a fluir por su propio peso (MORGAN, 1993).

El rol que cumplen las texturas del suelo de tipo *franco arenosa* y *areno francosa*, en la erosionabilidad del suelo son extremas, en superficies con pendientes planas, y en zonas basales al interior de Melipilla. En efecto, las texturas gruesas poseen una estabilidad estructural débil y tienen tendencia a la desagregación, a diferencia de suelos arcillosos. Igualmente, se estima que los suelos con alto porcentaje de arenas disminuyen su fracción coloidal al generarse la erosión, por lo que se tornan más propensos al desprendimiento de sus unidades.

Con respecto a la estructura del suelo, la comuna de Melipilla posee niveles *altos* de erosionabilidad en sustratos de tipo *granular*, los cuales al poseer una forma esférica, presentan menos estabilidad y cohesión de sus agregados. Estos se localizan en sectores con pendientes ligeramente inclinadas, lo cual favorece el transporte de los materiales gruesos por efecto de la gravedad.

Finalmente, los componentes orgánicos al encontrarse en niveles *muy deficientes*, generan la inestabilidad de los agregados del suelo, afectan la porosidad y aireación del suelo, por lo cual son más propensos a ser erosionados.

Figura 47: Rangos extremos de erosionabilidad del suelo, Comuna de Melipilla



6. IDENTIFICACIÓN DE AREAS POTENCIALES

6.1 POTENCIALIDADES Y LIMITACIONES PARA APLICAR BIOSÓLIDOS EN LA COMUNA DE MELIPILLA

Las variables físico-naturales de carácter endógeno y exógeno de la comuna de Melipilla, reúnen una serie de condiciones que analizadas en profundidad indican la presencia de una amplia superficie afectada por procesos de erodabilidad y erosividad de sus suelos.

Esto da cuenta, de que existe un ambiente en donde se aprecia una gran propensión al desarrollo de mecanismos erosivos, lo cual se debe principalmente a las condiciones morfodinámicas de las laderas que constantemente aportan materiales a las zonas bajas, lo cual junto al contexto geológico presenta un sustrato altamente alterado por la acción agresiva del clima. Esto ha formado suelos altamente susceptibles lo que ha influido en las pérdidas y degradación de sus propiedades físicas y químicas.

Tomando en consideración estos antecedentes, es que de acuerdo a la experiencia española, en referencia a la aplicación de lodos, es que se puede mejorar apreciablemente la productividad de suelos con tendencia al empobrecimiento de sus características intrínsecas, y a la recuperación de ecosistemas degradados. La normativa nacional comparte este criterio, y es por eso que se debe evaluar el grado de compatibilidad que poseen las componentes del medio natural y humano con la disposición de biosólidos derivados de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.

Dentro de las consideraciones presentes para un plan de aplicación de lodos al suelo en Chile, se deben establecer las condiciones técnicas de operación, monitoreo y seguimiento de los lodos, a fin de evitar efectos nocivos para la salud de la población, flora, fauna y suelo, considerando:

1. Las características de los lodos (a través de criterios sanitarios, tipo y cantidad de metales pesados).
2. Las características de los sitios de aplicación (características de los suelos y contenido de metales pesados) y situaciones extremas de riesgo en el área.
3. La tasa de aplicación de lodos al suelo, que para el caso de recuperación de suelos degradados corresponden a 30 ton/hás/año.

Para efectos de esta investigación, es importante contemplar las condiciones aptas que deben poseer los suelos de la comuna de Melipilla, y descartar las zonas no urbanas que no cumplen con los patrones establecidas por el Reglamento de Lodos No Peligrosos (CONAMA, 2006).

Tal como se menciona a continuación, es en primera instancia relevante llevar a cabo una exclusión de tipo primaria, que considere a los suelos en situaciones extremas de riesgo y que poseen las siguientes características:

- Suelos ubicados en torno a zonas urbanas
- Suelos ubicados en torno a cursos y cuerpos de agua.
- pH inferior a 5
- Suelos cuya capacidad de uso sea I, II y III

- Napas freáticas y suelos saturados la mayor parte del tiempo como vegas, humedales, etc.
- Pendientes fuertes y terrenos rocosos
- Suelos con riesgo de inundación

6.1.2 Áreas de Exclusión Primaria

6.1.2.1 Áreas Urbanas y zonas con cursos y cuerpos de agua

La normativa chilena, indica que se debe generar un *buffer* de protección de 300 metros en torno a aquellas áreas urbanas que en su conjunto, comprenden a todos los sectores residenciales, hospitales, locales de expendio de alimentos, escuelas, parques y áreas similares, que han sido agrupados en una sola gran categoría definida como *área urbana*.

Las principales áreas urbanas que destacan de acuerdo al PRMS (2006), corresponden a la ciudad de *Melipilla*, al centro de la comuna; el pueblo de *Pomaire* al E; y *Bollenar*, como los principales asentamientos dentro de los límites administrativos. A estas zonas se le incluyen por ejemplo, otro tipo de zonas que podrían ser urbanizadas en el futuro, tales como AUDP, etc. Este corredor de protección, mencionado en el Reglamento, se ha diseñado con el fin de que no se generen efectos negativos sobre la población residente u otros, lo cual se distingue en la Fig. 48.

Del mismo modo, para el caso de las zonas con cursos y cuerpos de agua, se debe generar un *buffer* de 15 metros de protección para cada uno de ellos, los cuales incluyen al río Maipo, y a los esteros Popeta, Cholqui, Puangue y La Higuera, con el objetivo de proteger estos recursos de bebida animal y de consumo. Estos en conjunto, suman para el primer caso 1.678 há, que sólo representan el 6.36% de la comuna, y para el caso de los tranques, 107,2 há (0.08%).

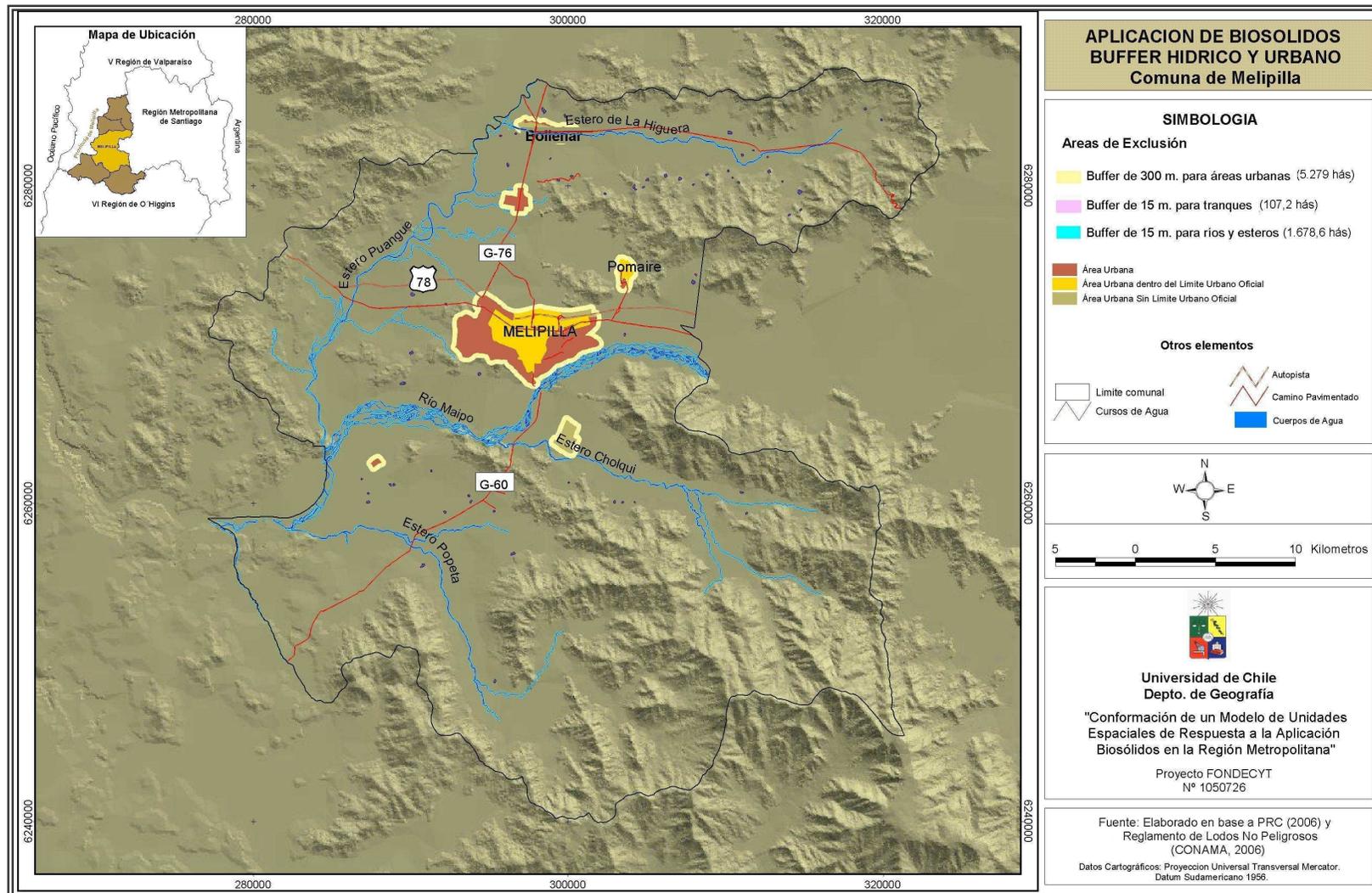
Excluyendo estos sectores, es que ha quedado una superficie potencial para aplicar biosólidos de 125.942 há (93.64%), tal como se señala en la Tabla 37.

Tabla 37: Sectores excluidos de la aplicación de biosólidos de acuerdo a *buffer* hídrico y urbano, Comuna de Melipilla

APTITUD BIOSOLIDOS	APLICACIÓN POTENCIAL SUELOS	SUPERFICIE (HÁS)	SUP (%)
NO APTO	Área Verde	854.7	0,64
	Area Urbanizable	149.0	0,11
	AUDP	541.9	0,40
	Área Urbanizada	1.632,4	1,21
	Área Urbanizable (16 Hab/Há)	207.2	0,15
	Zona Industrial Exclusiva	111.2	0,08
	Buffer de 300 m urbano	3.279,0	2,44
	Buffer de 15 m para tranques	107.2	0,08
	Buffer de 15 m hídrico	1.678,0	1,25
	TOTAL ZONAS NO APTAS	8.560,7	6,36
APTO	TOTAL ZONAS APTAS	125.941,7	93,64

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Figura 48: Suelos excluidos de aplicación de biosólidos según Buffer Hídrico y Urbano, Comuna de Melipilla

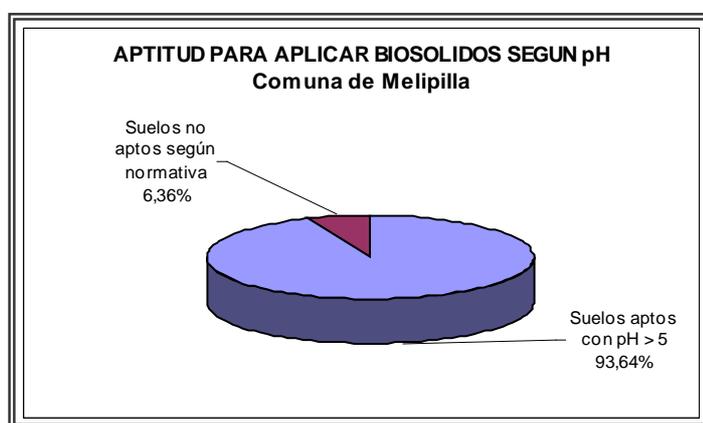


6.1.2.2 pH de suelos

De acuerdo a la exclusión por *buffer de zonas urbanas y de cursos de agua*, llevada a cabo precedentemente, el 93.6% (Fig. 49), equivalente a 125.941 hás de la comuna, posee superficies competentes con la incorporación de biosólidos. Con todo, para hacer más completo el análisis de las zonas de aplicación de lodos, de acuerdo a lo expresado por la normativa (CONAMA, 2006), se debe incluir otro aspecto asociado a situaciones de riesgo de los suelos, el cual corresponde a los rangos de pH.

En este sentido, no se deben incorporar biosólidos en suelos cuyo pH sea menor o inferior a 5, o cuyos términos descriptivos varíen de *ultra ácido* a *muy fuertemente ácido* (<3.5 a 5.0).

Figura 49: Aptitud para aplicar lodos según pH, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996), y CONAMA (2006)

Al examinar la superficie comunal (Fig. 50), y las diversas series de suelo pertenecientes a la comuna de Melipilla, se destaca que no hay ningún sector o zona que contenga suelos con rangos inferiores al de pH 5. Por ende, todas las series de suelo de la comuna superan esta categoría, lo cual es relevante si se desea incorporar este tipo de subproducto orgánico derivado de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas. El área comunal restante, reúne el 6.3%, y esta cubierta por otro tipo de superficies en las cuales no se deben aplicar lodos, ya que corresponden a áreas urbanas, zonas ocupadas por lechos o cursos de agua, y también terrenos misceláneos que no constituyen suelos propiamente tal.

Ahora, si bien las series de suelo superan el rango límite establecido por ley, la única serie de suelo que estaría más proclive a ser excluida del resto de superficies potenciales, sería la serie *La Lajuela*, ya que posee el menor rango de pH al interior de la comuna de Melipilla, con 5.4. Esta serie, se ubica en una posición fisiográfica de pendientes escarpadas, en el sector SE de la comuna de Melipilla, y cubre aproximadamente 375.3 hás.

LUZIO y CASANOVA (2006), afirman que las formas químicas de muchos elementos del suelo y los procesos microbianos que allí ocurren están tan ligados al pH que no existe otra medida del suelo que integre tanta información. Por consiguiente, el rango superior a 5, se establece como válido para la aplicación de lodos, puesto que no se generan condiciones desfavorables de toxicidad que afecten a los cultivos, a diferencia de rangos inferiores en que hay mayores riesgos de exceso de metales pesados y de actividad bacteriana.

Consecuentemente a lo mencionado, la comuna Melipilla posee las condiciones adecuadas para aplicar biosólidos en lo referente a la variable pH, sin hacer distinciones entre suelos con limitaciones agrícolas o que se encuentren degradados.

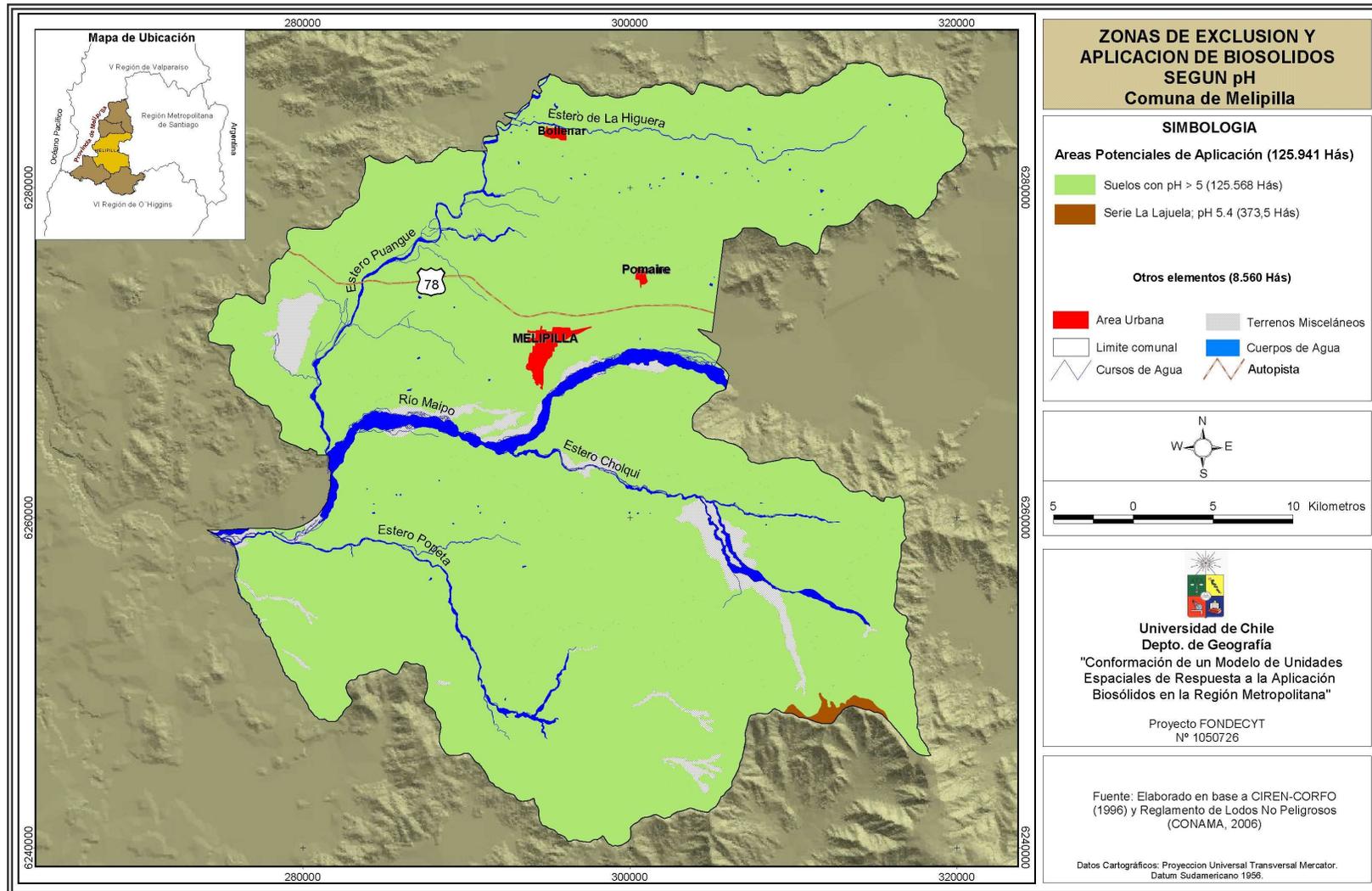
A continuación, se indican las superficies disponibles para aplicar lodos junto a su porcentaje:

Tabla 38: Series de suelo aptas según pH, Comuna de Melipilla

APTITUD BIOSOLIDOS		APLICACIÓN POTENCIAL SUELOS	SUPERFICIE (Hás)	SUP (%)
NO APTOS		Suelos pH < 5	0	6.36%
		Zonas excluidas anteriormente	8.560,7	
		ZONAS NO APTAS	8.560,7	6.36%
APTOS	Severas limitaciones agrícolas	pH > 5	125.941,7	93,64%
	Suelos Degradados			
		ZONAS APTAS	125.941,7	93,64%

Fuente: Elaboración propia en base a CIREN-CORFO (1996)

Figura 50: Aptitud para aplicar lodos según pH, Comuna de Melipilla



6.1.2.3 Capacidad de Uso de Suelo

En la normativa actual, se expresa que quedan al margen de la aplicación de biosólidos, todos aquellos suelos cuya capacidad de uso, o su clase de aptitud frutal natural, sea del tipo A, B o C, o lo que es equivalente a las capacidades I, II y III.

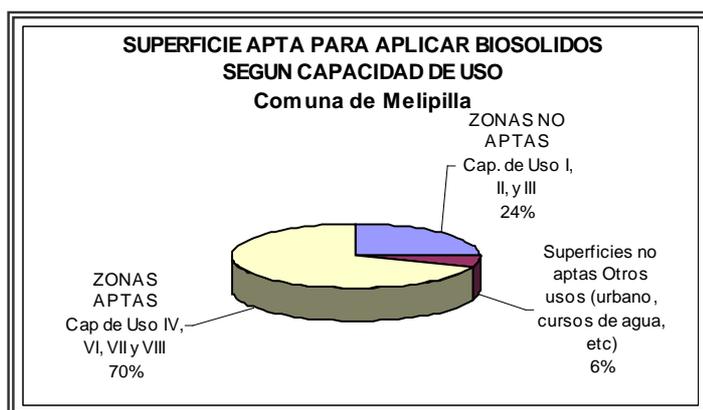
La razón principal por la cual estos suelos no deben ser contemplados para aplicar biosólidos, radica en que poseen muy buenas características físico-químicas, tales como profundidad adecuada, estructurados, de buena fertilidad natural y de baja pendiente, siendo buenos sostenedores de vida animal y vegetal, y participantes del ciclo hidrológico (CONAMA, 2002), por tanto, no se justifica el mejoramiento de sus características, ya que naturalmente las ostentan, e incluso depositarle biosólidos podría ocasionarles riesgos adicionales.

Considerando esta variable, al interior de la comuna de Melipilla, han sido excluidas las zonas que poseen capacidades de uso I, II y III, las que integran el 24% del total comunal (32.741 hás), como se observa en la Fig. 51.

También han sido excluidas, las superficies que poseen otro tipo de usos, con un 6%, sumando un total de 30%, equivalente a 41.302 hás en donde no se pueden aplicar biosólidos. Por lo general, estos suelos se ubican en sectores de pendientes suaves, en posición de fondo de valle, y se caracterizan por ser planos, profundos, y que se encuentran aledaños a los principales cursos de agua existentes dentro de la comuna.

Por el contrario, las superficies que tienen las potencialidades o condiciones necesarias para aplicar lodos (Fig. 52), deben tener, de acuerdo a la normativa, capacidades de uso de suelo IV, VI, VII y VIII. En su conjunto, estas zonas aptas reúnen 93.199 hás, representando el 70% de la superficie comunal, las que se ubican por lo general, en sectores con algunas limitaciones de carácter moderado de acuerdo a las características topográficas, con pendientes inclinadas, suelos relativamente delgados, y mayor pedregosidad.

Figura 51: Superficie apta para aplicar lodos según Cap. de Uso de Suelo, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996), y CONAMA (2006)

Es importante recalcar, que la normativa, hace una diferenciación entre los suelos que poseen severas limitaciones agrícolas o de capacidad de uso IV, y los suelos degradados (VI, VII, VIII). Para el caso de suelos degradados, la superficie apta según capacidad de uso, aumenta considerablemente con respecto a la de los suelos con severas limitaciones, ya que para el primer caso la superficie reúne el 63% del total comunal, en cambio para el segundo es de solo de 7%.

Dentro de los suelos degradados, destaca la mayor superficie, la cual pertenece a suelos con capacidad de uso de suelo VII, que se caracterizan por poseer terrenos donde se imposibilita el cultivo del suelo por efectos de la pendiente, rocosidad, etc. Estos suelos al interior de la comuna reúnen una superficie de 59.175 hás, equivalente al 44% del total comunal.

En segundo lugar, destacan aquellos suelos con capacidad de uso VI, con 13% del total comunal (17.132 hás), y finalmente aquellos con capacidad de uso VIII, que corresponde a terrenos sin valor agrícola, ganadero o forestal y destinado a otros usos, como actividades recreativas o relacionadas con el desarrollo de la vida silvestre.

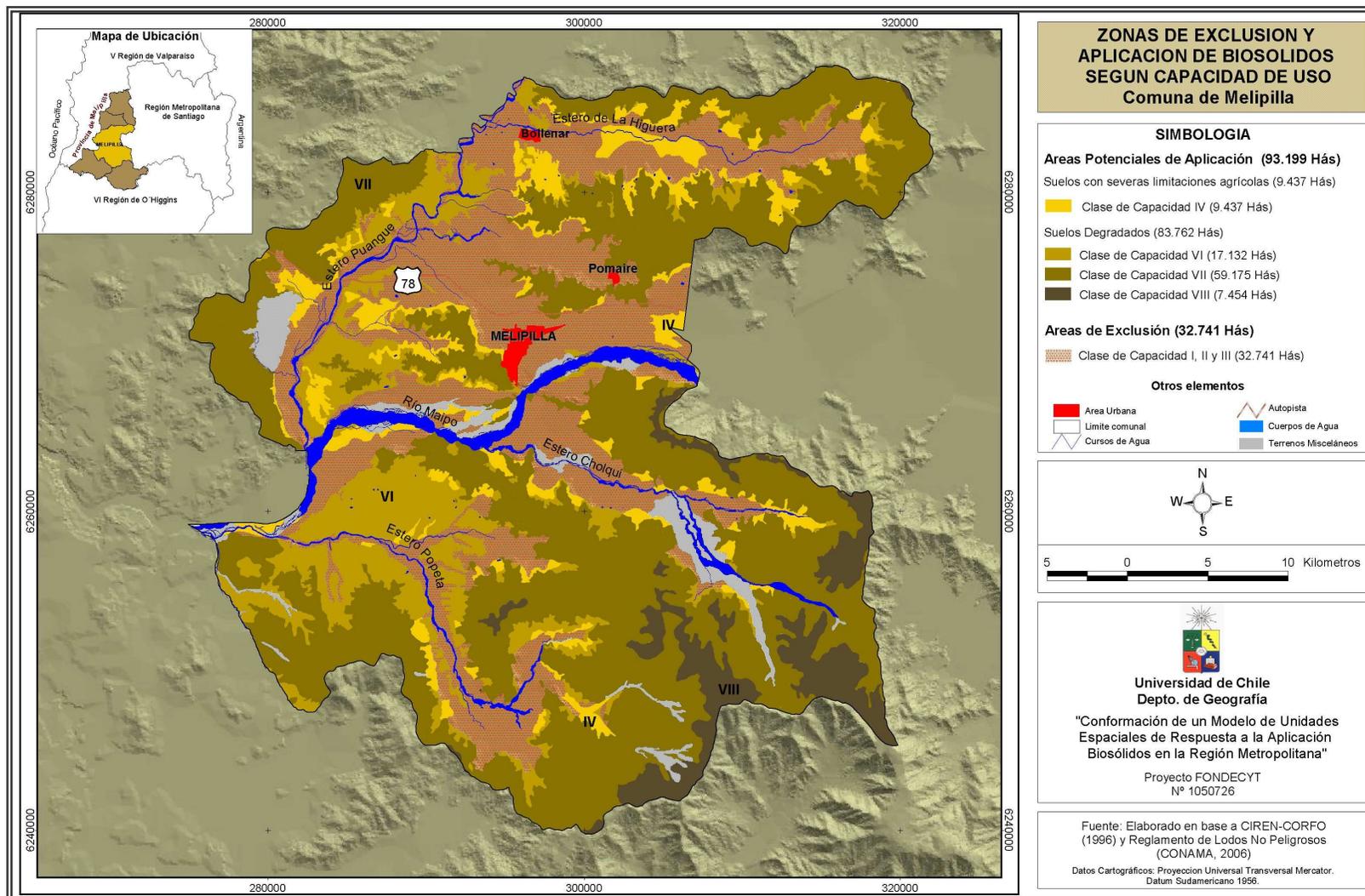
En la siguiente tabla, se distinguen las superficies asociadas por capacidad de uso de suelo:

Tabla 39: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a Capacidad de uso, Comuna de Melipilla

APTITUD BIOSOLIDOS		APLICACIÓN POTENCIAL SUELOS	SUPERFICIE (HÁS)	SUP (%)
NO APTOS		I	501,1	30%
		II	19.440,9	
		III	12.799,8	
		Zonas excluidas anteriormente	8.560,7	
		TOTAL ZONAS NO APTAS	41.302,6	
APTOS	Severas limitaciones agrícolas	IV	9.437,1	7%
	Suelos Degradados	VI	17.132,8	13%
		VII	59.175,1	44%
		VIII	7.454,6	6%
		TOTAL ZONAS APTAS	93.199,8	70%

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996), y CONAMA (2006)

Figura 52: Suelos con aptitud para aplicar biosólidos según Capacidad de Uso, Comuna de Melipilla



6.1.2.4 Napas Freáticas y Vegas

Con respecto a esta característica, se hace la salvedad en la normativa de que la aplicación de lodos no debe llevarse a cabo en suelos cuya napa freática sea inferior a 1 metro de profundidad, o donde se genere el efecto de napa colgante.

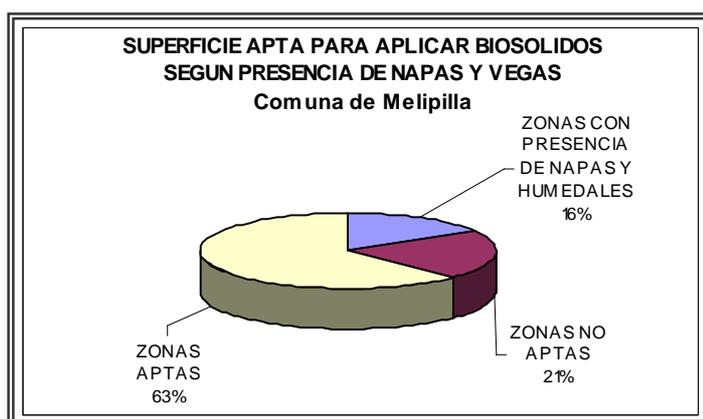
Esta variable es relevante, puesto que si se quisiera incorporar biosólidos a suelos en donde exista napa freática superficial, habría serios riesgos de contaminación, tanto de los suelos como del agua subterránea, ya que el contenido de elementos traza o de metales pesados, puede influir negativamente en el desarrollo de cultivos o afectar sectores con recurso de bebida animal, si no se toman las precauciones técnicas adecuadas. Para evitar esto, es que se deben descartar áreas que presenten vulnerabilidad de contaminación, tal como es el caso de los acuíferos presentes al interior del área de estudio, y que son reservorios de agua subterránea.

En la comuna de Melipilla, efectivamente hay presencia de napa freática superficial al centro de la comuna (Fig. 54), siendo ésta representada como una franja que aparece bordeando el río Maipo y el estero Cholqui. También se aprecia hacia al NW, cercana al estero Puangue.

La superficie cubierta por napas freáticas, y por parte del humedal del Maipo, al W de la comuna, representan el 16% del total comunal, las cuales deben ser incorporadas a aquellas zonas no aptas que reúnen el 21% de la comuna, sumando finalmente una superficie de 34% que quedaría excluida de la aplicación de biosólidos.

Por otro lado, las zonas potenciales o aptas para aplicar biosólidos serían de un 66%, las cuales estarían disponibles, ya que estos terrenos no poseerían riesgo de contaminación del acuífero, y tienen las napas freáticas lo suficientemente profundas como para que se genere un efecto nocivo sobre el medio ambiente y la población de los sectores aledaños.

Figura 53: Aptitud para aplicar lodos según presencia de napas freáticas y vegas, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaboración propia en base a PRMS (2006), y CONAMA (2006)

En comparación con la variable de capacidad de uso de suelo, vista anteriormente, la superficie no apta o excluida, se ha visto incrementada de un 30% a un 34%, al agregarse a ésta, el área asociada a la presencia de napas freáticas superficiales y la superficie ocupada por el humedal del Maipo, las abarcan un total de 46.611 hás.

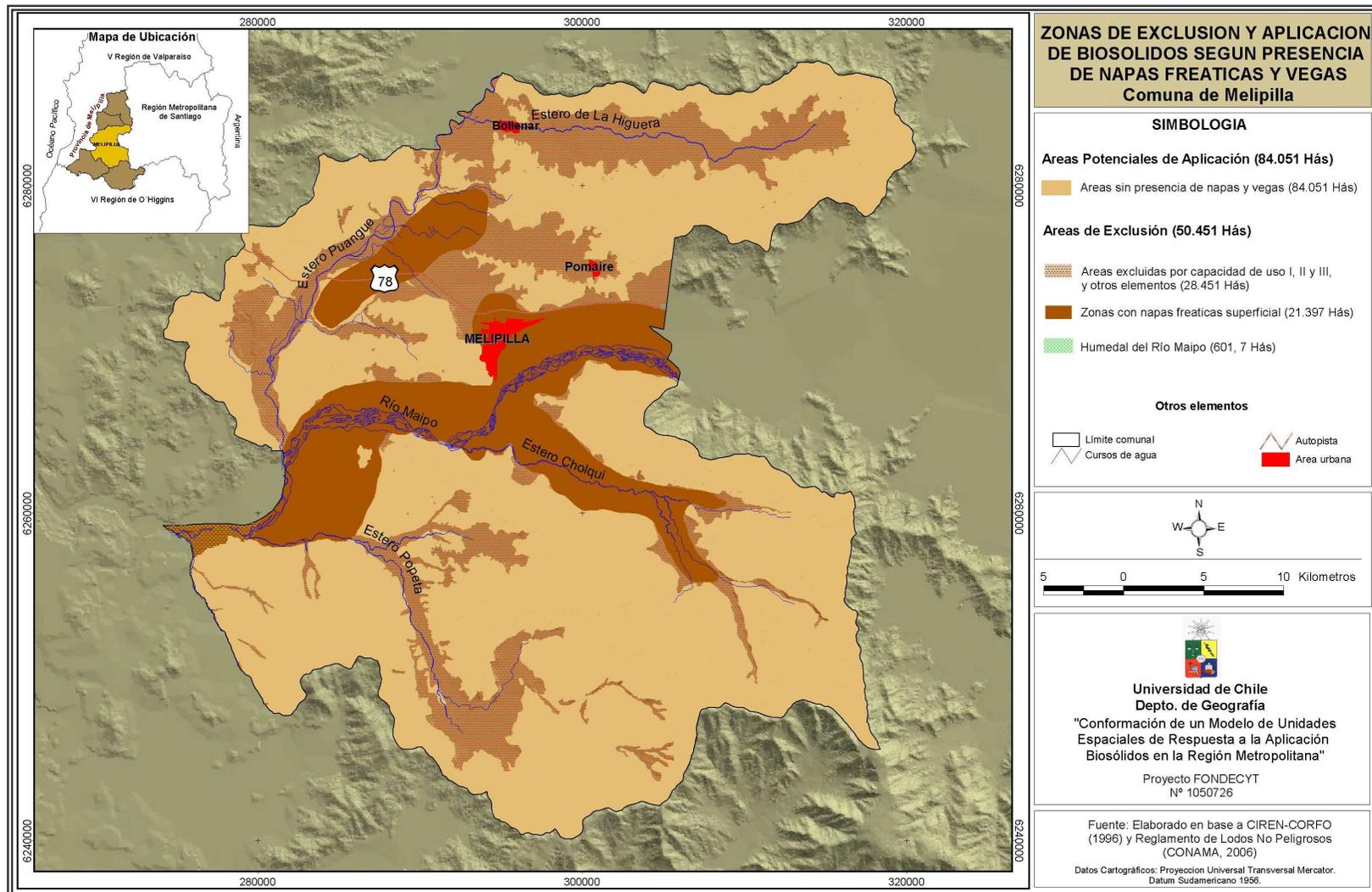
Por su parte, para aquellas zonas aptas (Tabla 40), siguen siendo los suelos degradados de capacidad de uso VII, los que poseen mayor representatividad areal para incorporar lodos derivados de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS), con 58.942 hás (44%), en contraposición con los suelos que tienen limitaciones productivas, y que solo reúnen el 5% de la superficie de la comuna de Melipilla, con 7.274 hás.

Tabla 40: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a presencia de napas y vegas, Comuna de Melipilla

APTITUD BIOSOLIDOS		APLICACIÓN POTENCIAL SUELOS	SUPERFICIE (HÁS)	SUP (%)
NO APTOS		Humedal del Río Maipo	601,7	34%
		Napa Freática superficial	21.397,6	
		Zonas excluidas anteriormente	24.611,9	
		TOTAL ZONAS NO APTAS	46.611,4	
APTOS	Severas limitaciones agrícolas	IV	7.274,6	5%
	Suelos Degradados	VI	14.219,0	11%
		VII	58.942,3	44%
		VIII	7.454,6	6%
		TOTAL ZONAS APTAS	87.890,6	66%

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996), y CONAMA (2006)

Figura 54: Suelos con aptitud para aplicar biosólidos según Napas Freáticas y Vegas, Comuna de Melipilla



6.1.2.5 Pendiente menor a 60%

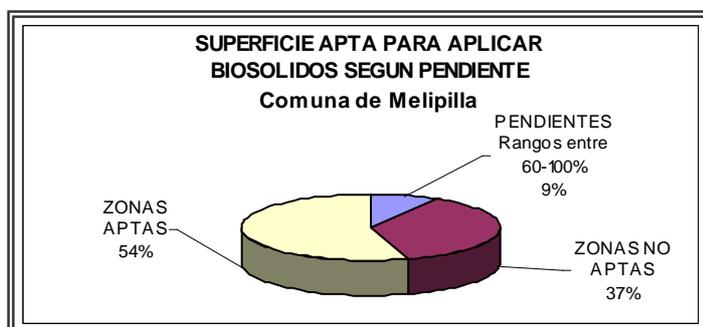
El Reglamento de Lodos No Peligrosos (CONAMA, 2006), hace una diferenciación de acuerdo a los rangos de pendiente para suelos que presenten severas limitaciones agrícolas, y los suelos degradados. Pero en términos generales, sean de un tipo de suelo o de otro, los rangos aptos deben variar desde 0-15% a 45-60%, no sobrepasando este umbral, ya que a mayor pendiente hay mayores probabilidades de la ocurrencia de procesos morfodinámicos, favoreciéndose a su vez, la generación de procesos erosivos.

Por ende, las zonas aptas para aplicar biosólidos al interior de la comuna de Melipilla, reúnen el 54% de la superficie comunal, siendo esta cifra equivalente a 73.659 hás, de acuerdo a los rangos mencionados anteriormente.

Por otro lado, las zonas que han sido descartadas, se han visto incrementadas una vez que se hace cada exclusión por variable, como se observó anteriormente, de acuerdo al pH, a la capacidad de uso I, II, y III, presencia de napas etc, reuniendo en su totalidad el 37% de la superficie de la comuna de Melipilla.

A esta superficie excluida, en consecuencia, debe adjuntarse la superficie asociada a pendientes con rangos de inclinación entre 60 a 100%, que reúne el 9% de la comuna, y que se ubica en todos los cordones de cerros al interior de Melipilla, tal como se indica en el siguiente gráfico:

Figura 55: Aptitud para aplicar lodos según rangos de pendiente, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996), y CONAMA (2006)

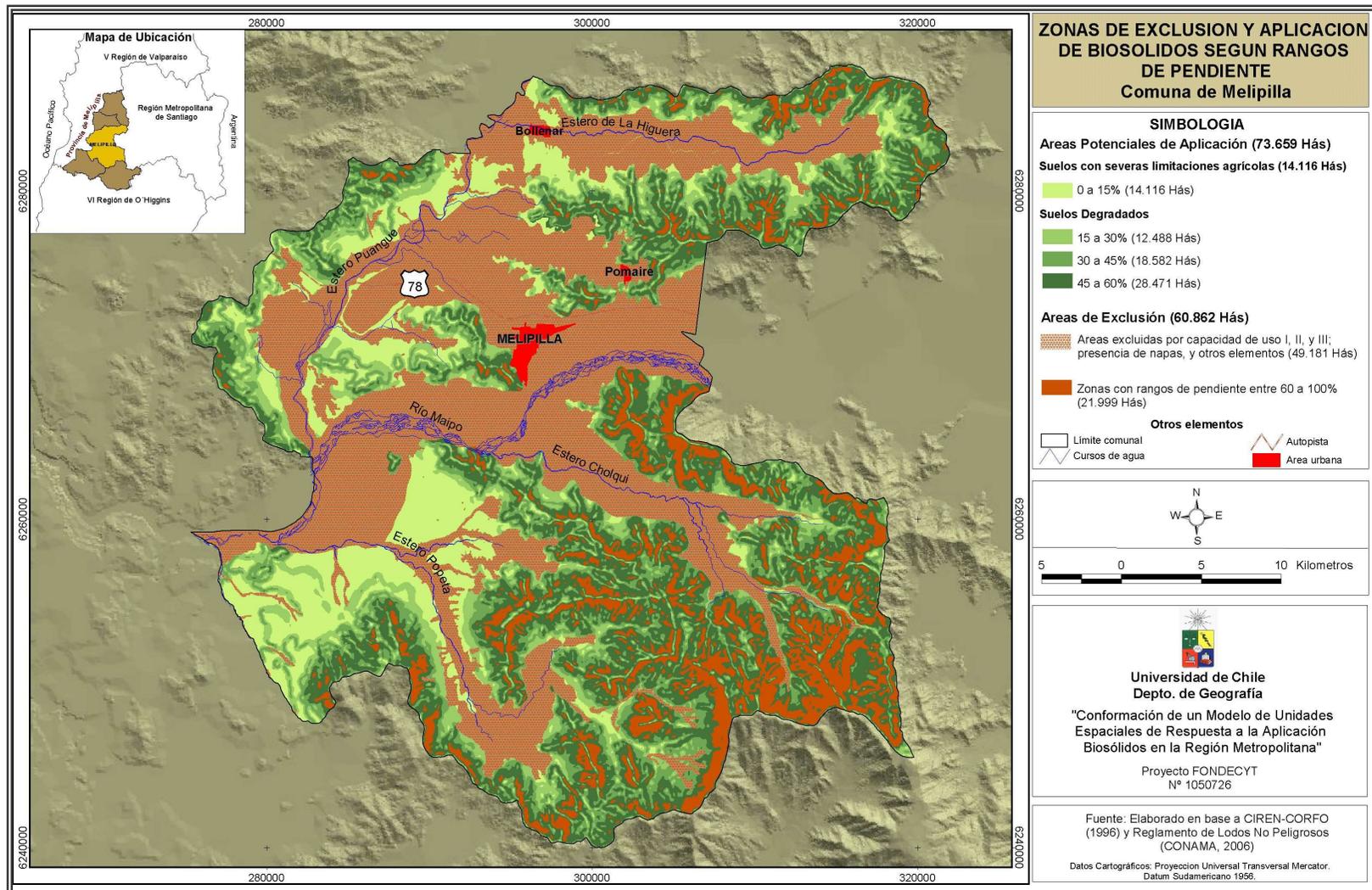
Ahora, dentro de las zonas catalogadas como aptas, es importante referirse a que existe un predominio importante de pendientes cuyos rangos varían entre el 45 a 60%, con 28.471 hás (21% de la superficie comunal), le siguen las pendientes con rangos entre 30 a 45%, 0 a 15%, y finalmente, aquellas zonas cuyas pendientes varían entre 15 a 30%, con 12.488 hás.

Tabla 41: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a rangos de pendiente, Comuna de Melipilla

APTITUD BIOSOLIDOS		APLICACIÓN POTENCIAL SUELOS	SUPERFICIE (HÁS)	SUP (%)
NO APTOS		Zonas excluidas anteriormente	49.161,0	37%
		60-100%	11.681,8	9%
		TOTAL ZONAS NO APTAS	60.842,8	46%
APTOS	Severas limitaciones agrícolas	0-15%	14.116,8	10%
	Suelos Degradados	15-30%	12.488,2	9%
		30-45%	18.582,8	14%
		45-60%	28.471,4	21%
		TOTAL ZONAS APTAS	73.659,4	54%

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996), y CONAMA (2006)

Figura 56: Suelos con aptitud para aplicar biosólidos según Rangos de Pendiente, Comuna de Melipilla



6.1.2.6 Índice de Riesgo Climático: Agresividad del Clima

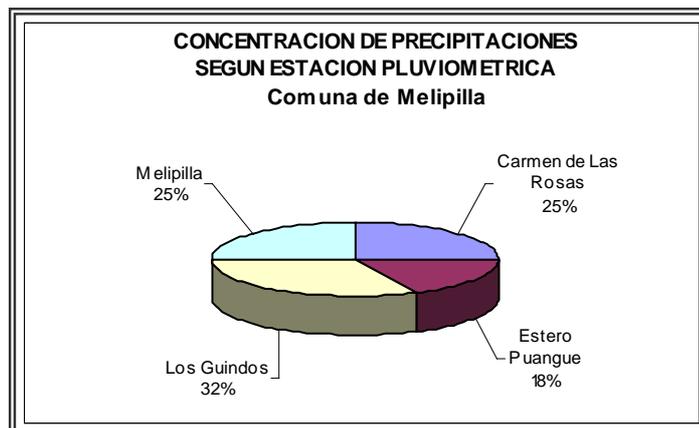
La componente climática, es la última variable considerada por el Reglamento de Lodos No Peligrosos (CONAMA, 2006), para suelos que se encuentren en situaciones de riesgo, ya que se debe prohibir la aplicación de lodos en áreas que concentren precipitaciones altas y muy altas, de acuerdo a un Índice de Riesgo Climático.

Como se demostró en la primera etapa de la presente investigación, con respecto a los factores que inciden en la erodabilidad del terreno, el suelo, frente a determinadas condiciones queda expuesto a la acción de agentes atmosféricos dotados de poder erosivo, como son el viento y el agua de lluvia (FOURNIER, 1975).

De acuerdo a lo anterior, efectivamente el área de estudio posee condiciones climáticas de tipo agresivo, en donde las intensidades de precipitación derivadas del Índice Modificado de Fournier, varía de niveles *moderados* a *muy altos*. Esto implica que el agua de lluvia provoca la erosión del suelo por el impacto de las gotas sobre su superficie, cayendo con velocidad y energía variables, y a través del escurrimiento del torrente (OGURA y OSARES, 1985).

Al homologar los datos de precipitaciones con los porcentajes de superficie correspondientes a cada estación meteorológica (Fig. 57), se puede apreciar que la estación que presenta mayor concentración de precipitaciones corresponde a la de *Los Guindos*, cuya área de influencia al interior de la comuna, cubre el 32%, en donde precipita en promedio 182.7 mm, considerado como un rango *muy alto*. Por el contrario, la estación *Estero Puangue en Ruta 68*, cubre sólo el 18% de la superficie total del área de estudio. A pesar de su reducida superficie, los niveles de agresividad climática son considerados como *moderados* (103.1 mm de precipitación), existiendo de igual forma, la susceptibilidad del suelo a ser atacado y arrastrado por el agua.

Figura 57: Concentración de Precipitaciones, Comuna de Melipilla

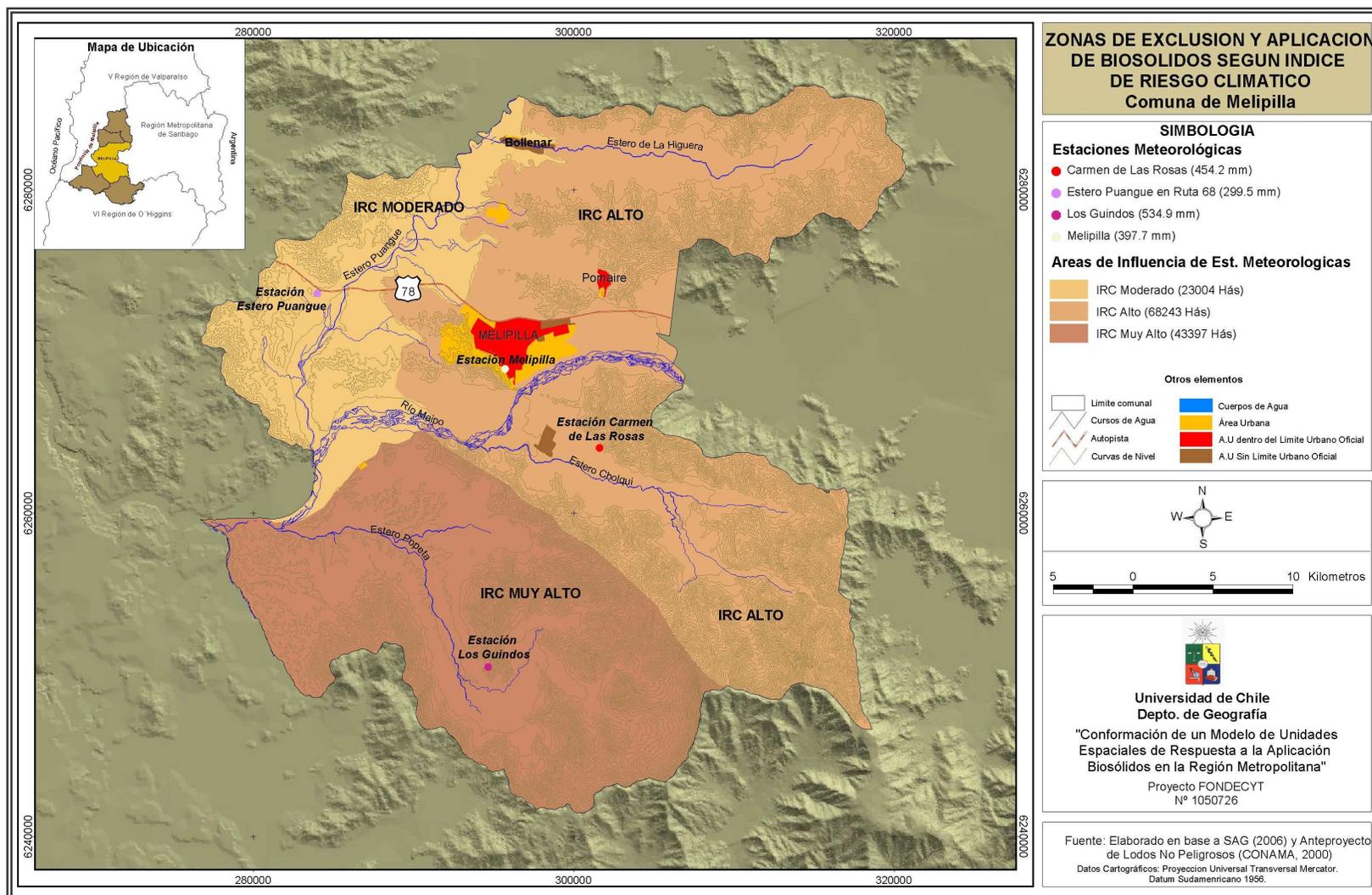


Fuente: Elaborado en base a SAG (2006)

Si bien, los niveles de agresividad pluvial al interior de Melipilla son *altos* (Fig. 58), los cuales podrían afectar la viabilidad y el diseño de los sistemas de utilización de lodos, no son del todo determinantes ya que en la misma normativa se señala que se pueden emplear planes de aplicación con medidas especiales, con el fin de reconsiderar las áreas que quedarían excluidas.

Además de esto, se debe considerar que la caracterización climática, es sólo uno de los insumos para identificar las áreas excluidas de la aplicación de biosólidos, ya que falta un análisis íntegro de todas las variables que inciden en las propiedades del suelo, en base a una rigurosa caracterización complementaria, de manera tal que se tome la mejor decisión para la localización de zonas alternativas de disposición de lodos.

Figura 58: Suelos con aptitud para aplicar biosólidos según Riesgo Climático, Comuna de Melipilla



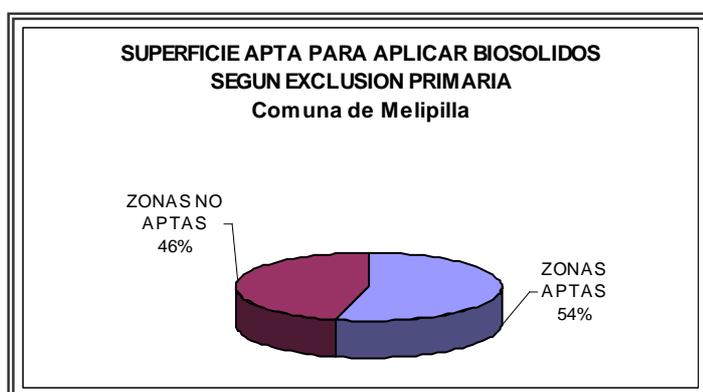
6.1.2.7 Zonas aptas y excluidas en etapa primaria

Considerando que en las superficies que presentan una condición de riesgo según lo planteado por la normativa, no se pueden aplicar lodos en suelos con pH inferior a 5, clases de capacidad de uso I, II, III y VIII, presencia de napas freáticas y humedales, pendientes cuyos rangos son superiores al 60% de inclinación, y finalmente los buffer generados en zonas urbanas y cursos de agua, se ha llegado a una aproximación primaria de las áreas en las cuales se podría incorporar biosólidos. Sin embargo, es necesario incluir también las componentes asociadas a aspectos edafológicos de la comuna de Melipilla, y que corresponde a una etapa posterior y determinante para la aplicación de estos subproductos.

De acuerdo a la superposición de las componentes consideradas, se observa que a pesar de que se ha reducido considerablemente la superficie apta para disponer biosólidos (Fig. 59), ha quedado una proporción bastante alta en términos absolutos con áreas degradadas que se podrían recuperar, reuniendo más del 53% de la superficie comunal (72.311 hás), las cuales poseen condiciones óptimas para la incorporación de lodos residuales. Al comparar otras zonas a nivel nacional donde se ha experimentado con biosólidos, como por ejemplo en la Región Metropolitana, destaca Melipilla, como una comuna que tiene un alto potencial de incorporación de biosólidos, de acuerdo al análisis primario de exclusión.

El resto, no posee los atributos necesarios, por lo cual surge una superficie del orden del 46%, que ha quedado al margen de una posible aplicación de lodos, lo cual es equivalente a 62.211 hás.

Figura 59: Superficie apta y no apta donde disponer biosólidos, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaboración Propia

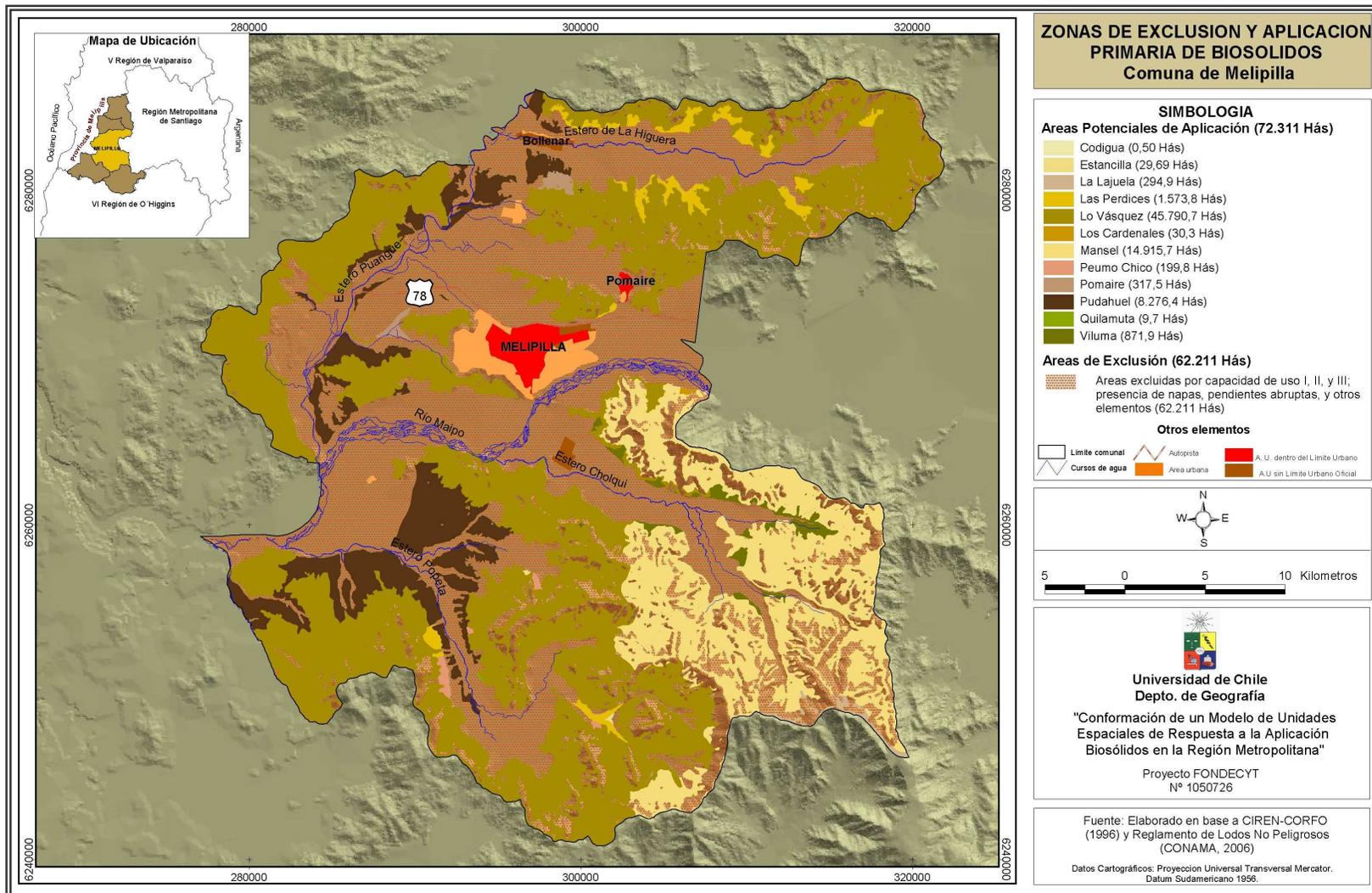
La superficie apta para disponer lodos (Tabla 42), está conformada por 12 series de suelo, las cuales corresponden a la serie de *Lo Vásquez*, *Las Perdices*, *Pudahuel*, *La Lajueta*, *Asociación Mansel*, *Estancilla*, *Codigua*, *Los Cardenales*, *Quilamuta*, *Viluma*, *Peumo Chico* y *Pomaire*, siendo la serie *Lo Vásquez*, la que abarca mayor cantidad de superficie al interior de Melipilla, con 45.790 hás, en cambio, la que posee una menor superficie es la serie *Estancilla* con 0.02 hás, tal como se indica a continuación:

Tabla 42: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a Exclusión Primaria, Comuna de Melipilla

APTITUD BIOSOLIDOS	APLICACIÓN POTENCIAL SUELOS	SUPERFICIE (HÁS)	SUP (%)
NO APTOS	Zonas excluidas anteriormente	62.211	46,20%
	TOTAL ZONAS NO APTAS	62.211	
APTOS	Lo Vásquez	45.790,7	34,04%
	Las Perdices	1.573,8	1,17%
	Pudahuel	8.276,4	6,15%
	La Lajuela	294,9	0,22%
	Mansel	14.915,7	11,09%
	Estancilla	29,6	0,02%
	Codigua	0,5	0,04%
	Los Cardenales	30,3	0,02%
	Quilamuta	9,7	0,01%
	Viluma	872,9	0,65%
	Peumo Chico	199,8	0,15%
	Pomaire	317,5	0,24%
	TOTAL ZONAS APTAS	72,311.9	53,80%

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Figura 60: Áreas de Exclusión y Aplicación Primaria de Biosólidos



6.1.3 Áreas de Exclusión Secundaria

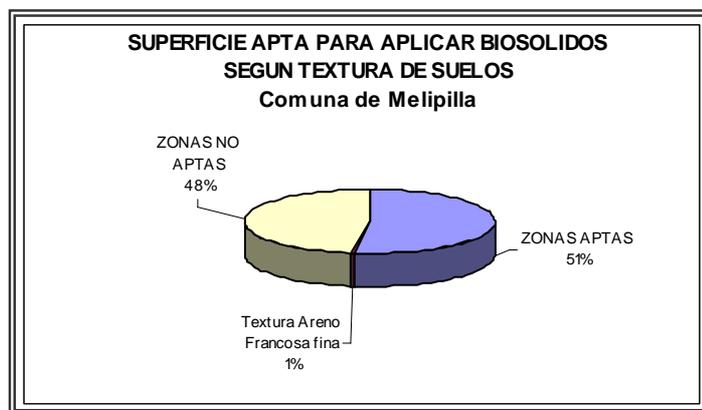
6.1.3.1 Textura superficial de suelos

La normativa, no permite aplicar lodos en suelos cuya textura sea del tipo *arenosa*, o *areno francosa*, o cuyo porcentaje de arena sea mayor al 70%, y la justificación respectiva es planteada por C.S.I.C (1995), en donde los suelos con clases texturales gruesas, pueden aceptar una gran cantidad de agua sin escorrentía, pero la capacidad de incorporación de lodo es a menudo baja ya que, por lo general, son pobres en materia orgánica y mal estructurados

En el área de estudio, se destaca que hay sólo un 1% de la superficie comunal (Fig. 61), con suelos de este tipo, destacando la serie de suelo *Isla de Huechún*, que posee una textura de tipo *areno francosa fina*, la cual se localiza al centro de la comuna, ubicada cercana al río Maipo, en una posición de fondo de valle, con pendientes suaves, y con una napa freática cercana a la superficie.

Esta reducida superficie (702 hás), debe agregarse a la de *zonas no aptas*, definidas anteriormente, de manera tal, que las áreas que no cumplen con los requerimientos expresados por la normativa suman el 49% de la superficie comunal, lo que corresponde específicamente a 64.533 hás.

Figura 61: Superficie apta para disponer biosólidos de acuerdo a textura, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaboración Propia

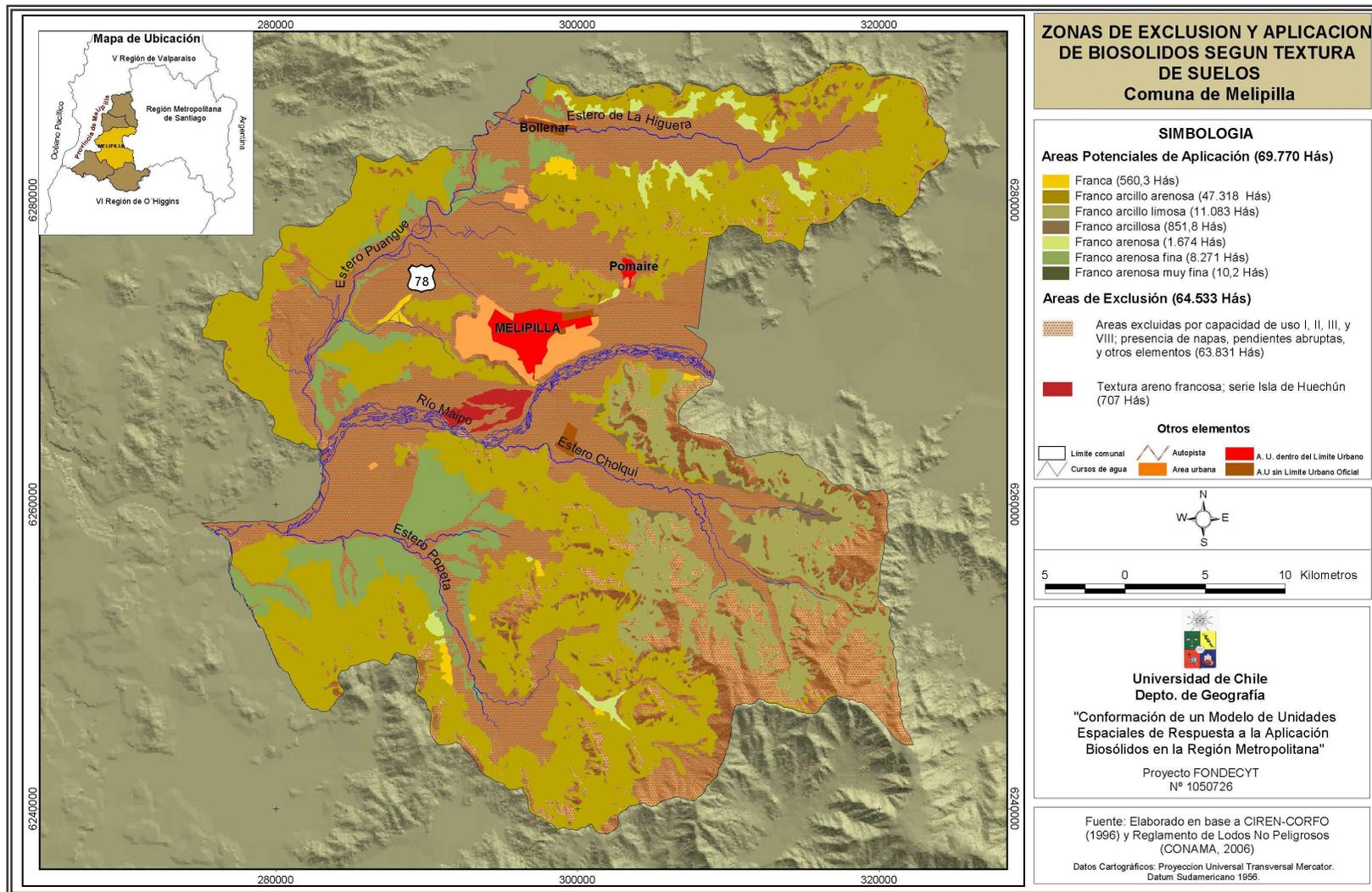
Por su parte, el resto de la superficie comunal (51%), cumple con poseer diversos tipos de texturas aptas para la disposición de biosólidos, entre las cuales destacan la *Franco arcillo arenosa*, *Franco arenosa*, *Franco arenosa fina*, *Franco arcillo limosa*, *Franca*, *Franco arenosa muy fina*, y *Franco arcillosa* (Tabla 43). La disposición espacial de estas, se ubican preferentemente en zonas marginales de la comuna de Melipilla, siendo la más representativa en términos de superficie, la textura *Franco arcillo arenosa*, con 47.318 hás, a diferencia de la textura *franco arenosa muy fina* que posee solamente 10.2 hás.

Tabla 43: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a Textura Superficial de suelos, Comuna de Melipilla

APTITUD BIOSOLIDOS	APLICACIÓN POTENCIAL SUELOS	SUPERFICIE (HÁS)	SUP (%)
NO APTOS	Zonas excluidas anteriormente	63.831,7	49%
	Areno francosa fina (Isla de Huechún)	702,0	
	TOTAL ZONAS NO APTAS	64.533,8	
APTOS TEXTURAS	Franco arcillo arenosa	47.318,3	35%
	Franco arcillo limosa	11.083,4	8%
	Franco arenosa fina	8.271,4	6%
	Franco arenosa	1.674,6	1%
	Franco arcillosa	851,8	0,63%
	Franca	560,3	0,42%
	Franco arenosa muy fina	10,2	0,01%
	TOTAL ZONAS APTAS	69.770,2	51%

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Figura 62: Suelos con aptitud para aplicar biosólidos según Textura Superficial de suelos, Comuna de Melipilla



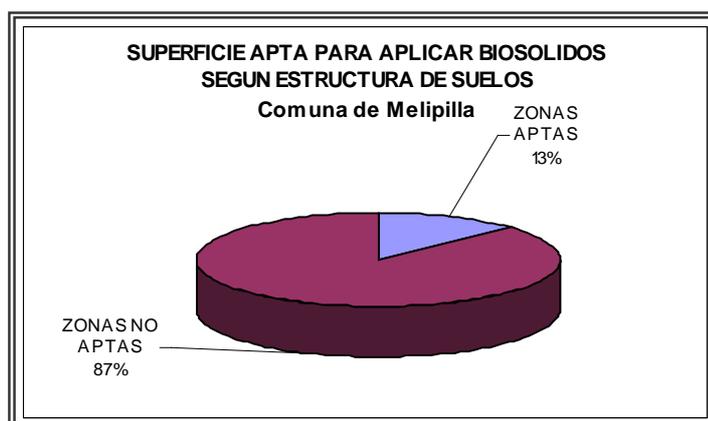
6.1.3.2 Estructura de suelos

La estructura de suelos, también influye en la incorporación de lodos al suelo, y ha sido una de las componentes más relevantes al momento de llevar a cabo la exclusión de áreas, puesto que se ha reducido considerablemente la superficie apta para disponer los lodos residuales (Fig. 63), quedando sólo un 13% de la comuna con esta condición (Fig.63).

Se debe recordar, que de acuerdo al *Reglamento de Lodos No Peligrosos* (CONAMA, 2006), las áreas competentes para la aplicación de biosólidos deben poseer tamaños de unidades estructurales de tipo *muy fina*, *fina* y *media* en el caso de suelos que presenten limitaciones productivas o de capacidad de uso IV. Por su parte, para el caso de suelos degradados, las estructuras aceptables deben tener unidades *medias* y *gruesas*. Integrando ambas realidades, queda solamente una superficie del 13%, que cumple con estas características.

Por el contrario, la superficie restringida, ha aumentado desde un 49% de superficie (registrada anteriormente) hasta un 87% lo que se debe principalmente a que la comuna posee suelos con estructuras inadecuadas según lo planteado por la ley.

Figura 63: Superficie apta para disponer biosólidos de acuerdo a estructura de suelos, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaboración Propia en base a CIREN-CORFO (1996), y CONAMA (2006)

Para el caso de suelos con severas limitaciones agrícolas, se deben excluir las estructuras *gruesas*, y en este sentido considerando a los suelos con capacidad de uso IV dentro de la comuna, han quedado al margen de una posible aplicación de lodos, los suelos con estructura de *bloques subangulares gruesos* que poseen una superficie de 15.2 hás. Los suelos aptos, por su parte poseen estructuras superficiales de *bloques subangulares* y *angulares finos*, con 3.002 hás (2.22%).

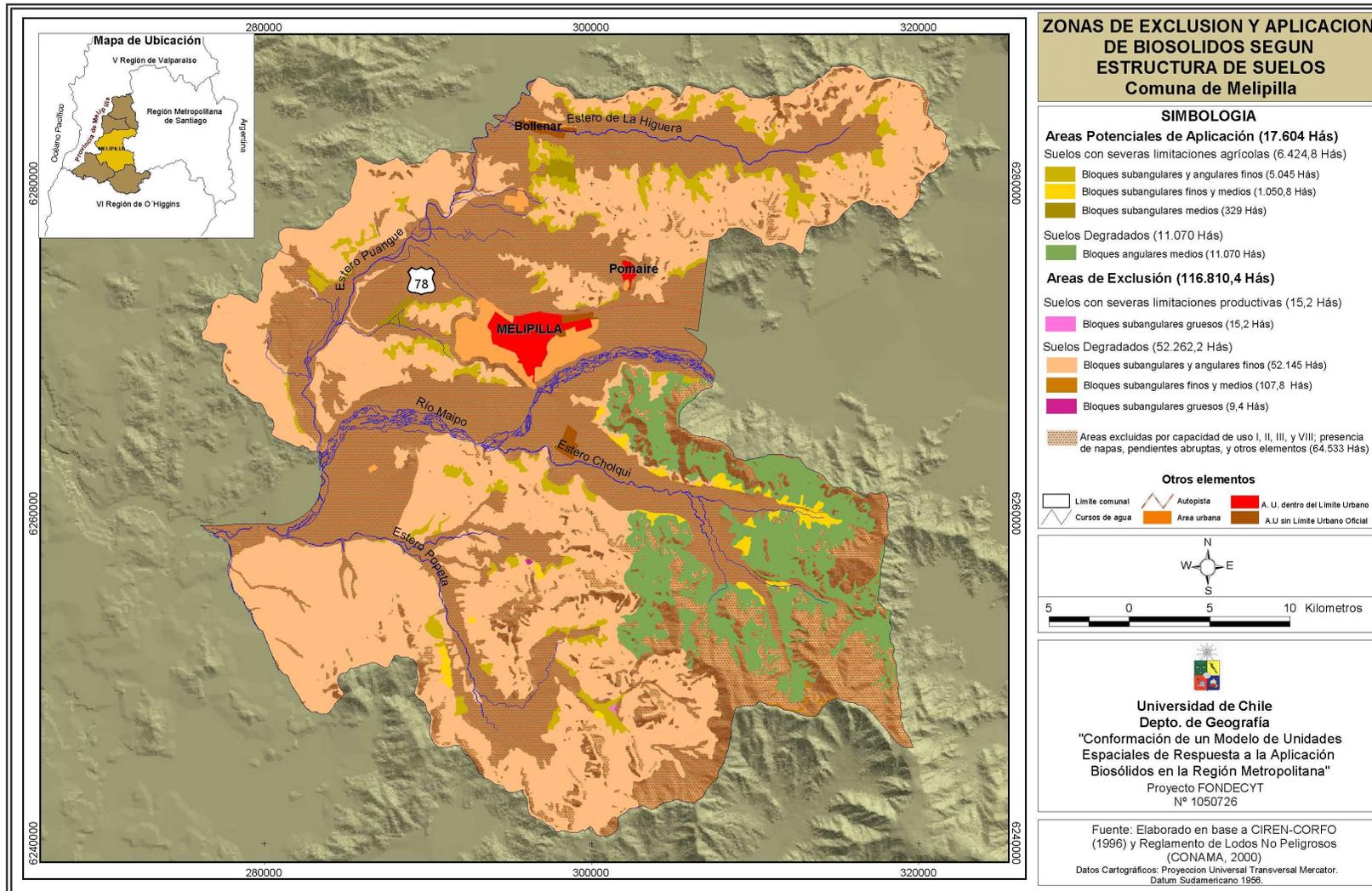
En el caso de suelos degradados (VI y VII), la exclusión incluye a suelos con estructuras *finas* y *gruesas*, como por ejemplo, la de *bloques subangulares* y *angulares finos*, *bloques subangulares gruesos*, y *bloques subangulares finos*, sumándose una superficie total de 52.155 hás (Tabla 44). Dentro de los suelos aptos, destacan en términos de superficie, las estructura de *bloques angulares medios* que suman 11.070 hás, muy por sobre la mayor superficie asociada a suelos con limitaciones productivas.

Tabla 44: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a Estructura Superficial de suelos, Comuna de Melipilla

APTITUD BIOSOLIDOS		APLICACIÓN POTENCIAL SUELOS	SUPERFICIE (HÁS)	SUP (%)
NO APTOS		Zonas excluidas anteriormente	64.533,8	86.97%
		Estructuras excluidas	52.278,5	
		TOTAL ZONAS NO APTAS	116.812,3	
APTOS	Severas limitaciones agrícolas	Bloques subangulares y angulares finos	5.046,0	3,76%
		Bloques subangulares medios y finos	1.051,6	0,78%
		Bloques subangulares medios	329,1	0,25%
	Suelos Degradados	Bloques angulares medios	11.070,4	8,24%
		TOTAL ZONAS APTAS	17.497,3	13,03%

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Figura 64: Suelos con aptitud para aplicar biosólidos según Estructura Superficial de suelos, Comuna de Melipilla



6.1.3.3 Drenaje y Permeabilidad

En relación a estas variables, es importante señalar que la normativa expresa que pueden aplicarse biosólidos en aquellos suelos que presenten clases de drenaje del tipo *imperfectamente drenado*, *moderadamente bien drenado*, y *bien drenado*, tanto para aquellos suelos que presenten limitaciones productivas, como para los suelos degradados.

Los suelos con clases de drenaje del tipo *muy pobremente drenado* y *pobremente drenado*, por su parte presentan restricciones naturales ya que necesitarían de un sistema de drenaje artificial para que fuera viable la aplicación de lodos.

En el caso de suelos *excesivamente drenados*, estos permiten una rápida descarga de agua por lo que la estabilidad de los biosólidos puede verse amenazada.

En términos de permeabilidad en la comuna, se destaca que ésta varía de *moderada* a *rápida*, por lo cual, la infiltración del agua en el suelo tiene facilidades ya que presenta texturas de tipo media o franca.

Analizando el área disponible para incorporar biosólidos (Fig. 65), que es de 17.497 há, equivalente a un 13% de la superficie total, se destaca que esta área efectivamente está cubierta por suelos con estas clases de drenaje, encontrándose de los tres tipos, en suelos con limitaciones productivas o de capacidad de uso IV. En este caso, destaca por sobre las demás, la clase *bien drenado*, que cubre el 4.9% de la superficie comunal.

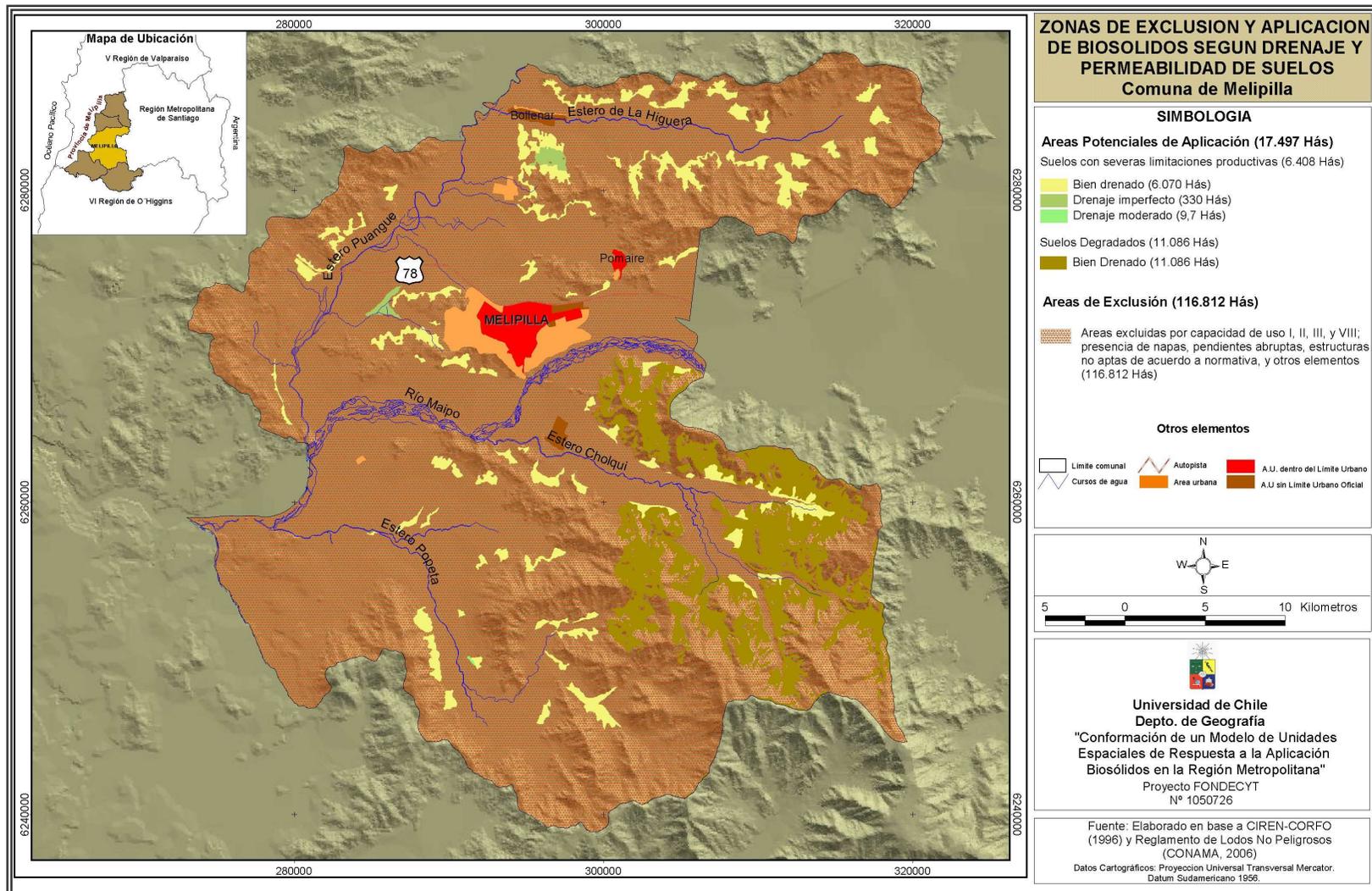
Para el caso de suelos degradados (Tabla 45), también destaca esta clase, y que por lo demás es la única existente, con 11.086 há equivalente a 7.9% de la comuna de Melipilla.

Tabla 45: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a Clases de Drenaje y Permeabilidad de suelos, Comuna de Melipilla

APTITUD BIOSOLIDOS		APLICACIÓN POTENCIAL SUELOS	SUPERFICIE (HÁS)	SUP (%)
NO APTOS		Zonas excluidas anteriormente	116.812,3	87%
		TOTAL ZONAS NO APTAS	116.812,3	87%
APTOS	Severas limitaciones agrícolas	Bien Drenado	6.070,4	4,9%
		Drenaje Imperfecto	330,1	0,19%
		Moderado	9,7	0,01%
	Suelos Degradados	Bien Drenado	11.086,8	7,9%
		TOTAL ZONAS APTAS	17.497,1	13%

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Figura 65: Suelos con aptitud para aplicar biosólidos según Drenaje y Permeabilidad de suelos, Comuna de Melipilla



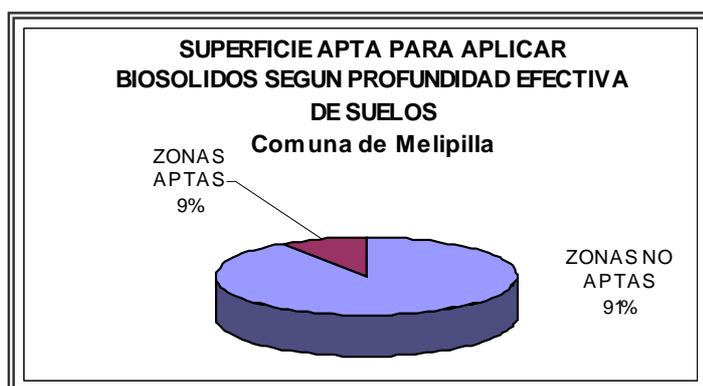
6.1.3.4 Profundidad Efectiva

Se permite la aplicación de lodos en aquellos suelos con limitaciones agrícolas, cuyos rangos de profundidad efectiva varíen entre 25 cm a 75 cm, quedando excluidos aquellos suelos muy delgados (< 25cm), y los que son mayores a 75 cm (*moderadamente profundo* y *profundos*).

En el caso de los suelos degradados, la aplicación de biosólidos es posible en suelos que posean un espesor mayor a 20 cm.

Sin considerar las diferenciaciones (Fig. 66), y en términos generales, la superficie que cumple con los requisitos para aplicar lodos reúne solo un 9% de la superficie comunal, el resto (91%) a quedado descartado de una posible aplicación ya que posee condiciones no óptimas de acuerdo a las demás variables tratadas anteriormente, tal como se indica a continuación:

Figura 66: Superficie apta para disponer biosólidos de acuerdo a profundidad efectiva de suelos, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaboración Propia

La tabla 46, indica que hay una superficie apta para aplicar lodos de 12.401 hás dentro de la comuna de Melipilla, siendo las profundidades efectivas más significativas, las *ligeramente profundas*, cuyos espesores varían entre 50 a 75 cm, y reúnen una superficie total de 10.153 hás.

El resto de las superficies aptas (Fig. 67), posee áreas exiguas, inferiores al 1% de la representatividad comunal. En consecuencia, las zonas que cumplen con las potencialidades para incorporar lodos en función de esta variable, es de 9.23%, versus una superficie restringida de 90.77% del total comunal.

Tabla 46: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo a Profundidad efectiva de suelos, Comuna de Melipilla

APTITUD BIOSOLIDOS		APLICACIÓN POTENCIAL SUELOS	SUPERFICIE (HÁS)	SUP (%)
NO APTOS		Zonas excluidas anteriormente	116.812,3	90,77%
		75 a 100 cm	5.077,3	
		< 25 cm	107,3	
		TOTAL ZONAS NO APTAS	121.996,9	
APTOS	Severas limitaciones agrícolas	50 a 75 cm	965,4	0,72%
		25 a 50 cm	365,4	0,27%
	Suelos Degradados	50 a 75 cm	10.113,2	7,56%
		75 a 100 cm	868,1	0,68%
		TOTAL ZONAS APTAS	12.312	9,23%

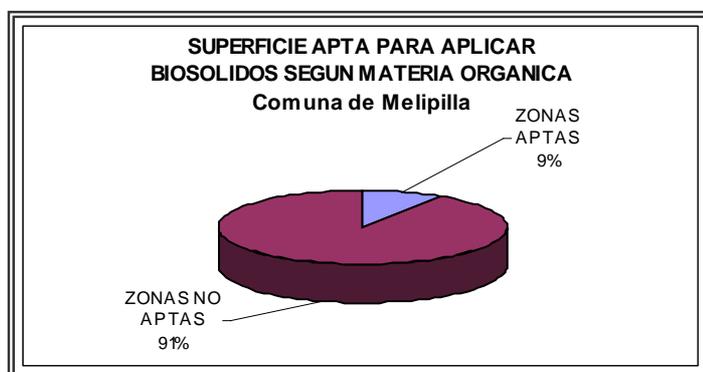
Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

6.1.3.5 Materia Orgánica

La normativa es patente en indicar que no se justifica la incorporación de lodos en suelos que presenten niveles adecuados de materia orgánica. Es por esto que se aceptan suelos con porcentajes de materia orgánica que sean menores al rango de *normal*, o inferiores al 5%.

De acuerdo a esto, en términos generales la superficie comunal (Fig. 68), posee un 9% de su superficie con aptitud para aplicar lodos, el resto (91%) posee situaciones adversas, tal como se indica en el siguiente gráfico:

Figura 68: Superficie apta para disponer biosólidos de acuerdo a contenido de materia orgánica de suelos, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaboración Propia

Dentro del 9.23% de la superficie apta (Fig. 69), se evidencia, para suelos con severas limitaciones agrícolas, la presencia de suelos con contenidos de materia orgánica de tipo *muy deficiente*, *deficiente* y *algo deficiente*, cuyos rangos varían entre 0.9% a 3.6%, los cuales suman una superficie total de 1.330 hás.

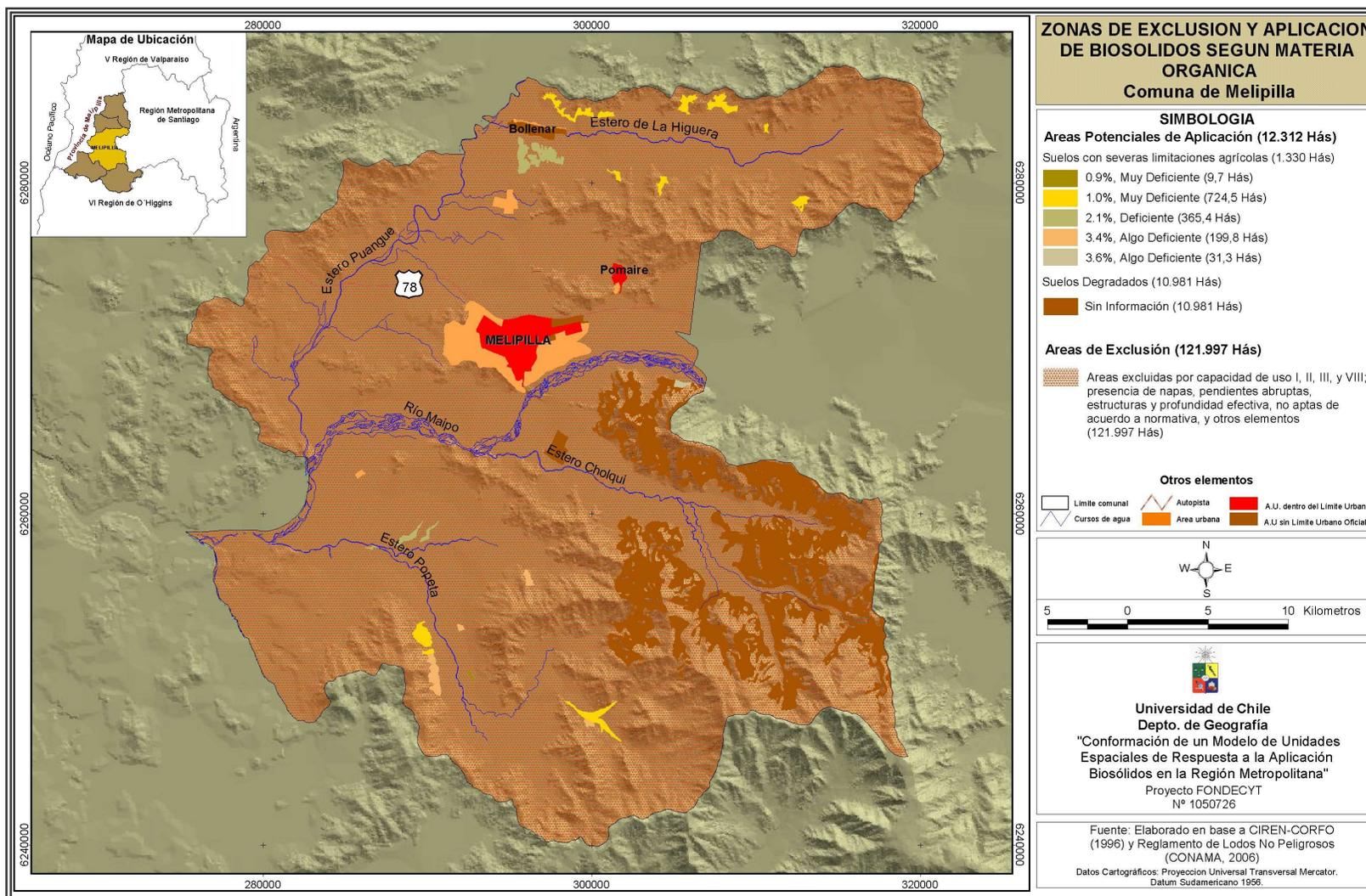
Para los suelos degradados, hay una superficie importante de 10.981 hás, en las cuales, de acuerdo a la información extraída de CIREN-CORFO (1996), no hay información con respecto al contenido de materia orgánica, pero que se asocia a la denominada *Asociación Mansel*.

Tabla 47: Suelos potenciales y excluidos de acuerdo al contenido de materia orgánica de suelos, Comuna de Melipilla

APTITUD BIOSOLIDOS		APLICACIÓN POTENCIAL SUELOS	SUPERFICIE (HÁS)	SUP (%)
NO APTOS		Zonas excluidas anteriormente	121.997	90.77%
		TOTAL ZONAS NO APTAS	121.997	
APTOS	Severas limitaciones agrícolas	Muy deficiente	734.2	0.55%
		Deficiente	365.4	0.27%
		Algo deficiente	231.2	0.17%
	Suelos Degradados	Sin Información	10.981,4	8.24%
		TOTAL ZONAS APTAS	12.312,3	9,23%

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Figura 69: Suelos con aptitud para aplicar biosólidos según Materia Orgánica de suelos, Comuna de Melipilla

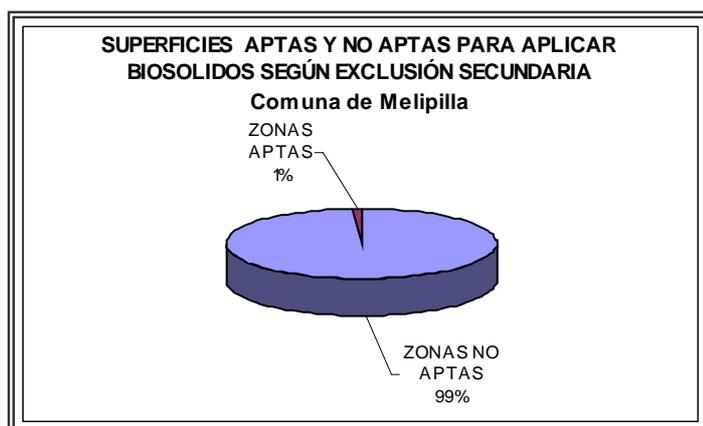


6.1.3.6 Zonas aptas y excluidas en etapa secundaria

La fase secundaria de exclusión conforma la etapa concluyente y definitiva de este análisis, puesto que ya se han superpuesto todas las capas de información físico-natural de la comuna de Melipilla, con el fin de determinar las áreas susceptibles de incorporar biosólidos.

En este sentido, es importante indicar que desde que se inició la exclusión de variables, la superficie disponible para incorporar lodos se ha reducido de tal manera, que finalmente ha quedado una restringida superficie con las condiciones óptimas para aplicar lodos al suelo, lo cual se ve avalado por el siguiente gráfico (Fig. 70), que señala que sólo el 1% de la superficie comunal cumple con las estipulaciones presentadas por la normativa, considerando sólo los aspectos físico-naturales, y sin inmiscuirse aún, en los antecedentes asociados al contenido de metales pesados y elementos traza metálicos. El resto de la comuna, o sea el 99%, presenta serias limitaciones que obstaculizan la pretensión de mejorar o remediar las características físico-químicas de los suelos de la comuna a pesar de que presentan condiciones de susceptibilidad erosiva y degradación de sus suelos.

Figura 70: Superficie apta y no apta donde disponer biosólidos según exclusión secundaria, Comuna de Melipilla



Fuente: Elaboración Propia

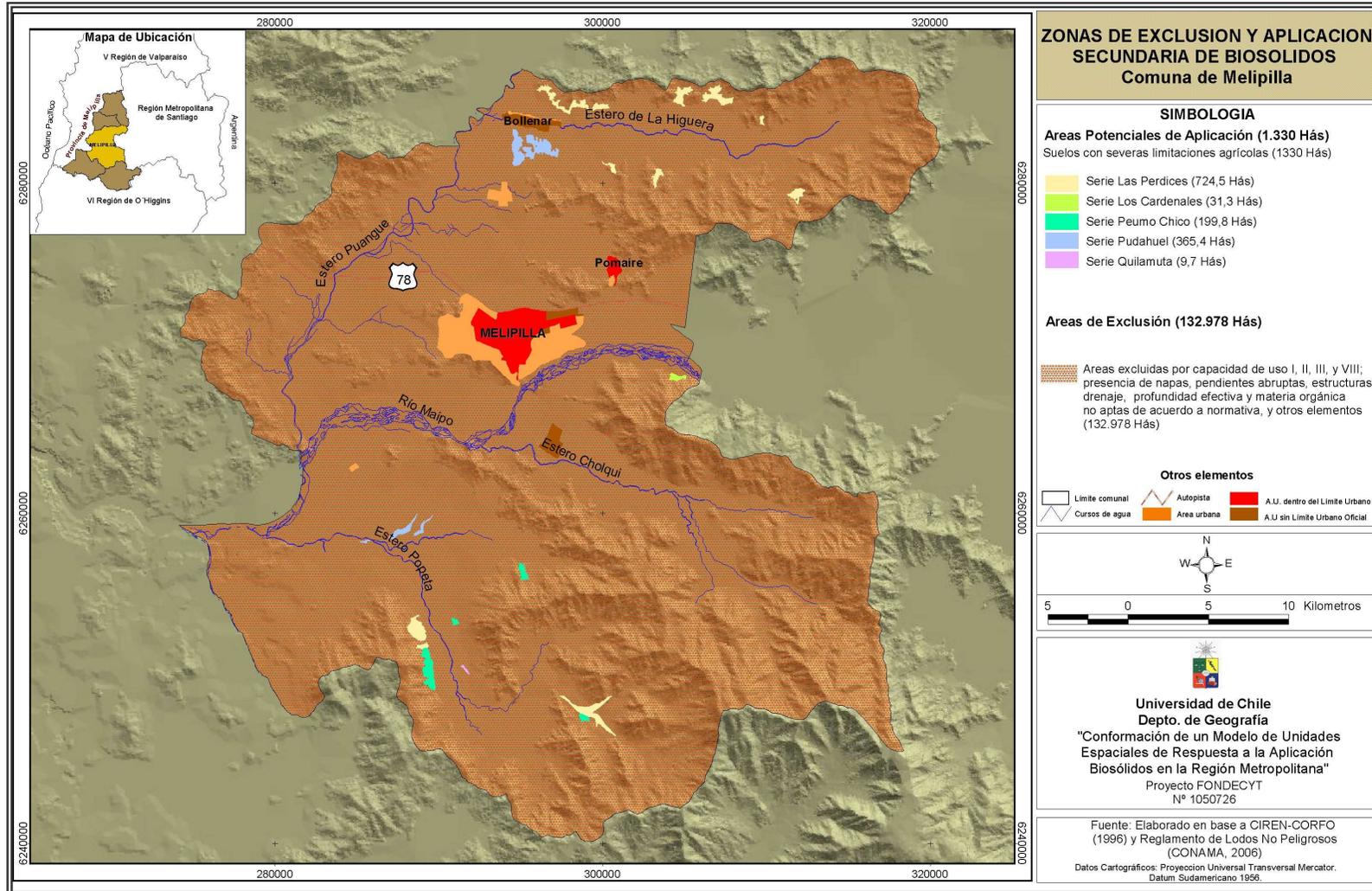
Considerando la superficie apta para aplicar biosólidos (Tabla 48), es importante destacar que sólo se aprecian series de suelo, con severas limitaciones productivas, y que están integradas por cinco series de suelos, que corresponden a las series *Las Perdices*, *Los Cardenales*, *Pudahuel*, *Peumo Chico*, y *Quilamuta*. Estas áreas se distribuyen de manera aleatoria al interior de la comuna de Melipilla, y destaca por sobre las demás las series de suelo, *Las Perdices* por poseer 724 hás, a diferencia de la serie *Quilamuta*, que sólo presenta 9.7 hás, y que se ubica frente al estero Popeta, al SW de la comuna (Fig. 71).

Tabla 48: Suelos potenciales y no aptas de acuerdo a Exclusión Secundaria, Comuna de Melipilla

APTITUD BIOSOLIDOS		APLICACIÓN POTENCIAL SUELOS	SUPERFICIE (HÁS)	SUP (%)
NO APTOS		Zonas excluidas anteriormente	121.997	99,0%
		Área sin información de M.O	10.981,4	
		TOTAL ZONAS NO APTAS	132.978,4	
APTOS	Severas limitaciones agrícolas	Serie Las Perdices	724.5	0,54%
		Serie Los Cardenales	31.3	0,023%
		Serie Pudahuel	365.4	0,272%
		Serie Peumo Chico	199.8	0,149%
		Serie Quilamuta	9.7	0,007%
	Suelos Degradados	Sin serie asociada	0	0%
		TOTAL ZONAS APTAS	1.330,9	1%

Fuente: Elaborado en base a CIREN-CORFO (1996)

Figura 71: Áreas de Exclusión y Aplicación Secundaria de Biosólidos



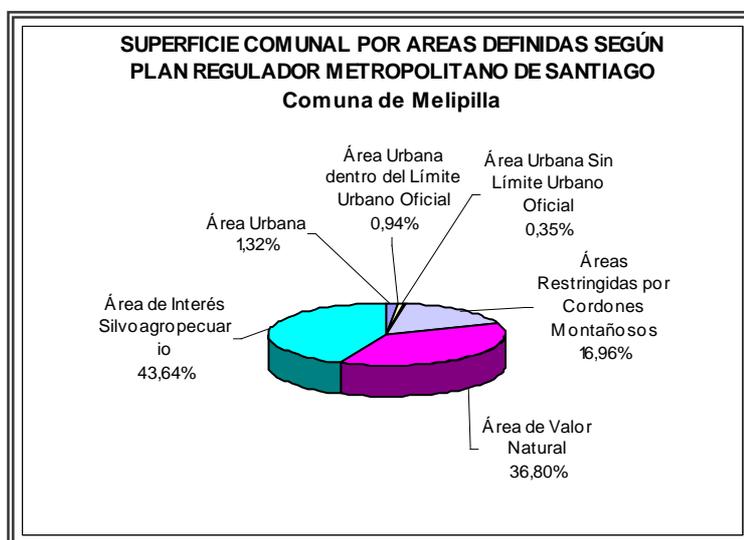
6.2 Compatibilidad de Usos de Suelo

Considerando la compatibilidad existente entre las series de suelo susceptibles a la aplicación de biosólidos, con lo estipulado por el Plan Regulador Comunal de Melipilla (PRMS, 2006), cabe destacar en la Fig. 72, que la comuna de Melipilla esta zonificada en 6 áreas, definidas como *Áreas de Interés Silvoagropecuario*, *Áreas de Valor Natural*, *Áreas Restringidas por Cordones Montañosos*, y 3 *Áreas ligadas al desarrollo Urbano*.

De estas zonas, como se señaló al principio de la Exclusión Primaria, son las áreas urbanas las que quedan excluidas de una posible incorporación de biosólidos ya que pueden afectar de alguna u otra forma a la población existente en zonas cercanas en donde se disponga o se diluya el material orgánico, pero también se debe considerar que áreas de alto valor natural que son ricas en biodiversidad, tampoco es conveniente aplicar biosólidos ya que eventualmente podría ejercer algún tipo de efecto nocivo sobre la flora o fauna del lugar, lo mismo ocurre con áreas que son restringidas al desarrollo urbano por encontrarse en sectores de Cordones Montañosos, pero que previo análisis de los rangos de pendiente y por razones de accesibilidad podría obstaculizar la aplicación de lodos.

Pese a que 75.719 hás quedarían excluidas por efecto del Plan Regulador, quedan aún 58.622 hás equivalentes al 43.6% de la superficie comunal, con la opción de mejorar sus suelos, las que corresponden a *Áreas de Interés Silvoagropecuario*, donde si bien ya se llevan a cabo labores agrícolas, muchas zonas requieren mejorar sus propiedades edafológicas con el fin de hacerlas más ventajosas para una futura actividad silvoagropecuaria.

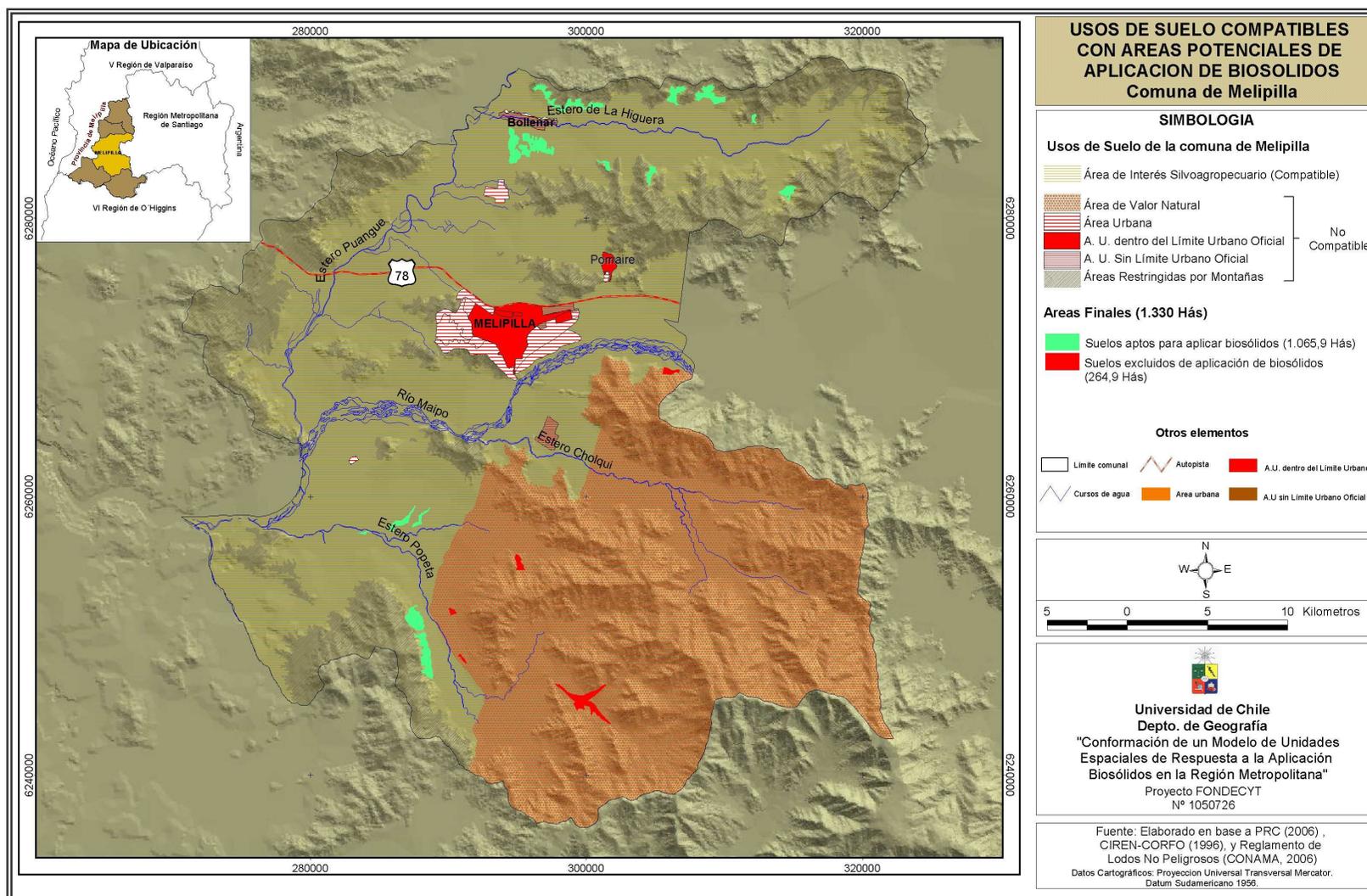
Figura 72: Superficie comunal según áreas del PRMS, Comuna de Melipilla



Fuente: PRMS (2006)

Por tanto, se ha visto modificada la superficie apta para disponer biosólidos (Fig. 73), puesto que al considerar la zonificación del Plan Regulador Metropolitano, las series de suelo resultantes de la Exclusión Secundaria se reducen de cinco a tres, las cuales agrupan en su totalidad 1.065 hás finales de aplicación de biosólidos. Las series correspondientes son en definitiva, la serie *Peumo Chico* (128.6 hás), *Las Perdices* (571.8 hás) y *Pudahuel* (365.4 hás).

Figura 73: Usos de suelo compatibles con áreas aptas para aplicar biosólidos, Comuna de Melipilla

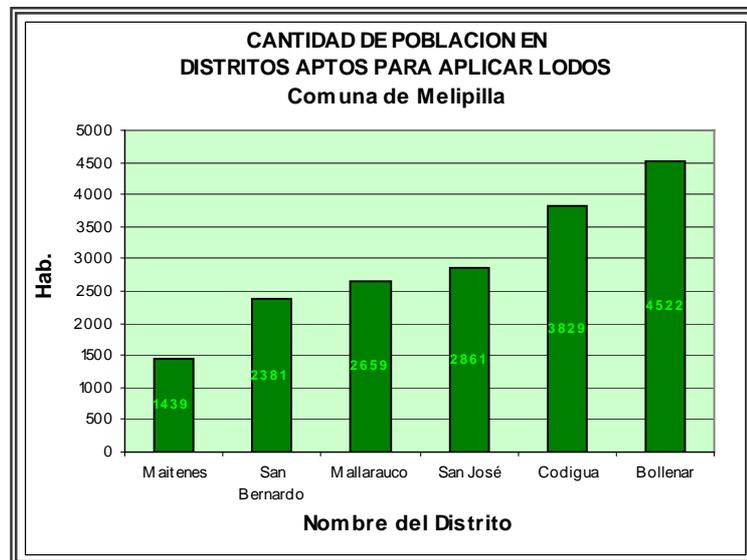


6.3 Compatibilidad con Cantidad de Población por Distritos

Cabe señalar también, la importancia asignada a la vulnerabilidad social de las áreas identificadas como potenciales receptoras de biosólidos. En este sentido, las series de suelo aptas para la aplicación de este material se insertan dentro de seis distritos de la comuna de Melipilla, los cuales corresponden a los distritos de *Maitenes*, *Codigua*, *Bollenar*, *San José*, *Mallarauco*, y *San Bernardo*.

La cantidad de población existente en estos distritos, varía entre los 1.439 hab. en el distrito *Maitenes*, a los 4.522 hab. que posee el distrito *Bollenar*, tal como se señala en la siguiente figura:

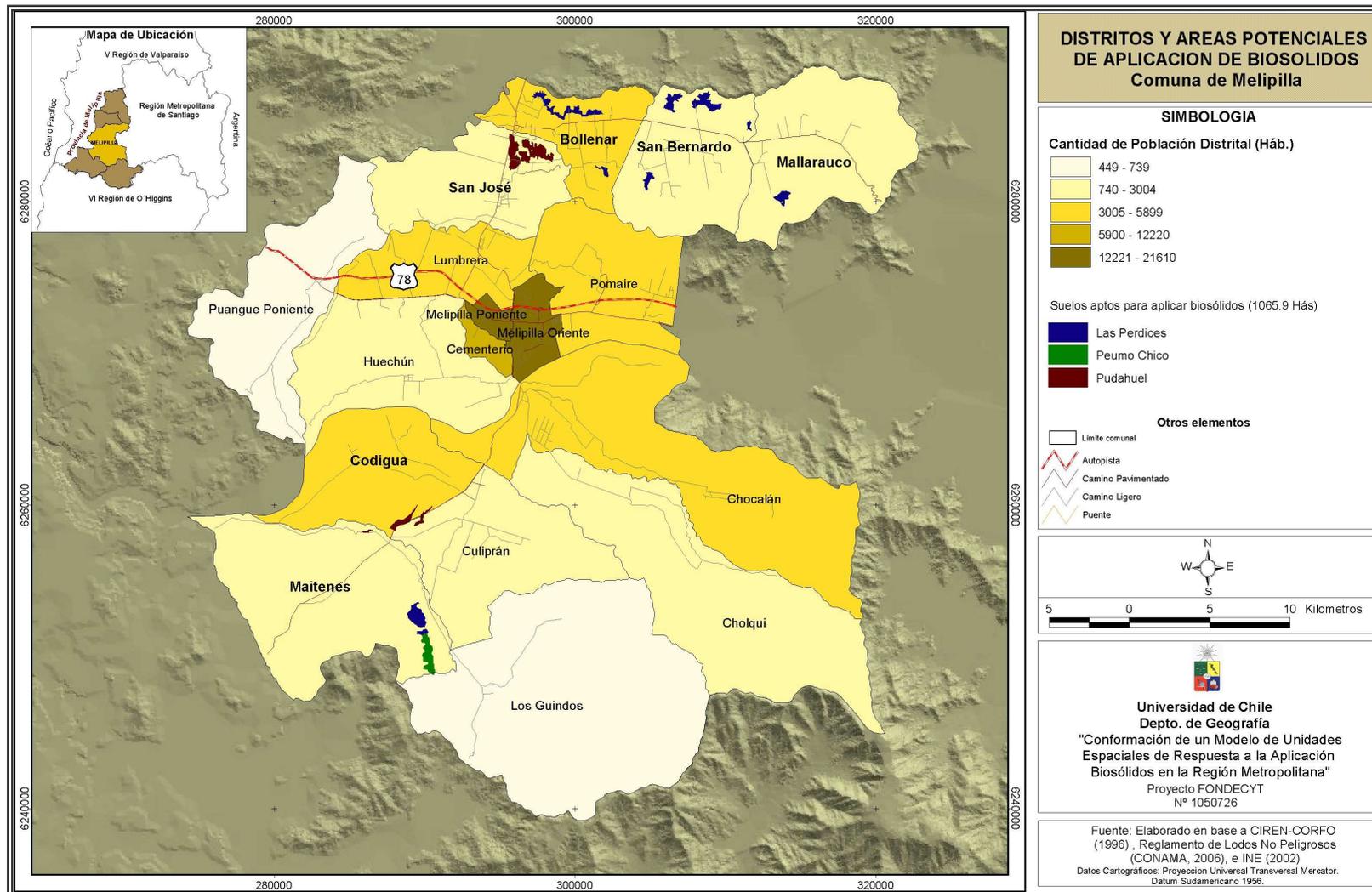
Figura 74: Población de distritos con aptitud para recibir lodos, Comuna de Melipilla



Fuente: INE (2002)

La particularidad de estos distritos, es que poseen una cantidad de población reducida si se quisiera comparar con el resto de los distritos existentes en la comuna de Melipilla, lo cual conforma otra de las potencialidades de acuerdo a los suelos identificados, como se observa en la Fig. 75, en donde se aprecia que las zonas aptas para incorporar lodos se encuentran en gran medida alejadas de las zonas con características urbanas, que corresponden a los distritos de *Melipilla Poniente*, *Melipilla Oriente* y *Cementerio* ubicados al centro de la comuna.

Figura 75: Información distrital y series de suelo aptas para aplicar lodos, Comuna de Melipilla



7. CARACTERIZACION DE FERTILIDAD DE SUELOS Y CONTENIDO DE METALES PESADOS DE AREAS SUSCEPTIBLES DE APLICACIÓN DE BIOSOLIDOS

En vista de que ya se distinguieron las series de suelos en donde es posible aplicar biosólidos, es importante señalar que otro de los requerimientos estipulados por la Normativa de Lodos No Peligrosos (CONAMA, 2006), dice relación con los niveles de fertilidad y concentraciones máximas de metales pesados que deben poseer los suelos previo a la aplicación de lodos.

De acuerdo con C.S.I.C (1995), a la hora de ejecutar una aplicación hay que tener en cuenta que se altera la composición física, química y biológica del suelo y como consecuencia se modifican sus propiedades físicas, químicas, fisicoquímicas y bioquímicas, por lo cual resulta necesario estudiar el nuevo sistema originario, para predecir los impactos.

Es por esto, que a continuación se indican los niveles de fertilidad que poseen los suelos identificados como potenciales receptores de biosólidos de acuerdo a un análisis físico químico y su compatibilidad con la presencia de metales pesados.

7.1 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE SERIES DE SUELO APTAS PARA APLICAR LODOS

7.1.1 Serie de Suelo Las Perdices (LAP)

En la comuna de Melipilla, se ha identificado como serie apta para aplicar lodos, la serie *Las Perdices* (LAP), la cual cumple con los requerimientos expresados en la normativa, sin embargo, no tiene una ubicación específica al interior de la comuna, ya que su distribución es aleatoria, pero reúnen un total de superficie correspondiente a 571.8 hás (Fig. 76)

Figura 76: Muestreo de la Serie Las Perdices



Fuente: Jocelyn Vega (2007)

Dentro de sus particularidades cabe destacar, que según CIREN-CORFO (1996) la Serie Las Perdices, es un miembro de la *Familia franca gruesa, mixta, térmica de los Typic Xerochrepts* (Inceptisol).

Poseen origen coluvial, son suelos ligeramente profundos, en posición de plano inclinado con pendientes dominantes de 5 a 8%, que descansan sobre un substrato aluvial de arenas, gravas y piedras.

El horizonte A es de color negro; textura franco arenosa y estructura de bloques subangulares finos, débiles; en profundidad los materiales son de color pardo grisáceo muy oscuro y pardo grisáceo en el matiz 10YR; en profundidad de color pardo oscuro en el matiz 7.5YR por debajo de los 60 cm; aunque todo el pedón es de textura franco arenosa, el contenido de gravilla aumenta considerablemente en profundidad, hasta constituir el 50% en volumen a los 60 cm. El substrato que se presenta por debajo de esta profundidad tienen una matriz areno francosa.

De acuerdo a los parámetros físico-químicos de la serie, es importante señalar que la variación del pH al interior del pedón es de 6.4 a 6.9, aumentando ésta con la profundidad, según CIREN-CORFO (1996).

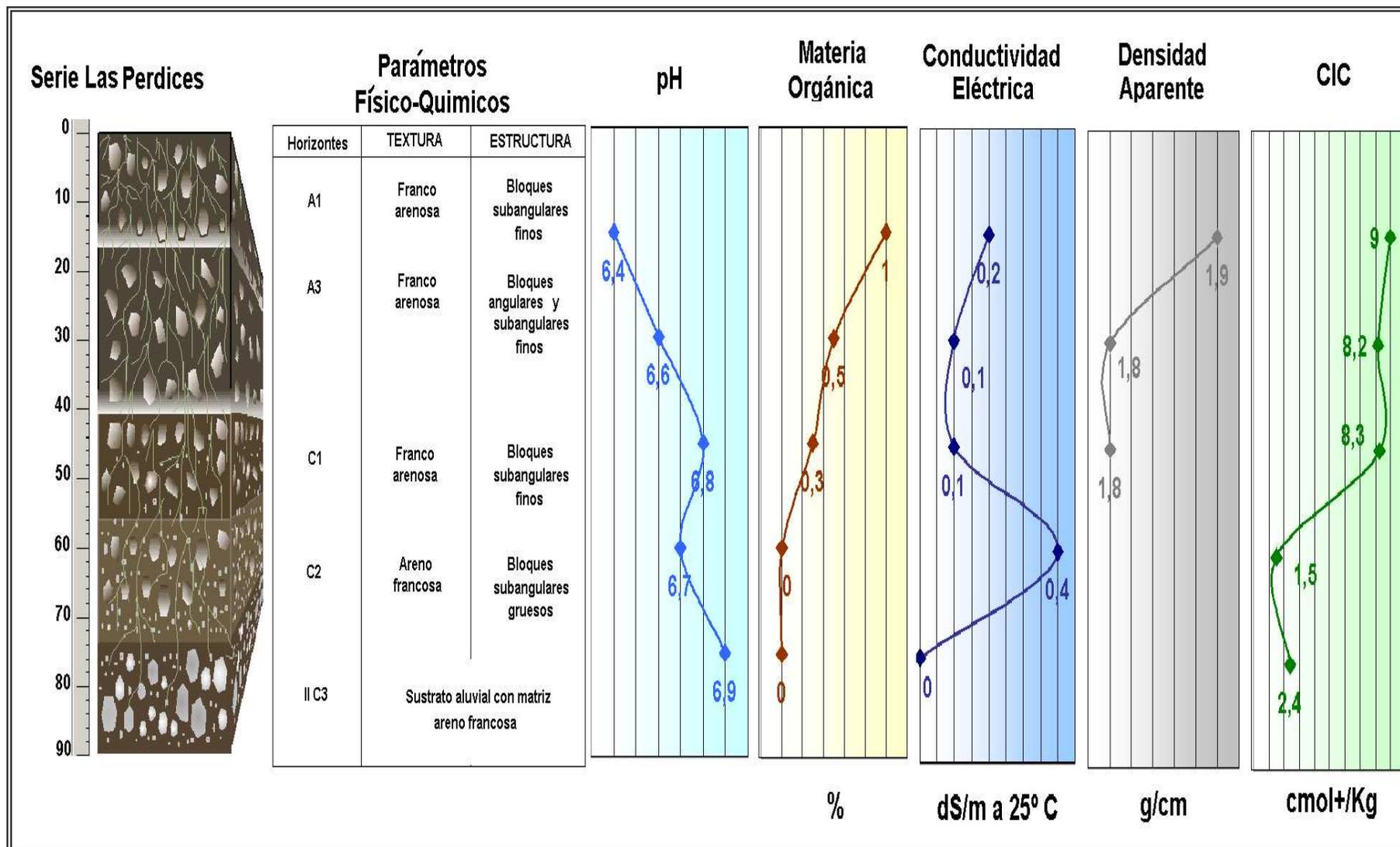
Por el contrario, la materia orgánica experimenta una disminución considerable de su contenido, ya que al cuarto horizonte (C2) no se aprecia su existencia, inclusive es importante señalar que los niveles son aún muy bajos desde la superficie al interior, con 1% de materia orgánica.

La conductividad eléctrica, por su parte, experimenta un pequeño ascenso de sus niveles con la profundidad, ya que se evidencia 0.2 dS/m a 25°C en el horizonte A1, 0.4 dS/m a 25°C, en el horizonte A4, y finalmente 0 dS/m a 25°C en el horizonte IIC3.

La densidad aparente, fluctúa entre 1.9 y 1.8 g/cm, lo cual es incipiente en todo el pedón.

Finalmente, con respecto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), los rangos son relativamente bajos al interior de todo el pedón, encontrándose su nivel máximo en superficie con 9 cmol+/kg.

Figura 77: Pedón de la Serie Las Perdices y sus características físico-químicas

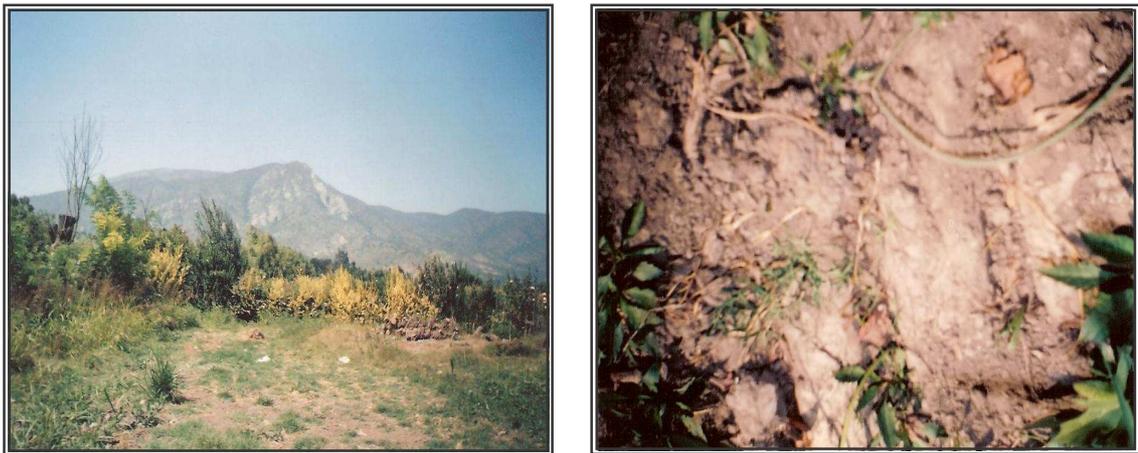


7.1.2 Serie de Suelo Pudahuel (PUD)

La Serie *Pudahuel* es un miembro de la *Familia franca gruesa, mixta de los Vitradic Durixerolls* (Mollisol).

Son suelos que reúnen una superficie de 365.4 hás, los cuales son ligeramente profundos con un horizonte A de color pardo oscuro en matices 10YR ó 7.5YR, textura moderadamente gruesa y estructura de bloques subangulares medios, débiles, en superficie es granular media, débil. El horizonte B es de color pardo oscuro en el matiz 7.5YR, texturas gruesas y estructura de bloques subangulares finos, débiles. El horizonte C varía en color de pardo oscuro en matiz 7.5YR a pardo grisáceo en matices 10YR, texturas gruesas, o estructurado y con fragmentos del horizonte inferior incluidos. El horizonte C2m (duripán) es de color pardo pálido en matiz 10YR, textura gruesa o moderadamente gruesa, no estructurado, extraordinariamente duro y muy firme, con poros escasos y sin raíces. En profundidad, los materiales arenosos del horizonte C3, se encuentran sueltos, son de color pardo amarillento pálido en matiz 10YR, escasamente porosos (Fig. 78).

Figura 78: Muestreo Serie Pudahuel



Fuente: Jocelyn Vega (2007)

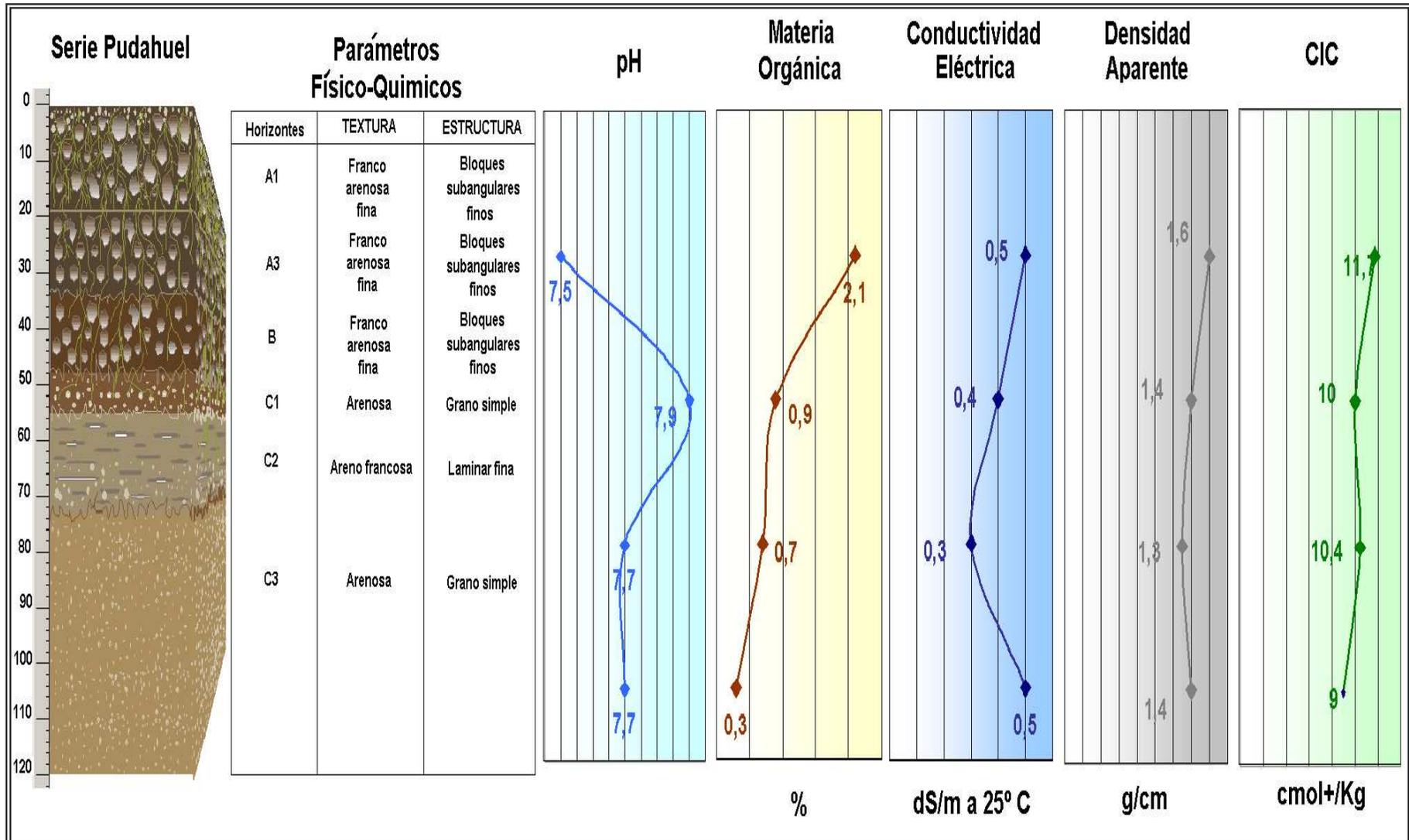
La Serie *Pudahuel* se encuentra adosada a los piedmont graníticos que bajan de la Cordillera la Costa, ocupando una topografía de lomajes suaves, de cumbres casi planas y caídas fuertes hacia quebradas y esteros. La pendiente dominante es de 1 a 3% en las planicies altas y de 5 a 20% en las caídas.

El suelo se ha formado a partir de cenizas volcánicas, redepositadas por agua, de tipo pumicítico.

De acuerdo al pH, es necesario destacar que sólo en el segundo horizonte se ve incrementado su valor, el resto se mantiene relativamente estable. Este mismo fenómeno ocurre con las variables de densidad aparente, conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico.

La materia orgánica, por su parte, presenta variaciones relevantes, puesto que en superficie, el contenido es de 2.1%, disminuyendo considerablemente en profundidad hasta llegar a 0.3% en el horizonte C3.

Figura 79: Pedón de la Serie Pudahuel y sus características físico-químicas



7.1.3 Serie de Suelo Peumo Chico (PCH)

La serie de suelo *Peumo Chico*, identificada como receptora potencial de biosólidos, se encuentra al SW de la comuna de Melipilla, específicamente inserta en el área de San Miguel de Popeta, aledaña al estero del mismo nombre, con una superficie de 128.6 hás.

De acuerdo con CIREN-CORFO (1996), sus suelos son miembro de la *Familia franca gruesa, mixta, térmica de los Ultic Haploxerolls* (Mollisol).

Corresponden a suelos de origen aluvial, estratificados, profundos, que se presentan ocupando la posición de abanicos coluviales en los sectores de la Cordillera de la Costa, ubicados en una superficie casi plana con pendientes entre 1 a 3% de inclinación, donde se presentan asociados con los suelos de la Serie Lo Vásquez (Fig. 80).

Figura 80: Muestreo de la serie Peumo Chico, Comuna de Melipilla



Fuente: Jocelyn Vega (2007)

Todo el perfil de la serie es de color pardo oscuro en el matiz 10YR, transformándose en pardo amarillento oscuro en la parte inferior donde existe un elevado contenido de gravilla de cuarzo que pueden alcanzar hasta un 50%; éste aumenta paulatinamente desde la superficie hasta los 60 cm. El contenido de arcilla se mantiene estable en todo el perfil, la textura es franca y la estructura es deficiente, salvo en la superficie que presenta bloques subangulares finos y medios, débiles. No hay limitaciones de arraigamiento en los primeros 100 cm, pero en general, éste es débil.

Con respecto a las propiedades del suelo, es importante destacar por ejemplo, que el pH de la serie, presenta variaciones, ya que se advierte un aumento, desde la superficie hacia la profundidad del pedón, variando de 5.9 a 6.8 en el horizonte C2, lo que indica que el suelo tiende a básico, en la medida que la potencia aumenta, lo cual se aprecia a los 100 cm de profundidad.

El pH en superficie, se mantiene dentro del rango de *moderadamente ácido* (5.6 a 6.0), lo cual es un antecedente significativo que reduce el riesgo de contaminación por metales pesados, ya

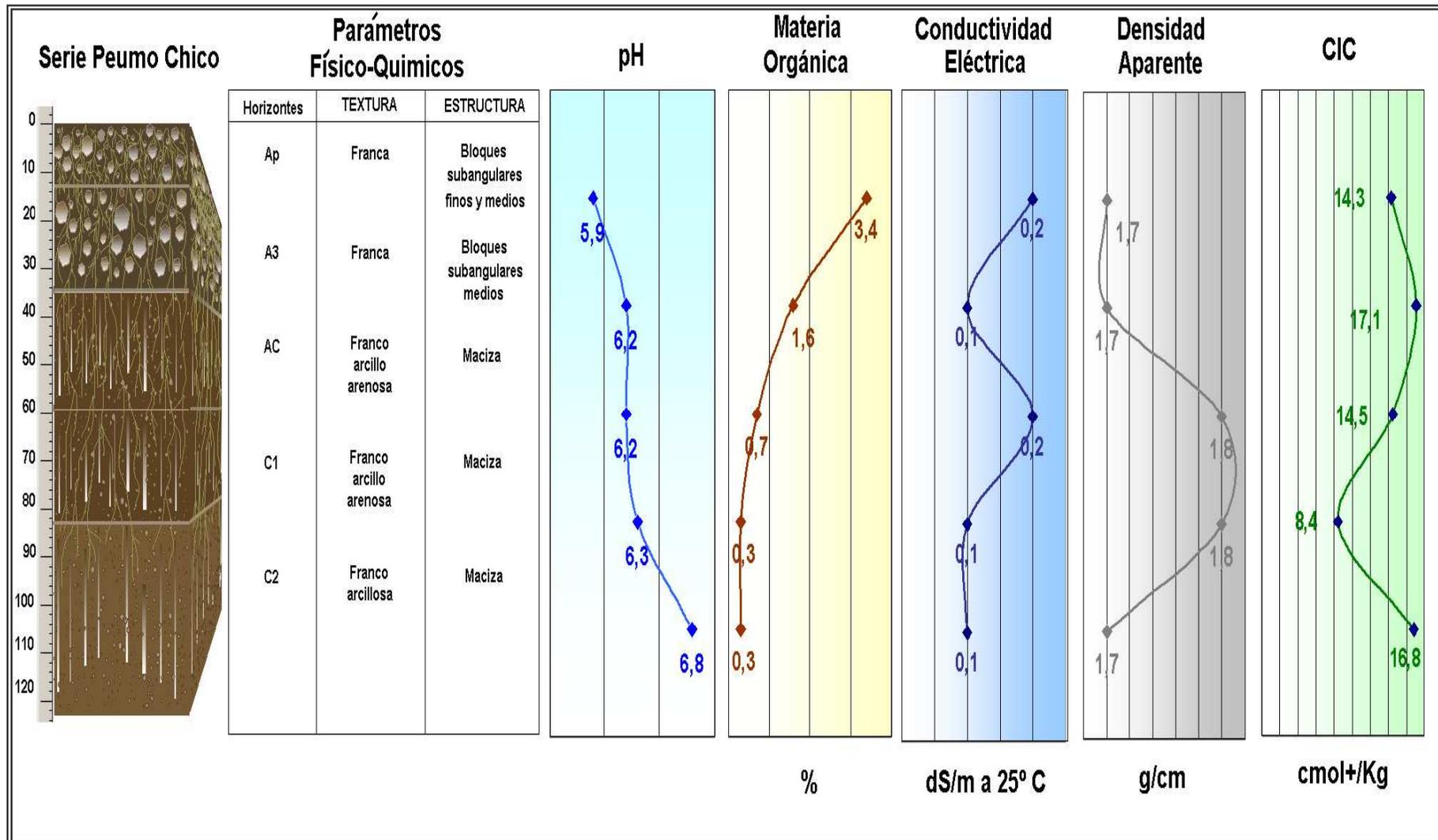
que los suelos con valores elevados de pH fijan la mayoría de estos, con excepción del Mn y Se (reduciendo la absorción por las plantas).

Una dinámica opuesta se observa con respecto al parámetro de la materia orgánica, donde se evidencia que los rangos van disminuyendo desde la superficie hacia el interior del perfil, ya que en el horizonte Ap, hay un porcentaje de 3.4%, correspondiente a un contenido *algo deficiente*, el cual va disminuyendo sistemáticamente hasta llegar al último horizonte reconocido (C2), con un contenido de *muy deficiente*, de 0.3%. En función de esta variable, no hay limitaciones para aplicar biosólidos.

La conductividad eléctrica al interior del pedón no presenta mayores variaciones, ya que los rangos oscilan entre 0.2 a 0.1 dS/m a 25°C. Lo mismo sucede en el caso de la densidad aparente donde los rangos fluctúan entre 1.7 y 1.8 g/cm.

Finalmente, con respecto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), los rangos son relativamente altos en los tres primeros horizontes (Ap, A3, y Ac), con 14.3, 17.1, y 14.5 cmol+/Kg respectivamente, sin embargo en el horizonte C1, los valores disminuyen a 8.4 cmol+/Kg, apreciándose en el último horizonte un incremento significativo, con valores de 16.8 cmol+/Kg.

Figura 81: Pedón de la Serie Peumo Chico y sus características físico-químicas



7.2 Análisis de Fertilidad de Muestras de Suelo

En conformidad con cada serie de suelo que cumple con los requerimientos básicos para incorporar biosólidos, es importante indicar de acuerdo a lo planteado por INIA (2005), que los lodos en estas condiciones geográficas aportarán, fundamentalmente, nutrientes para las plantas y la biota del suelo, tanto macro como micronutrientes, y en materia orgánica, lo que estimulará el desarrollo de la estructura del suelo y, por tanto, afectará positivamente su capacidad productiva.

Por ende, la utilización agrícola es una de las alternativas cada vez más cercana para disponer biosólidos en sus suelos, ya que los lodos pueden ser aprovechados para una gran variedad de cultivos, siempre y cuando, el control sea lo suficientemente riguroso como para prevenir efectos indeseables sobre la cadena trófica, por ende, la tasa de aplicación en el uso de tipo agrícola, está limitada por la incorporación, anual o acumulada, de metales pesados al suelo.

Las series anteriormente mencionadas, responden satisfactoriamente a los cánones establecidos por el Reglamento de Lodos No Peligrosos (CONAMA, 2006), de acuerdo a las características de los suelos, no obstante, se debe llevar a cabo otro filtro, con el fin de zanjear la problemática, y que está directamente asociado a los parámetros de fertilidad del suelo (Tabla 49), y contenido de metales pesados, con una información más reciente obtenida de muestras de suelo analizadas en laboratorio, tal como se plantea a continuación:

Tabla 49: Análisis de Fertilidad de muestras de suelo, Comuna de Melipilla

SERIE DE SUELO	CIC cmol+/Kg	pH 1:2,5	C.E Ms/cm	M.O %	Nitrógeno disponible mg/Kg	Fósforo Disponible mg/Kg	Potasio Disponible mg/Kg
LAP	16.5	6.3	1.5	3.5	57	23	151
PCH	13.0	5.7	1.6	3.1	58	33	150
PUD	24.7	7.5	5.4	3.1	179	89	444

Fuente: Proyecto FONDECYT N° 1050726 (2006)

7.3 Contenido de Metales Pesados

La importancia de esta variable radica en que tanto los lodos que se quieren aplicar provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas, como la zona geográfica de destino, pueden presentar una alta carga patogénica y presencia de elementos traza metálicos que pueden afectar a la cadena trófica a través de los cultivos y contaminar las aguas freáticas (LEGRET *et al.*, 1988; GENNARO *et al.*, 1991; BARBARICK *et al.*, 2004). Los *elementos trazas metálicos* provienen fundamentalmente de las siguientes tres fuentes:

- Residuos industriales líquidos (As Cd, Hg, Mo)
- Lavado de calles (Pb, Zn)
- Erosión de ductos de conducción de agua potable (Cu)

Si bien, no debe desconocerse que cada uno de los metales pesados posee un potencial tóxico inherente, como cualquier otro elemento del sistema periódico, se trata de elementos litogénicos y que, por tanto, existen naturalmente en la corteza terrestre estando todos los seres vivos en contacto permanente con ellos, por una vía u otra; así, que no se trata de determinar si existen

o no estos elementos en el lodo sino que en qué proporción sus concentraciones están por encima de los valores basales de los suelos.

Adicionalmente, no puede olvidarse que varios elementos trazas son, también micronutrientes vegetales (caso del cobre, hierro, manganeso, molibdeno y zinc) y que, debido a la intensificación de la agricultura, algunos están siendo incorporados rutinariamente a los programas de fertilización (INIA, 2005).

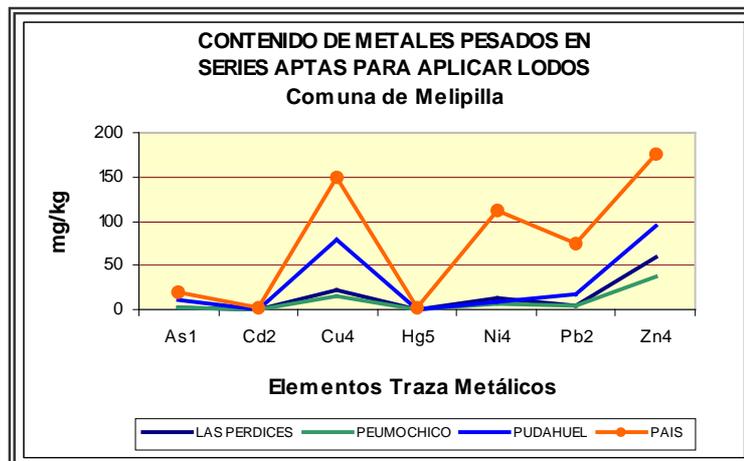
A continuación, se señalan de manera específica los rangos y valores obtenidos para cada una de las muestras de suelo, y sus respectivas concentraciones de metales pesados, que es otro de los antecedentes a considerar para incorporar biosólidos ya que los contenidos totales no deben sobrepasar ciertos rangos establecidos por el Reglamento de Lodos No Peligrosos (CONAMA, 2006).

Como se observa en la Fig. 82, el contenido de elementos traza metálicos en las tres series de suelos resultantes de la exclusión llevada a cabo para incorporar biosólidos, se ajustan a lo expresado por la normativa, ya que ninguna de ellas sobrepasa los límites establecidos, siendo una ventaja real frente a las concentraciones en altas dosis de estos elementos que pueden ser altamente tóxicos, afectando a la salud de la población que se encuentre expuesta.

Dentro de las reacciones adversas en el largo plazo, se encuentran diversas afecciones sobre el aparato gastrointestinal y respiratorio, que también se pueden ver incrementados por el consumo de alimentos o cultivos contaminados, generándose a su vez, repercusiones en el medio ambiente. En consecuencia, tal como lo señala INIA (2005), la aplicación de biosólidos exige confirmar la ausencia de organismos patógenos, de niveles peligrosos de ciertas sustancias orgánicas y metales pesados, por lo cual resulta obligatorio controlar tanto las cantidades incorporadas así como el efecto acumulativo de estas sustancias y elementos.

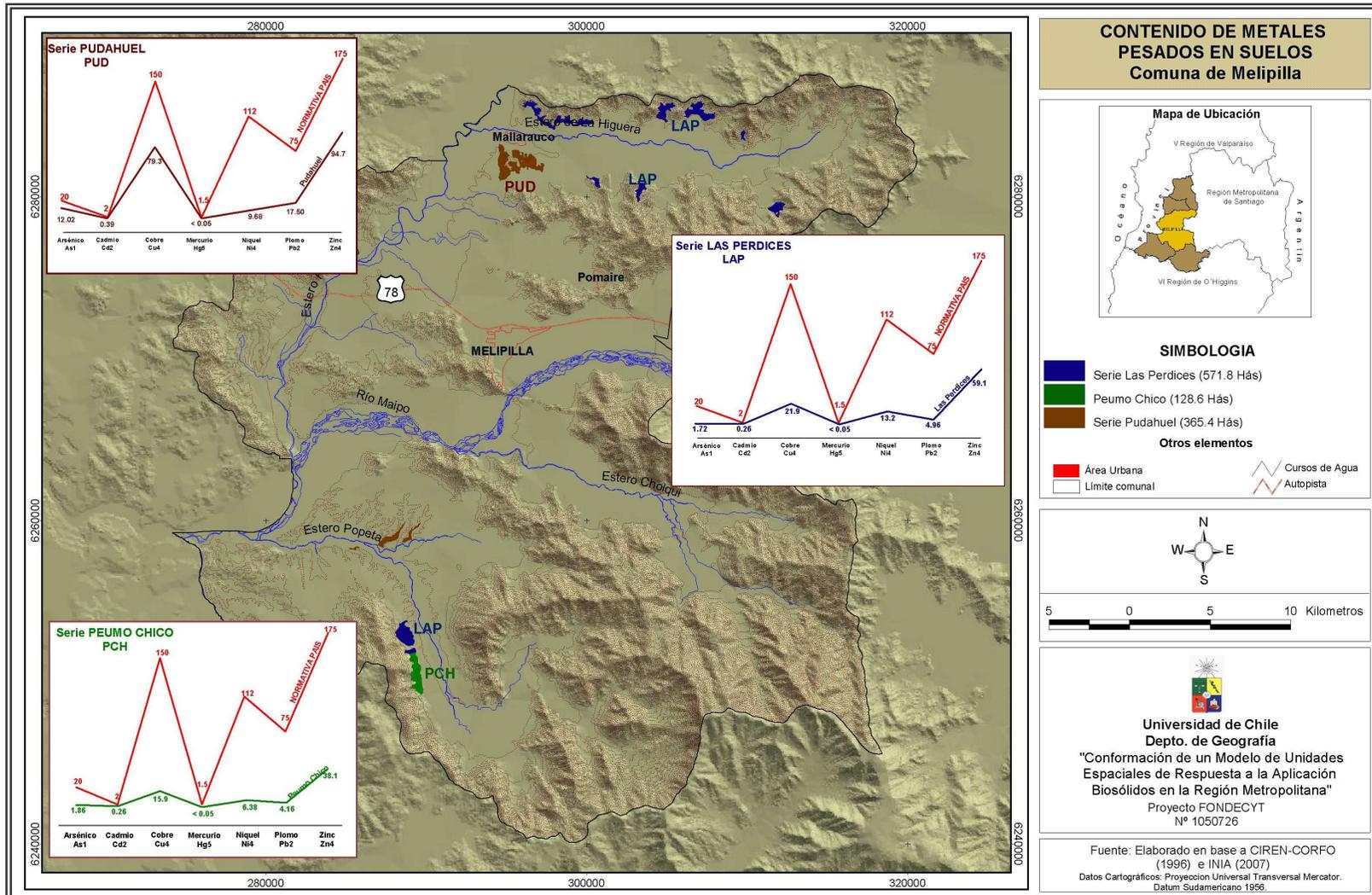
Las concentraciones menores (Fig. 83), están asociadas a las series de suelo *Peumo Chico*, y *Pudahuel*, a diferencia de la serie *Las Perdices* que si bien, presenta los mayores niveles, no por eso deberían provocar problemas de toxicidad y contaminación.

Figura 82: Contenido de elementos traza en suelos aptos



Fuente: Elaboración Propia a partir de laboratorio (INIA, 2007), y CONAMA (2006)

Figura 83: Contenido de Metales Pesados por series aptas , Comuna de Melipilla



CAPITULO V: DISCUSION

El procedimiento llevado a cabo, para analizar e identificar las áreas susceptibles para la disposición de biosólidos en la comuna de Melipilla, no sólo está regido por lo estipulado en el Reglamento de Lodos No Peligrosos (CONANA, 2006), sino que ha sido encauzado bajo un orden lógico, mediante el cual se parte por la búsqueda de las condiciones que justifiquen la incorporación de biosólidos en los suelos del área de estudio.

De ahí, que la investigación se inicia por una caracterización detallada de cada componente del medio natural que posee influencias directas e indirectas en el desencadenamiento de procesos erosivos. Cada variable, considerada, si bien fue clasificada según intensidades de susceptibilidad *bajas*, *medias* o *altas*, las cartografías elaboradas contemplan solo los niveles extremos, ya que la idea fue hacer énfasis en las condiciones de riesgo de erodabilidad y erosionabilidad respectivamente, con el fin de localizarlas y de señalar la cobertura espacial que poseen.

Gran parte de la superficie comunal, esta siendo afectada por altos niveles de erosión, lo que constituye un motivo relevante para considerar a la comuna de Melipilla, como una zona potencial para la aplicación de biosólidos. Si bien, estos antecedentes permiten demostrar que están presentes estas condiciones de manera natural, debería en la normativa señalarse que las prácticas de control de escorrentía y la erosión también constituyen una prohibición de aplicación de lodos, ya que puede verse perjudicada la seguridad de la disposición de los biosólidos, por efecto de las pérdidas de suelo y por las condiciones morfodinámicas del paisaje. Sólo se hace una referencia general, con respecto a que en ciertos sectores se deben establecer medidas técnicas especiales, en suelos degradados y en sitios en que la caída pluviométrica anual lo requiera, con el fin de controlar y evitar la erosión hídrica del suelo, como son, canales de intercepción de aguas lluvias, canales perimetrales, manejo de quebradas, y manejo de coberturas vegetales, sin indagar ni mencionar las categorías en que se hace insostenible la aplicación de lodos de acuerdo a la susceptibilidad erosiva.

Ahora, en la presente investigación se han considerado sólo las condicionantes físico-naturales que inciden en la erosión del suelo, y no se han estimado los diversos tipos de prácticas agrícolas ni los tipos de cultivos predominantes que podrían incidir en la aparición de la erosión. No obstante, sí se considera como factor relevante el *uso de suelo* actual y futuro de la comuna, donde se indican cuáles son las superficies que han sido destinadas para la actividad agrícola, y cuáles no son proclives a ser consideradas ni para la urbanización, ni tampoco para la incorporación de lodos.

Si bien, las áreas identificadas como potenciales receptoras de biosólidos, son reducidas y están asociadas principalmente a suelos con limitaciones productivas, o de capacidad de uso IV, estos subproductos deberían aplicarse donde existan los requisitos óptimos, y respetando las tasas de aplicación pertinentes, con el fin de ser útiles para la agricultura o para la revegetarización, ya que estas superficies también presentan condiciones *moderadas* de erosión que podrían ser restituidas con cobertura vegetal, de manera de contribuir con el mejoramiento de la belleza escénica del lugar, y a la vez impedir el agravamiento de la erosión.

Para INIA (2005), es fundamental que el uso de los lodos como fertilizantes, en reemplazo parcial o total de los tradicionales, debe hacerse dentro del contexto de uso sostenible, el que es entendido como un balance entre lo positivo y negativo, esto es, por un lado el aporte de nutrientes, materia orgánica y agua y, por el otro, el aporte de elementos traza metálicos, microorganismos patógenos, electrolitos solubles y COPs.

En el documento técnico normativo, existe controversia con respecto a los contenidos de *metales pesados* en los suelos, ya que se establecen diferenciaciones de acuerdo a la carga metálica de lodos según la división en dos macrozonas. La primera, denominada *macrozona norte*, incluye a las regiones I, II, III, IV, V, VI y RM; la segunda, contiene a la VII Región del Maule, VIII, IX, X, XI, y XII, y corresponde a la *macrozona sur*.

Si bien, esta diferenciación es atingente a nivel nacional, es necesario adecuar y analizar a un nivel de mayor detalle espacial, los requisitos y condiciones técnicas con respecto al contenido de metales pesados, ya que a determinadas circunstancias locales la situación puede cambiar, por efecto de la dinámica natural del paisaje, sus condiciones morfodinámicas, y también por efecto de las alteraciones antrópicas que puedan surgir en éste. El área de estudio que sea seleccionada para la aplicación de biosólidos, puede sostener sustentablemente niveles de elementos traza metálicos diferentes según sean las condiciones geográficas de algún sector tales como, un valle, una cuenca hidrográfica, etc. donde se definen niveles puntuales de metales en suelos.

De acuerdo a lo anterior, el contenido máximo de elementos traza metálicos aceptados como máximos en los suelos, posee valores que varían significativamente entre los países. Véase el caso del cobre, por ejemplo, cuyo contenido máximo en suelos es 36 mg kg⁻¹ ss, en Holanda, y 210 mg kg⁻¹ ss, en España. O el níquel, cuyo contenido máximo aceptable en Dinamarca, es de 15 mg kg⁻¹ ss, y en España, 112 mg kg⁻¹ ss. Estas aparentes diferencias de criterio, están reflejando la realidad geoquímica de cada país y que un mismo significado biológico (por ejemplo nivel de fototoxicidad) está asociado a valores distintos en lugares diferentes.

La problemática tratada, ha considerado sólo los elementos y condiciones asociadas a los sitios de aplicación potencial de biosólidos, dejando al margen aspectos técnicos tales como, los tipos específicos de tratamiento que requieren los lodos antes de ser derivados a las zonas aptas para su recepción, o las operaciones del proyecto de ingeniería asociado al almacenamiento y transporte del material, así como los procedimientos de medición y control. En consecuencia, esta investigación conforma una de las etapas más relevantes puesto que estructura la base donde se ha construido un análisis completo e interpretación de las diversas características pedogenéticas, propiedades físicas y biológicas del suelo, y los usos de suelo presentes en la comuna de Melipilla, con el fin de identificar las zonas que poseen las potencialidades geográficas de ser receptoras de biosólidos, lo cual ha sido reflejado en las diversas coberturas digitales trabajadas que han sintetizado cada una de las temáticas y variables estudiadas.

En Melipilla, ya se han llevado a cabo prácticas de aplicación de biosólidos, a modo de experimentación. HENRIQUEZ (2005), afirma que se definieron zonas agroecológicas potenciales, y se avaló la posible implementación de ensayos de campo. Los lugares que cumplieron con las condiciones definidas en el 2005, por el *Anteproyecto de Lodos No Peligrosos* (CONAMA, 2000), fueron Culiprán, y San Miguel de Popeta, y se monitorearon en una primera instancia, la evolución de las propiedades físicas del suelo con la aplicación de los lodos, pero también se incorporó la idea de evaluar los aspectos productivos de los cultivos, trabajando en cuatro predios a saber: 2 predios con maíz, 1 con papas y 1 con trigo.

Los resultados arrojaron que ciertas propiedades del suelo tales como la capacidad de campo, humedad aprovechable, materia orgánica, y los contenidos de fósforo, potasio y nitrógeno se incrementaron significativamente con la adición de biosólidos. Así mismo, los cultivos no presentaron síntomas de toxicidad, plagas o enfermedades atribuidas a la aplicación de éstos.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES

La comuna de Melipilla presenta condiciones ambientales complejas y dinámicas que favorecen el desencadenamiento de procesos erosivos. De acuerdo a aspectos morfológicos, vinculados por una parte, a la configuración de los materiales litológicos junto con los grados de inclinación que poseen las pendientes, y la geodinámica de las vertientes, indican que en el área de estudio gran parte de la superficie comunal presenta estribaciones derivadas del Batolito Costero que tienden a descomponerse por efecto de las rocas graníticas que lo constituyen.

Un factor natural altamente agresivo, que gatilla en la desagregación del sustrato intrusivo y que estimula los procesos de erosión, corresponden a las características climáticas del sector, donde en época invernal se concentran altas precipitaciones cuyos efectos se intensifican en las laderas de exposición barlovento, que son las que predominan. La lluvia, al entrar en contacto con el terreno, tiende a escurrir superficialmente, y salvo en sectores que presentan una cobertura vegetal densa, sigue su curso arrastrando los materiales que están a su paso.

De ahí, que en función de la configuración físico-natural de la comuna, se hayan generado unidades edafológicas susceptibles a sufrir erosión y deterioro de sus propiedades físico-químicas, con suelos de origen granítico, de desarrollo relativamente incipiente ubicados por lo general, en sectores de pendientes moderadas a fuertes, de manera tal que se ha conformado un estado de fragilidad ambiental con suelos que presentan condiciones de degradación importantes, y que no pueden ser utilizados de manera sustentable para las actividades agropecuarias tales como los de capacidad de uso VI, y VII, en desmedro de suelos con capacidades productivas I, II, y III que poseen escasa representación a nivel comunal.

La aplicación de biosólidos, está destinada a suelos que presentan efectivamente este tipo de condiciones, tales como limitaciones productivas, y también para recursos degradados, por lo cual la comuna cumple con los requerimientos expresados por la normativa nacional o *Reglamento de Lodos No Peligrosos* (CONAMA, 2006).

Sin embargo, al llevar a cabo la exclusión de áreas por cada componente analizada, los suelos degradados que inicialmente fueron considerados como los con mayor susceptibilidad de ser receptores de estos tipos de residuos semisólidos, por su extensión espacial, no cumplen con las estipulaciones técnicas señaladas por ley, siendo descartados por una u otra limitación física, quedando finalmente unidades con capacidad de uso IV, y con categorías moderadas de erosión, que sí pueden ser beneficiados con lodos siempre y cuando se lleven a cabo los análisis y prescripciones sanitarias pertinentes. Debe considerarse que si bien, estas áreas, poseen suelos sin restricciones en términos de contenidos de metales pesados, los lodos a utilizar si pueden tener una carga de elementos traza que sobrepasen los límites establecidos por ley.

Estas áreas identificadas, se localizan preferentemente en sectores cuyas pendientes no superan el 5º de inclinación, en sectores de terrazas aluviales y de cineritas, que en su conjunto reúnen una superficie de 1.330 hás, lo cual es equivalente a solo el 1% de la superficie total de la comuna, que es de 134.500 hás.

Con respecto a las concentraciones de metales pesados o elementos traza metálicos al interior del área de estudio, se avala lo señalado por la hipótesis, en el sentido de que efectivamente en función de las muestras de suelos tomadas en terreno y posteriormente analizadas en laboratorio, los suelos aptos para la disposición de biosólidos no poseen, en la actualidad, el

riesgo de ser contaminados por la existencia de residuos industriales que pudieran perjudicarlos nocivamente para sus funciones agrícolas.

Las tres series de suelo identificadas como potenciales, poseen niveles reducidos de estos metales, por lo cual se ajustan a lo permitido por la normativa. A diferencia por ejemplo, de los suelos del valle del Cachapoal, que se han definido como no aptos para la aplicación de lodos, debido a los altos tenores de cobre que existen en ellos (GONZALES, 1994).

La cantidad de habitantes de acuerdo a los límites distritales, en donde se han identificado las zonas aptas para aplicar lodos, poseen la particularidad de tener reducidos niveles de población, lo cual demuestra la compatibilidad existente con el uso benéfico de lodos, ya que estos se encuentran alejados de los distritos centrales que si poseen una mayor concentración urbana, y en donde hay mayores limitaciones por efecto de la contaminación ambiental que puede generarse, y los riesgos a la salud y seguridad de la población.

Finalmente, con respecto a la accesibilidad y la factibilidad de transporte del lodo a las áreas potenciales, si bien no fue un factor analizado, esta variable debería considerarse por los costos asociados, y porque la normativa señala que el potrero o área identificada deberá contar con una infraestructura mínima de accesos correspondientes.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILERA, S; RODRÍGUEZ, M. 2005. **“Desarrollo de Prácticas Sustentables de reciclaje de Biosólidos en Plantaciones Forestales. Proyecto FONDEF DO 111034”**. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Facultad de Ciencias Forestales.
- AGRONOMIA Y FORESTAL, 2002. **“Suelos Degradados y Agricultura Sustentable”**. En Revista N° 12. PUC. Santiago, Chile.
- AGUILÓ, P. 2000. **“Guía para el Estudio del medio físico”**. Ministerio del Medio Ambiente. Madrid. España.
- AGUAS ANDINAS. 2004. Comunicación Personal.
- AGUAS ANDINAS, 2006. Comunicación personal.
- ALLOWAY, P. 2000. **“Contaminación y Recuperación de Suelos. El medio Ambiente, Introducción a la Química Medioambiental y la Contaminación”**. Ed. R.M. Harrison. Cap 5. Pág. 207-247. España.
- ARAYA, L. 1999. **“Estabilización de lodos de tratamiento de aguas residuales”**. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- ARAYA-VERGARA, J. y BÖRGEL, R. 1972. **“Definición de Parámetros para establecer un Banco Nacional de Riesgos y Amenazas Naturales. Criterios para su Diseño”**. ONEMI/PNUD. U. De Chile /92/009/A. Pp.219. Santiago, Chile.
- ARAYA-VERGARA, J. 1985. **“Carta Geomorfológica de la Cuenca de Santiago”**. Revista Informaciones Geográficas N° 32, Depto de Geografía, Universidad de Chile. Santiago. Pp 31-44.
- BARBARICK, K. A; DOXTADER, K. G; REDENTE, E. F y BROBST, R. B. 2004. **“Biosólids effects on microbial activity in showbland and glassland soils”**. Soils Science. Vol. N° 169 (3). Pp 176-187.
- BAUTISTA, C., ETCHEVERS B., *et al.* 2004. **“Revista Electrónica Ecosistemas”**. Año XIII N° 2. Oaxaca. México.
- BLIKRA y NEMEC. 1998. **“Post glacial colluvium in Western Norway: depositional proceses, facies and paleoclimatic record”**. Sedimentology, N° 45. Pp 909-959.
- BORDE, J. 1966. **“Les andes de Santiago et leur avant pays. etude de géomorfology”**. Bordeaux. Francia.
- BRIGNARDELLO, L.; GEORGUDIS, B. 1997. **“Geopedología de la cuenca de Santiago: dimensión espacial de los problemas ambientales de los suelos”**. Revista de Geografía Norte Grande, Instituto de Geografía, P.U.C. N° 24. Santiago , Chile. Pp127-141.
- BUCKMAN, H. Y BRADY, N. 1993. **“Naturaleza y Propiedades de los Suelos”**. 5ª Edición. México. U.T.E.H.A. Pp. 590.
- BUOL. S.W. 1991. **“Génesis y Clasificación de suelos”**. Ed. Trillas.
- CASANOVA *et al.* 2004. **“Manual de Edafología”**. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Ingeniería y Suelos.
- CASTRO, C. P. 2005. **“Impacto de la dispersión urbana de la ciudad de Santiago en la Calidad del suelo en la periferia norte: Colina y Lampa”**. En Los Agentes Urbanos y las Políticas sobre la Ciudad. VII Coloquio Internacional de Geocrítica. PUC. Santiago, Chile.

- CASTRO, C. P. 2007. Proyecto FONDECYT N° 1050726 **“Conformación de un Modelo de Unidades Espaciales de Respuesta a la Aplicación de Biosólidos en la Región Metropolitana”**. Documento Inédito. Santiago. Chile.
- CASTRO, C. y VICUÑA P. 1990. **“Caracterización de la erosión lineal en planicies costeras de Chile Central”**. En Revista de Geografía Norte Grande N° 17. Pp. 37-45. Santiago. Chile.
- CENTRO DE CIENCIAS QUÍMICAS MEDIO AMBIENTALES (C.S.I.C). 1995. **“Utilización Agrícola de Lodos de Estaciones de Depuradoras de Aguas Residuales. Aplicaciones en el Territorio de la Comunidad de Madrid”**. España.
- CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CIREN). 1990. **“Atlas Agroclimático de Chile: Regiones IV a IX”**. Santiago, Chile.
- CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CIREN). 1996. **“Estudio Agrológico del Proyecto Maipo. Región Metropolitana”**. Santiago. Chile.
- CEPAL, 1993. **“Plan de Desarrollo Agrícola Sustentable para el Secano de la VI Región de Chile”**. Unidad Conjunta CEPAL/PNUMA. Santiago, Chile.
- COGGER, C. *et al.* 2000. **“Biosolids Management Guidelines for Washington State”**. EEUU.
- COMISION NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA). 1994. **“Propuesta Plan Nacional de Conservación de Suelos”**. Santiago, Chile.
- COMISION NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA). 2000. Decreto N° 123. **“Anteproyecto de Reglamento para el manejo de Lodos no Peligrosos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas”**. Santiago. Chile.
- COMISION NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA). 2001. **“Proyecto definitivo de reglamento sobre manejo de lodos no peligrosos”**. Versión borrador del Proyecto definitivo. Santiago. Chile.
- COMISION NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA). 2006. **“Reglamento de Lodos No Peligrosos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas”**. Santiago. Chile.
- CONAF-CONAMA-BIRF. 1997. **“Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales y Nativos de Chile. Actualización 2002”**. Santiago. Chile.
- CORINE-CEC. 1992. **“Soil erosion risk and important land resources. An assement to evaluate and map the distribution of land quality and soil erosion risk”**. Office of official publications y the European Communities. EUR 13233. Luxemburgo.
- CORTES, E. 2003. **“Fundamentos de Ingeniería para el Tratamiento de los Biosólidos generados por la depuración de Aguas Servidas en la Región Metropolitana”**. Tesis de Ingeniero Civil Químico. Universidad de Chile.
- CHYE, A. ENVIRONMENT POLICY AND SPARKES, J. 2000. **“Environment Guidelines: Use and disposal biosolids products”**. Environment Protection Authority. Sydney, Australia.
- CHUVIECO, E. 2002. **“Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio”**. Ediciones Ariel. Barcelona, España. Pp. 586.
- DE KIMPE, C.R. y MOREL, J.L. 2000. **“Urban soil management: a growing concern”**. En Revista Soil Science. V.165 (1), 31-40.
- EPSTEIN, E. Ph. D. 2003. **“Land application of seware sludge and biosolids”**. Editorial Internacional Standar Book Number. Lewis Publisher. United States of America. Pp. 201.

- FAO-PNUMA. 1984. **“Metodología provisional para la Evaluación y la Representación Cartográfica de la Desertización”**. Roma, Italia. Ed FAO. Pp 74.
- FAO. 1994. **“Erosión de suelos en América Latina. Suelos y Aguas”**. Santiago, Chile.
- FERNÁNDEZ, R. 2006. **“Evaluación Espacial de Procesos Erosivos y su Influencia sobre el Corredor de Comercio Las Leñas, VI Región del Libertador Gral. Bernardo O’Higgins”**. Memoria para optar al Título de Geógrafo. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Stgo, Chile. Pp 91.
- FERRANDO, F. 1991. **“Bases para la Confección de Cartas de Erodabilidad”**. Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas, XIV Congreso de Geografía y V Jornada de Cartografía Temática. Universidad de Talca.
- FIGUEROA, H. 1992. **“El Relieve de la Alta Cordillera de la Costa en las Regiones de Valparaíso y Santiago”**. En Revista Geográfica de Valparaíso N° 22-23. Pp 167-174.
- FOURNIER, F. 1975. **“Conservación de Suelos”**. Versión española de J. A. Medina. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- GALLARDO, J. 2006. **“Expansión del límite urbano de la ciudad de Salamanca y los impactos derivados en su espacio agrícola”**. Memoria para optar al Título de Geógrafo. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Escuela de Geografía. Santiago, Chile.
- GOMEZ OREA, D. 1996. **“Ordenación del Territorio, una aproximación desde el medio físico”**. Instituto Tecnológico Geominero de España. Editorial Agrícola Española, S.A. Pp 59-139.
- GONZALES, A.M. 1994. **“Geoquímica de metales pesados en Chile. Impacto ambiental de Metales Pesados en Chile”**. INIA, La Platina. Santiago, Chile.
- HONORATO, R. **“Suelos Degradados y Agricultura Sustentable”**.
- INDUAMBIENTE, 2002. **“La Geografía de las Aguas”**. En Revista N° 59. Año X. Santiago, Chile.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS (INIA). 2005. **“Valorización de lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas como mejorador de Suelos Degradados”**. En Seminario: Uso benéfico de lodos. Serie Actas INIA N° 27. Santiago, Chile.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE). 2002. **“XVII Censo de Población y VI de Vivienda”**. Santiago. Chile.
- JENNY, H. 1941. **“Factors of soil formation: a system of quantitative pedology”**. Ed MacGraw Hill. Pp281.
- KHALIL, M.I. *et al.* 2001. **“Nitrogen transformations and emisión of greenhouse gases from three acid soils of humid tropics amended with N souces and moisture regime. I. Nitrogen transformations”**. Soil Sci. Plant Analysis 32.
- KNIGHT PIESOLD S.A. 1998. **“Caracterización, Reutilización, Tratamiento y Disposición Final de lodos provenientes de PTAS, para la elaboración de una Propuesta de Normas Técnicas de manejo”**. Informe Final. Santiago. Chile.
- KUHNI A. & PFIFFNER O.A. 2001. **« Drainaje Patterns and Tectonic Forcing: A model Study for the Swiss Alps”**. Geologisches Institute, Universitat Bern. Basin Research, Volume 13, Issue 2. Bern, Switzerland. Pp. 169 – 197.
- LIENLAF, M. 2003. **“Caracterización de Procesos Erosivos en Microcuencas de la Comuna de San Pedro, Provincia de Melipilla”**. Memoria para optar al Título de Geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

- LUZIO, W., y CASANOVA, M. 2006. **“Avances en el conocimiento de suelos de Chile”**. Universidad de Chile. Santiago, Chile. Pp 394.
- MÄRKER, M; MORETTI S. y RODOLFI, G. 2001. Integrated Water Resources Management System, Capitulo **“Assessment of Water Erosion Processes and Dynamics in Semii-arid Regions of Southern Africa (Kwazulu / Natal, RSA, and Swaziland) Using the Erosion Response Units Concept (ERU’s)”**. Revista Geogr. Fis. Dinam. Quat. Vol.24. Issue 1. Florencia, Italia. Pp. 71-84.
- MARQUEZ, M. 2002. **“El impacto de las políticas agrícolas sobre los medios rurales ambientalmente frágiles: Un caso en el secano interior de Chile Central”**. En Revista Geográfica de Chile Terra Australis N° 47. Santiago. Chile.
- MENA, M. 2003. **“Avances en el marco legal para el uso y disposición de biosólidos en Chile: Efectos”**. En Revista AIDIS-CHILE N° 32. Santiago. Chile. Pp. 34-41.
- MORGAN, R.P.C. 1997. **“Erosión y Conservación de Suelo”**. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona, España. Pp 343.
- OGURA, A; SOARES, E. 1985. **“Procesos y Riesgos Geológicos”**. II Curso internacional de Aspectos Geológicos y Protección Ambiental. Cap. 8, Pp 114-137.
- OLIVARES, M. S., y NARANJO, G. 2000. **“Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente”**. En Revista Geográfica de Valparaíso N° 31. Pp 195-210. Chile.
- OTAS, 1998. **“Bases para un Ordenamiento Territorial Ambientalmente Sustentable en la Región Metropolitana de Santiago”**.
- PLASTER, E. 2000. **“La Ciencia del Suelo y su Manejo”**. Capitulo 14: Correctores Orgánicos. Ed. ITP-Paraninfo.
- QUINTANILLA, V. 1983. **“Cartografía ambiental de Santiago Metropolitano”**. En contribuciones científicas y tecnológicas: área geociencias. Vol. XXII, no. 92, 1992. Marzo, p. No dedicado
- QUINTANILLA, V. 1987. **“Carta Fitogeográfica de Chile Mediterráneo”**. Contribuciones científicas y tecnológicas: área geociencias-- Vol. XVII, no. 70, 1987. Julio, p. No dedicado.
- QUINTANILLA, V. 1995. **“Riesgos que actúan sobre el medio ambiente de la ciudad de Santiago”**. En Anales de Geografía de la Universidad Complutense de Madrid. N° 15, Pp. 559-569. España.
- QUINTEIRO, M.P., ANDRADE, M.L., y E. DE BLAS. 1998. **“Efecto de la adición de un lodo residual sobre las propiedades del suelo: Experiencias de campo”**. En Revista Edafología N° 5, 1-10. España.
- RUGIERO, V. 2006. **“Suelos Potencialmente Aptos para Revegetarización o Uso Agrícola a partir de la utilización de Biosólidos provenientes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas en la Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana”**. Memoria para optar al Título de Geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- SERVICIO AGRÍCOLA GANADERO (SAG). 2006. **“Mapa de Agresividad Climática: Regiones V, VI, VII, y VIII”**. Universidad de Talca. Chile.
- SANTANDER, G. 2005. **“Efecto de la Aplicación de Residuos Sólidos de Alto Impacto en la Actividad Biológica de los Suelos de Uso Forestal”**. Tesis Bioquímico. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Departamento de Química Inorgánica y Analítica.
- SEOANEZ, M. 1999. **“Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión”**. Colección Ingeniería del Medio Ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España.

SOTO, M. V., CASTRO, C. P., RODOLFI, G., *et al.* “**Procesos geodinámicos actuales en ambiente de media y baja montaña: Borde meridional de la cuenca del río Maipo, Región Metropolitana de Santiago**”. Rev. Geográfica. Norte Grande., jul. 2006, no.35, p.77-95. ISSN 0718-3402.

SUAREZ DE CASTRO, F. 1980. “**Conservación de Suelos**”. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Costa Rica. Pp 289.

SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS (SISS). 2002. Comunicación Personal.

TORO, FRANCISCA. 2005. “**Áreas potenciales para la aplicación de Biosólidos en Plantaciones Forestales de la VI región de Chile**”. Memoria para optar al Título de Ingeniero Forestal. Universidad de Chile, Fac. de Ciencias Forestales. Santiago, Chile.

U.S SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). 1964. “**Engineering field manual for conservation practices**”. USDA Soil Conservation Service. Washington D.C, EEUU.

VERA, W. 1998. “**Suelos, una visión actualizada del recurso**”. 2ª edición. Universidad de Chile, Fac. de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago, Chile.

VIDELA, X. 2005. “**Efecto del contenido de agua en la mineralización bruta e inmovilización de nitrógeno**”. En Revista Agricultura Técnica, Vol 65. Nº1. Pp 74-78.

WALL, R., GANA, F. y GUTIERREZ, A. 1996. “**Mapa Geológico del Área San Antonio-Melipilla. Regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins**”. Serie Mapas Geológicos. Santiago. Chile.

WHITEHOUSE, L. *et al.*, 2000. **es for utilisation of sewage effluent on land. Part two: issues for design and management**. Rotorua, New Zelanda.

YOKENS, C. 2001. “**Evolución espacial del Patrón Térmico Superficial y su relación con las coberturas espaciales de uso de suelo y cobertura vegetal**”. Memoria para optar al Título de Geógrafo. Universidad de Chile, Fac. de Arq. y Urbanismo. Santiago, Chile.

www.conama.cl/rm/568/article-1201.html

<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>

ANEXOS

ANEXO 1. RAMAS DE ACTIVIDADES ECONOMICAS

RAMAS DE ACTIVIDAD ECONOMICA
A Agricultura, ganadería, caza y silvicultura.
B Pesca.
C Explotación de minas y canteras.
D Industrias manufactureras.
E Suministro de electricidad, gas y agua.
F Construcción.
G Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores, motocicletas, efectos personales y enseres domésticos.
H Hoteles y restaurantes.
I Transporte, almacenamiento y comunicaciones.
J Intermediación financiera.
K Actividades inmobiliarias, empresariales y de alquiler.
L Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria.
M Enseñanza
N Servicios sociales y de salud.
O Otras actividades de servicios comunitarias, sociales y personales.
P Hogares privados con servicio doméstico.
Q Organizaciones y órganos extraterritoriales.

Fuente: INE, 2002

ANEXO 2. PROYECCIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS A NIVEL NACIONAL

REGION	EMPRESA	POBLACION URBANA	COBERTURA REFERIDA A POBLACION			
			Dic. 2001	Proyección a Diciembre de cada año		
			2001	2002	2005	2010
I	Essat S.A	402.366	96.3	96	98.7	99.3
II	Essan S.A	446.716	61.1	100	100	100
III	Emssat S.A	236.962	72	75.5	83.1	94.4
IV	Essco S.A	510.89	93.5	95.6	97.4	98
V	Esval S.A	1.402.117	61.9	83.4	93.2	97.7
V	Coopagua S.A	3.294	20.7	25	35	98
RM	Aguas Andinas S.A	5.387.565	22.4	23.2	73	99.5
RM	Aguas Cordillera	398.883	0	0	20	100
RM	Aguas Los Dominicos S.A	13.400	0	0	34	100
RM	Aguas Manquehue S.A	16.452	39.8	42.9	43.4	100
RM	Servicomunal S.A	68.044	85.2	85.2	88.3	95.7
RM	Smapa Maipú	570.964	99.9	100	100	100
VI	Essel S.A	522.022	78.6	84.4	92.1	97.4
VII	Essam S.A	603.945	23.8	23.8	99.9	100
VIII	Essbio S.A	1.564.726	32.5	35.9	95.3	100
IX	Essar S.A	568.263	9	13	81.4	91.3
X	Essal S.A	520.531	7.4	14.9	94.8	98
X	Aguas Décima S.A	125.562	90	91.3	93.9	98.5
XI	Emssa S.A	67.926	70.3	70.9	72.6	73.5
XII	Esmag S.A	145.742	10.6	10.6	100	100

Fuente: Superintendencia de Servicios Sanitarios en INDUAMBIENTE (2002)