

## **SÍNTESIS**

## **1. ANÁLISIS DE ANTECEDENTES TÉCNICOS Y REGULACIONES INTERNACIONALES RELATIVAS A CRITERIOS DE PROTECCIÓN DE CALIDAD DEL SUELO**

### **Protección del suelo.**

La inserción de Chile en los mercados globales y su rol como país exportador de alimentos exige excelencia en la calidad de sus productos, lo que incluye una agricultura limpia y la manutención y mejoramiento de la calidad de los recursos naturales utilizados en el proceso productivo, es decir, del suelo, agua y aire.

La importancia de la protección del suelo es ampliamente reconocida. En la “Cumbre de Río” (1992), los estados participantes adoptaron importantes acuerdos acerca de ella. En 1994, la “Convención de Lucha Contra la Desertificación de Naciones Unidas” tuvo como finalidad evitar y reducir la pérdida del suelo, rehabilitar terrenos parcialmente degradados y recuperar tierras en proceso de desertificación (CCE, 2002). El suelo y su protección aparecen en numerosas políticas de la Unión Europea, incluyendo las de medio ambiente, agricultura, desarrollo regional, transporte, investigación y desarrollo. El objetivo ha sido proteger el suelo contra la erosión y la contaminación, además de mantener su fertilidad, aspectos puestos de relevancia en el “Sexto Programa de Acción en Materia de Medio Ambiente” (2001) y en la “Estrategia a Favor de un Desarrollo Sostenible” (2001). Entre las políticas de la Comunidad Europea que afectan la protección del suelo (CCE, 2002) cabe destacar:

- La legislación comunitaria sobre el agua: Directiva de Nitratos y Directiva Marco del Agua.
- La legislación destinada a reducir y supervisar la contaminación atmosférica: Directiva Marco de Calidad de la Atmósfera y directivas derivadas y Directiva Sobre Límites Nacionales de Emisiones.
- La Directiva sobre Lodos de Depuradoras, que regula el uso de lodos en agricultura provenientes de depuradoras de forma que se eviten los efectos nocivos sobre el suelo.
- La política de Ordenación Territorial.
- La Directiva sobre Prevención y Control Integrado de la Contaminación en la legislación general sobre medio ambiente, que exige de la industria y de las explotaciones intensivas de ganado que eviten las emisiones de contaminantes a la atmósfera, al agua y al suelo.

La Unión Europea considera para la protección del suelo los siguientes procesos degradativos:

- Erosión.
- Pérdida de materia orgánica.
- Contaminación local y difusa.
- Sellado del suelo.
- Compactación del suelo.
- Reducción de la biodiversidad del suelo (suelos más vulnerables a la erosión).
- Salinización.
- Inundaciones y deslizamientos de tierra.

Los diferentes Estados Miembros de la UE han tomado, además, iniciativas propias sobre la protección del suelo en relación con los procesos de degradación que consideran prioritarios. En Europa Central y Septentrional destacan los esfuerzos para evitar y remediar la contaminación y el sellado del suelo, mientras que las iniciativas de los países meridionales se refieren más a la erosión y a la desertificación en el contexto de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. En Alemania hay una ley de protección del suelo que tiene como objeto la protección y restauración de las funciones que permiten su buen funcionamiento y que obliga a evitar el sellado del suelo y a tomar precauciones contra cambios edáficos nocivos. En Francia se aprobó un plan nacional de gestión y protección del suelo que previene la contaminación en el futuro. El plan incluye una nueva red de vigilancia del suelo en cuadrículas de 16 por 16 km, la finalización del mapa nacional de suelos y de mapas de riesgos de erosión y de materia orgánica. Austria, por su parte, elaboró un sistema de información sobre suelos que se puede acceder por Internet.

### **Calidad del suelo.**

El término “calidad del suelo” se originó en USA en la década de 1990, apareció por primera vez en el informe “Calidad del suelo y Agua: Una Agenda para la Agricultura” del National Research Council Committee (NRCC). Para el NRCC la protección de la calidad del suelo constituye una meta básica de la política medioambiental. Este Comité enfatizó la relación existente entre la calidad del suelo y del agua. El NRCC estableció cuatro estrategias para prevenir la degradación del suelo y la contaminación de las aguas (Letey *et al.*, 2003):

1. Conservar y mejorar la calidad del suelo como primera medida para mejorar el medioambiente.
2. Hacer un uso eficiente de los pesticidas, del riego y de los fertilizantes en los sistemas agrícolas.
3. Aumentar la resistencia de los sistemas agrícolas a la erosión y escurrimiento superficial.
4. Hacer un mejor uso de los campos y de las zonas de protección del paisaje (landscape buffer zones).

Actualmente se reconoce internacionalmente la importancia del suelo como un recurso natural esencial planteando la necesidad de establecer indicadores de calidad del suelo para conservar o mejorar su productividad, protegiendo al mismo tiempo la calidad ambiental, la salud humana y animal y la calidad de los alimentos.

La evaluación de la calidad del suelo tiene una primera fase de identificación y selección de los indicadores de calidad; en una segunda etapa se establecen niveles críticos en base al conocimiento técnico local. Luego, se establece un sistema de monitoreo. Una vez que el sistema de monitoreo es aceptado, forma parte del sistema de apoyo en la toma de decisiones para el manejo de los recursos naturales.

El Plan Nacional de evaluación de la calidad del suelo de USA se inició con un inventario de los suelos, incluyendo información acerca del uso, clasificación, propiedades edáficas, factores de erosión y otros. Luego se introdujo la calidad del suelo dentro de la política medioambiental y se seleccionaron indicadores de acuerdo a condiciones agro-ecológicas para establecer planes de monitoreo de su calidad.

La UE ha desarrollado indicadores agroambientales los cuales incluyen indicadores y monitoreo de la calidad del suelo. El enfoque en este caso ha sido hacia el impacto medioambiental de la calidad del agua, uso de pesticidas y exceso de nutrientes, antes que hacia la producción agrícola. Otro énfasis de la UE es la conservación de la biodiversidad en los suelos agrícolas y hábitats silvestres.

En Alemania los estándares de calidad del suelo están definidos en la Ley Federal de Protección de Suelos y la Ordenanza de Protección de Suelo (Ordenanza BboSchG/1999). El objetivo de esta ley es proteger o restaurar las funciones del suelo con una base sustentable. Los valores de calidad del suelo se han definido manteniendo la multifuncionalidad del suelo, es decir, en todos los tipos de uso. La diferenciación entre

suelos se realiza según sus propiedades físicas y químicas. Los valores de los contaminantes químicos orgánicos se diferencian de acuerdo al contenido húmico del suelo. En el Reino Unido los indicadores de calidad del suelo propiamente tal son contenido de materia orgánica, pH y concentración de metales pesados.

### **Contaminación de suelos y estándares de calidad.**

La contaminación de suelo es un aspecto de su calidad. La UE propuso directivas (Kelley, 2002) para la clasificación de suelos contaminados (**Cuadro 1**). Holanda elaboró estándares para estimar el grado de contaminación del suelo, publicados con la Ley Holandesa Provisional para el Saneamiento de Suelos (Brion y Rosso, 1998). Esta ley fue un intento de establecer categorías y límites basados tanto en la naturaleza y concentración de los contaminantes como también en las condiciones específicas del sitio, las que afectan la migración y destino de los contaminantes. Allí se señalan procedimientos y estándares para el saneamiento a corto plazo de suelos contaminados. Se propuso el uso de tres estándares: valor de referencia (A), valor máximo permitido (B) y valor de saneamiento o intervención al cual se necesitan medidas de saneamiento o descontaminación. En el **Cuadro 2** se muestran los valores de referencia y de intervención ( A y C ) propuestos para la evaluación de la contaminación del suelo, en términos de la concentración total de metales pesados en el suelo. El valor de referencia (A) no es el mismo para un metal en todos los suelos, sino que proviene de una fórmula que considera el contenido de materia orgánica y de arcilla (**Cuadro 3**). Distintos países han adaptado este sistema a sus realidades, es el caso de Taiwán, Corea, Canadá y Los Países Bajos.

En España, está en revisión el Real Decreto que señala las actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados (Perez, 2004). Las líneas prioritarias se incluyen en diversas áreas temáticas que se agrupan en tres bloques:

1. Caracterización y procesos que ocurren en suelos contaminados (interacciones en el sistema suelo-agua-contaminantes) y bio-disponibilidad.
2. Evaluación de riesgo para la salud humana, riesgo ecológico y desarrollo de modelos de evaluación.
3. Recuperación y gestión de suelos contaminados, evaluación de la recuperación y desarrollo de tecnologías.

España cuenta con un Inventario Nacional de Suelos Contaminados y un Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados que tiene como objetivo:

- La caracterización ambiental de los terrenos sospechosos de albergar suelos contaminados.
- La recuperación ambiental de los terrenos que se consideren prioritarios.
- La elaboración de estándares de calidad de suelos.
- La elaboración de normas técnicas de muestreo, métodos de análisis y procedimientos de investigación.

La legislación existente en España sobre umbrales mínimos de metales pesados que se consideran contaminantes sólo contempla la adición de lodos de depuradoras como enmienda orgánica a los suelos.

En Alemania la contaminación con metales pesados está considerada en leyes relacionadas a la calidad del suelo como la Ley Federal de Desechos y la Ordenanza de Desechos Orgánicos, y la Ley Federal de Fertilizantes. En relación a estos metales se consideran los tipos de suelos y valores de pH (European Commission, 2004). Para evitar el deterioro del suelo al aplicar biosólidos se establecieron valores máximos de metales pesados en el suelo según el tipo de suelo (**Cuadro 4**) a través de la Ordenanza de aplicación de biosólidos a tierras agrícolas (Ordenanza AbfKlärV/1992). Estos valores se revisan continuamente a la luz de nuevos antecedentes generados en investigaciones sobre metales en el suelo y sobre la transferencia de éstos a las plantas. Así se establecen nuevos valores bases recomendados por El Grupo de Trabajo de Protección del Suelo, Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz – LABO (Bannick *et al.*, 1998).

En Canadá, las nuevas directivas de calidad del suelo se han desarrollado en relación a los usos específicos del suelo y del agua: agrícola, residencial/parques, comercial e industrial (Ahn y Kim, 2004).

En Japón, la Ley de Prevención de Contaminación de Suelos Agrícolas ha establecido un límite máximo en suelos agrícolas de Cd de  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  (para el cultivo del arroz), de Cu de  $125 \text{ mg kg}^{-1}$  (extracción con HCl 0,1 N) y de As de  $15 \text{ mg kg}^{-1}$  (extracción con HCl 0,1 N) (Ahn y Kim, 2004).

El **Cuadro 5** muestra las concentraciones máximas permitidas de metales pesados en suelos agrícolas de diferentes países. También se han establecido contenidos máximos de metales pesados permitidas en los lodos (**Cuadro 6**) y compost (**Cuadro 7**).

### **Calidad del suelo y contenido de metales pesados: estándares internacionales.**

En la mayoría de los países se han establecido límites de metales pesados en suelos como consecuencia de la normativa necesaria para la aplicación de biosólidos a suelos agrícolas.

En Chile, la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) propuso un Anteproyecto de Reglamento para el Uso de Residuos no Peligrosos en Suelos Agrícolas en el año 2000. Este documento está basado fundamentalmente en la experiencia extranjera, que ha generado regulaciones principalmente para el uso agrícola de los lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas (biosólidos). La producción masiva de lodos en el país se inició con la puesta en marcha de la planta El Trebal en el 2002 y de La Farfana en 2004. La posibilidad de disponer estos lodos en suelos agrícolas ha motivado diversas investigaciones sobre los metales pesados en el suelo, cuyos resultados contribuirán a mejorar nuestra reglamentación sobre metales pesados en el suelo.

Para establecer el **límite de metales pesados en el suelo** se han determinado valores en suelos que no han sido afectados por actividades humanas y en suelos afectados. Los valores en suelos no afectados se consideran como el máximo permitido de metales pesados en el suelo y éstos son los que se han aplicado, principalmente en los suelos cultivados. En Alemania, los límites máximos permitidos se establecieron de acuerdo a resultados obtenidos en ensayos de laboratorio, de invernadero y de campo (Lacatuso, 1998). En Chile, frente a la poca información sobre contenidos de metales pesados, se podrían utilizar, como una primera aproximación, los valores A y C propuestos por Holanda y los valores de materia orgánica y arcilla disponibles para los perfiles de suelos de las distintas agrupaciones propuestas en este documento.

## **2. CALIDAD DEL SUELO AGRÍCOLA.**

En este estudio se adoptará la definición de calidad del suelo agrícola dada por La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo, que define calidad del suelo (CS) como “la

*capacidad funcional de un tipo específico de suelo, para sustentar la productividad animal o vegetal, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, y sostener el asentamiento y salud humanos, con límites ecosistémicos naturales o determinados por el manejo”* (Karlen *et al.*, 1997).

Las funciones específicas a que hace referencia el concepto de calidad del suelo según Brejda y Moorman (2001) son:

1. Captar, mantener y liberar nutrientes y otros compuestos químicos.
2. Captar, mantener y liberar agua a las plantas y recargar las napas subterráneas.
3. Mantener un hábitat edáfico adecuado para la actividad biológica del suelo.

La calidad del suelo incluye los conceptos de capacidad productiva y protección ambiental (Wander *et al.*, 2002). La CS es dinámica y puede cambiar en el corto plazo de acuerdo al uso y a las prácticas de manejo; para conservarla es necesario implementar prácticas sustentables en el tiempo (NRCS, 2004). La mantención o mejora de la CS puede generar beneficios económicos en forma de aumento de la productividad, mayor eficiencia en el uso de nutrientes y pesticidas, mejor calidad del aire y del agua, y reducción de los gases de efecto invernadero (Brejda y Moorman, 2001).

De lo anterior, se desprende que la calidad del suelo es una propiedad dinámica asociada al uso del suelo y su valor tiene efecto sobre la protección ambiental y la producción silvoagropecuaria.

### **Indicadores de calidad del suelo.**

La calidad del suelo no puede ser evaluada directamente por lo que se usan indicadores de calidad. Ellos deben permitir analizar la situación actual del suelo e identificar puntos críticos con respecto a su sustentabilidad productiva, como recurso natural importante para la mantención de la calidad de la vida y de la biodiversidad. Los indicadores deben, además, permitir analizar los posibles impactos de una intervención antes que ella se realice y monitorear el impacto de la intervención. Por último, deben permitir determinar si el uso del recurso es sustentable (Hünнемeyer *et al.*, 1997).

Los indicadores directos comúnmente utilizados corresponden a las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, pero aspectos más complejos como la capacidad productiva del suelo puede ser evaluada indirectamente a través del rendimiento de sistemas agrícolas, forestales y ganaderos en un período de tiempo.



Los indicadores deben cumplir ciertas condiciones (NRCS, 2004):

- Ser simples de medir.
- Ser sensibles a los cambios en las funciones del suelo.
- Considerar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.
- Ser aplicables en condiciones de campo.
- Ser sensibles a las variaciones climáticas y de manejo.

El seguimiento de la calidad del suelo se puede hacer de manera comparativa o relativa. Para esto se puede comparar la evolución de un mismo sistema a través del tiempo (comparación longitudinal), o bien comparar simultáneamente uno o más sistemas de manejo alternativo teniendo una referencia (comparación transversal) (Maser *et al.*, 1999).

### **Indicadores físicos**

Las propiedades físicas a ser utilizadas como indicadores físicos de la calidad del suelo son aquellas que reflejan cómo éste acepta, retiene y transmite agua a las plantas, cómo limita el crecimiento de las raíces y la emergencia de las plántulas. Generalmente están relacionadas con la estructura del suelo y su distribución de poros (Bautista *et al.*, 2004). Existe una gran variedad de indicadores físicos de la CS (**Cuadro 8**), algunos varían de acuerdo a las características predominantes del lugar y otros cambian con el manejo.

### **Indicadores químicos de calidad del suelo**

Los indicadores químicos de calidad del suelo (**Cuadro 8**), se refieren a propiedades químicas que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua del suelo, la capacidad amortiguadora o “buffer” del suelo y la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos. Los indicadores químicos de CS que reflejan la fertilidad del suelo (pH, MO, N, P y K) son importantes en términos de la producción de los cultivos, sin embargo, en sistemas contaminados otros indicadores pueden tener mayor importancia para evaluar la CS. En Taiwán, por ejemplo se seleccionaron los elementos trazas disponibles Cu, Zn, Cd y Pb como indicadores químicos de la CS (Chen 2000).

### **Indicadores biológicos del suelo**

Los indicadores biológicos (**Cuadro 8**) integran una cantidad de factores que afectan la calidad del suelo. Se expresan como abundancia y/o subproductos de organismos,

incluidos bacterias, hongos, nemátodos, lombrices, anélidos y artrópodos (Bautista *et al.*, 2004). También se considera como indicador biológico el rendimiento de los cultivos (Chen 2000). Algunos indicadores biológicos tienen la ventaja de servir como señales tempranas de degradación o de mejoría de los suelos, otros requieren de mayor tiempo para expresarse (por ejemplo, 10 años o más para exhibir cambios como respuesta a un manejo determinado, Astier-Calderón *et al.*, 2002).

### **Metales pesados.**

Los metales pesados contaminantes más comunes, son cromo (Cr), manganeso (Mn), níquel (Ni), cobre (Cu), cinc (Zn), arsénico (As), selenio (Se), molibdeno (Mo), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb). El As y Se se incluyen, por simplicidad o conveniencia, dentro de los metales pesados aún cuando son metaloides o no metales (Connell, 1997; Brady y Weil, 2002). Todos estos elementos son tóxicos, en mayor o menor grado para los seres humanos y otros seres vivos. Cadmio y As, son extremadamente tóxicos, Hg, Pb y Ni son moderadamente tóxicos y Cu, Mn y Zn son menos tóxicos para los mamíferos (Brady y Weil, 2002). Algunos metales pesados son importantes en la nutrición de plantas, animales y humanos a nivel de trazas como Zn, Cu, Mn, Fe, Cr, Ni, y Mo, mientras otros no presentan un efecto nutricional importante (Pb, Cd, Hg), sin embargo, todos pueden causar efectos tóxicos si se encuentran en exceso (Lasat, 2001; Spiegel, 2002;). Estos elementos tienen en común el encontrarse naturalmente en la corteza terrestre e inducir efectos tóxicos en seres vivos expuestos a ellos cuando sus concentraciones, tiempos de exposición y/o una combinación de ambos, superan los umbrales de tolerancia de los organismos expuestos (González, 1994; John y Leventhal, 1995).

Los metales pesados se encuentran naturalmente en el suelo en distintas concentraciones, las que pueden aumentar por efecto de la fertilización química, abonos de origen animal, biosólidos, composts, enmiendas, pesticidas y por depositación atmosférica (von Sothen, 2001; Silveira *et al.*, 2003; E.C., 2003). En Chile, por la producción minera, los elementos con potencial de contaminación ambiental son el As, Fe, Mo, Pb y Zn (González, S. 1994).

### **Criterios de restricción del uso de suelos agrícolas en relación a metales pesados.**

Para el establecimiento de límites o restricciones de uso del suelo en relación a metales pesados y cultivos se consideran diferentes criterios:

- Propiedades del suelo (pH, materia orgánica, conductividad eléctrica y contenido de arcilla).
- Valores totales de metales pesados en el suelo.
- Valores de metales pesados movilizables o disponibles en el suelo (metales extraíbles con EDTA, DTPA).
- Valores totales de metales pesados en los órganos de consumo de los cultivos.
- Toxicidad del metal pesado, por ejemplo, disminución del 10% de la materia seca o rendimiento de los cultivos ó respuesta de la fauna (ganado, organismos indicadores).
- Una combinación de los anteriores.

### **Bio-disponibilidad de metales pesados.**

Se entiende por *biodisponibilidad* la fracción de metal pesado que está disponible para la absorción por las plantas, esta fracción está constituida por la parte soluble y adsorbida del metal.

Los metales se encuentran en distintas formas o fracciones en el suelo: (1) soluble en la solución del suelo, (2) adsorbida en los sitios de intercambio de los constituyentes inorgánicos del suelo, (3) ligada a la materia orgánica, (4) precipitada como óxidos, hidróxidos y carbonatos, y (5) residual en las estructuras de los minerales silicatados (Rieuwerts *et al.*, 1998; Lassat, 2001; Reichaman, 2002; Basta, 2004). Para que se produzca extracción de los metales por la planta, éstos deben estar bio-disponibles. La bio-disponibilidad depende de la solubilidad y movilidad de los metales Sólo los metales que se encuentran en la solución suelo y aquellos adsorbidos en los sitios de intercambio de los constituyentes inorgánicos del suelo (fracciones 1 y 2) están disponibles para las plantas, por ello, la concentración total de los metales en el suelo no refleja necesariamente los niveles de metales bio-disponibles. (Elliot y Shields, 1988; Sims y Kline, 1991; Ma y Rao, 1997; Rieuwerts *et al.*, 1998; Lassat, 2001; Silveira *et al.*, 2003).

La bio-disponibilidad de los metales depende de la solubilidad de los metales y de su capacidad de adsorción en la fracción coloidal del suelo. La interacción entre los distintos procesos que ocurren en el suelo, como intercambio catiónico, adsorción/desorción, precipitación/disolución y formación de complejos, afectan la distribución de los metales entre la solución suelo y la fase sólida, siendo responsables de su movilidad y bio-disponibilidad dentro del sistema planta-suelo (Rieuwerts *et al.*, 1998; Silveira *et al.*, 2003; Basta, 2004).

Los factores del suelo que afectan la bio-disponibilidad del metal son pH, potencial redox, textura, contenido y tipo de arcillas, materia orgánica, óxidos de Fe, Mn y Al, y la presencia de cationes y aniones en solución (Rieuwerts *et al.*, 1998; Reichman, 2002; Silveira *et al.*, 2003; Basta, 2004). La **Figura 1** muestra el rango de variación de la disponibilidad de algunos elementos traza con el pH del suelo.

Debido a que el fin último de cualquier normativa o recomendación es la protección de la salud del hombre, se deben tener presente tres factores en la cadena **suelo – planta – hombre**, éstos son,

- La adsorción del elemento en el suelo (grado de disponibilidad).
- La fitotoxicidad.
- El riesgo en la cadena alimentaria (bio-acumulación).

Tomando en cuenta estos factores Chaney (1980) formó cuatro grupos de metales y metaloides según su riesgo potencial, que se muestran en el **Cuadro 9**.

### **Calidad de los suelos chilenos.**

Los suelos chilenos se caracterizan por su gran heterogeneidad debido a la interacción de diversos materiales parentales con las distintas condiciones climáticas existentes a lo largo del país. Con el fin de asociar casos de suelos con cultivos se definieron seis zonas agroecológicas, en cada una de las cuales se consideró la actividad agropecuaria, el clima y algunos perfiles de suelos que en esta propuesta llamaremos típicos. En total se seleccionaron 15 perfiles de suelos típicos correspondientes a los siguientes subgrupos taxonómicos: Typic Torrifluvent, Vertic Haplocamid, Typic Torriorthent, Ultic Haploxeralf, Typic Rhodoxeralf, Ultic Argixeroll, Entic Haploxeroll, Typic Melanoxerand, Leptic Haploxerent, Halic Haploxerent, Typic Haploxerand, Xeric Palehumult, Hydric Hapludand, Typic Hapludand y Typic Placudand. Adicionalmente, para cada zona se identificaron los principales cultivos mediante recopilación de información publicada en línea por ODEPA y de estudios regionales. Las zonas agroecológicas identificadas fueron: 1) Zona Norte (**ZN**), 2) Zona del Secano de la Cordillera de la Costa de Chile Central (**ZSCCC**), 3) Zona Central de Riego (**ZCR**), 4) Zona de la Precordillera Centro-Sur (**ZPCS**), 5) Zona del Secano Interior de la Cordillera de la Costa Sur (**ZSICCS**), 6) Zona Húmeda del Sur (**ZHS**). Para los suelos típicos de las zonas agroecológicas se propone monitorear los indicadores mostrados en los **Cuadros 10, 11 y 13 y 14**.

Para las diferentes zonas agroecológicas se identificó la relevancia de los distintos

metales pesados (**Cuadro 15**), lo mismo se realizó para cada suelo típico (**Cuadros 16, 17, 18, 19 y 20**). Además se muestran las concentraciones máximas tolerables de metales pesados en cultivos agrícolas (**Cuadro 21**). Los valores críticos para los cultivos presentados en el cuadro anterior se obtuvieron considerando el límite máximo de concentración en el órgano de la planta encontrado por diferentes autores en distintas suelos no contaminados del mundo. Estos valores no corresponden a límites de fitotoxicidad. Finalmente, a partir de la información anterior se identificaron los metales pesados con riesgo potencial la salud humana en cultivos de consumo frecuente en los suelos típicos de las seis zonas agroecológica definidas (**Cuadro 22**). Esta información puede ser usada como de referencia mientras no se investiguen las concentraciones biodisponibles de metales pesados en los suelos y los máximas tolerables en los cultivos más comunes de las agrupaciones de suelo definidas en el presente trabajo.

### **3. RECOMENDACIÓN DE PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO PARA ELABORAR UNA NORMATIVA DE PROTECCIÓN DE CALIDAD DE LOS SUELOS DE USO AGRÍCOLA.**

Al hacer una proposición metodológica se debe tener en consideración que el país tiene zonas agroecológicas con sistemas de cultivos definidos. Además, debe tenerse presente que algunos indicadores de calidad del suelo interactúan entre ellos y que los cambios en ellos ocurren a distintas velocidades, lo que debe considerarse en la selección de los indicadores y en los programas de monitoreo para determinar las tendencias al mejoramiento o empeoramiento en su calidad.

El procedimiento metodológico para elaborar una normativa de protección de la calidad del suelo considera las etapas siguientes:

1. Conocidos los indicadores de calidad del suelo, hacer una reunión de expertos (taller con especialistas en la producción de cultivos, en conservación de suelos, en riego, en física, química y biología de suelos) para establecer cuáles serían los indicadores de calidad más adecuados para los suelos típicos de cada zona agroecológica.
2. Establecidos los parámetros por suelos típicos, ver y analizar los métodos de muestreo de suelos y de análisis para proponer el uso de una metodología común.
3. Proponer una comparación inter-laboratorios para tener la seguridad que los resultados son comparables entre un laboratorio y otro.

4. Acordada y probada la metodología de muestreo de suelos y con los laboratorios de análisis de suelo dando resultados comparables, proponer un programa de monitoreo de los indicadores seleccionados para cada perfil típico, a fin de determinar las tendencias al mejoramiento o empeoramiento en la calidad del suelo en las distintas zonas agro-ecológicas.
5. Establecer, para cada perfil típico de suelos, los rangos en que se mueven los indicadores de calidad del suelos seleccionados.
6. En cuanto al problema de los metales pesados debiera investigarse para tener una buena base de datos sobre líneas base de metales pesados en suelos (concentración total y bio-disponibilidad).
7. Promover investigación orientada a tener información sobre contenidos de metales pesados en los cultivos más comunes en Chile, tanto para consumo interno como para exportación en sus diferentes órganos y fases de desarrollo.
8. De acuerdo a los resultados, establecer restricciones de uso del suelo para diferentes cultivos, según información local e internacional.
9. Si se detectan zonas contaminadas buscar y aplicar medidas de remediación para su recuperación.

#### **4. CONCLUSIONES**

La revisión de antecedentes técnicos y regulaciones internacionales relativas a criterios de protección de la calidad del suelo, en especial sobre el contenido de metales pesados, permite concluir lo siguiente:

- Las normas y regulaciones son diferentes para cada país debido a que sus suelos y fuentes de contaminación y grados de contaminación son distintos.
- Los países que ya cuentan con una normativa, han realizado su propia investigación en suelos y cultivos para generar su base de datos y poner en marcha planes de monitoreo de los indicadores de calidad de suelo más importantes de acuerdo a sus necesidades y factibilidad de medirlos.
- Los indicadores de calidad de suelo de uso agrícola más importantes, considerando la situación del país son pH, contenido de materia orgánica, aluminio intercambiable, nitrógeno y fósforo disponible, contenido de metal pesado total, disponible y bio-disponible, contenido de arcilla, densidad aparente y conductividad eléctrica.
- Se identificaron perfiles típicos de suelos de diferentes subórdenes correspondientes a: 1) Zona Norte, 2) Zona Central de Riego, 3) Secano de la Cordillera de la Costa de Chile Central, 4) Zona del secano Interior de la Cordillera de la Cosa Sur, 5) Zona de la Pre-Cordillera Centro Sur, y 6) Zona Húmeda del Sur.
- No existe suficiente información en Chile como para establecer rangos para los indicadores de los metales pesados, pero se indica qué metal(es) pesado(s) debiera considerarse como un indicador de calidad de suelo por cada uno de los perfiles típicos.
- Se concluye que en una primera aproximación debiera usarse la metodología propuesta por Holanda para determinar los valores de referencia para los metales pesados, en cuyo cálculo se utiliza el contenido de arcilla y materia orgánica.
- Es importante conocer el pH, el contenido de materia orgánica y el contenido y tipo de arcilla de los suelos ya que, a partir de estas propiedades se podría hacer predicciones de lo que ocurriría con la bio-disponibilidad de los metales pesados.
- El procedimiento metodológico para proponer una normativa nacional requiere desarrollar investigación sobre los indicadores de calidad de suelos recomendados para cada suborden y en lo posible, cada familia de suelos. Además, se tiene que implementar una metodología estándar tanto para la

toma de muestras de suelos como para los diferentes análisis químicos y físicos necesarios. Se tiene que desarrollar planes de monitoreo, cuya información permitirá establecer los rangos para los indicadores de calidad.

## 5. CUADROS Y FIGURAS

**Cuadro 1.** Directivas de Kelley para la clasificación de suelos contaminados

Parámetro	suelos no contaminados	Contaminación (mg kg <sup>-1</sup> suelo seco)			
		Ligera	Media	Alta	Muy alta



pH ácido	6 - 7	5 - 6	4 - 5	2 - 4	< 2
pH alcalino	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 12	>12
Arsénico	0 - 30	30 - 50	50 - 100	100 - 500	> 500
Cadmio	0 - 1	1 - 3	3 - 10	10 - 50	> 50
Cromo	0 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 25000	> 2500
Cobre (disponible)	0 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 25000	> 2500
Plomo	0 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	2000 - 1,0%	> 1%
Plomo disponible	0 - 200	200 - 500	500 - 1000	1000 - 5000	> 5000
Manganeso	0 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	2000 - 1,0%	> 1,0%
Níquel (disponible)	0 - 20	20 - 50	50 - 200	200 - 1000	> 1000
Cinc (disponible)	0 - 250	250 - 500	500 - 1000	1000 - 5000	> 5000

**Cuadro 2.** Valores estándares holandeses para evaluar la contaminación de suelos, en términos de concentración total de metales pesados.

Elemento	Suelo estándar	
	Valor (A) de referencia	Valor (C) de intervención <sup>1</sup>
	mg kg <sup>-1</sup> de suelo	
Arsénico	29	55
Cadmio	0,8	12
Cromo	100	380
Cobalto	20	240
Cobre	36	190
Mercurio	0,3	10
Plomo	85	530
Molibdeno	10	200
Níquel	35	210
Cinc	140	720

Notas:

<sup>1</sup> Valor de intervención: indica contaminación severa de los suelos donde es necesario remediar

Para metales pesados, los valores de referencia e intervención son dependientes de la relación arcilla/limo y contenido de materia orgánica de los suelos. Los valores estándares deben ser modificados según la fórmula:

$$VIS = VISE (A + B \% \text{ arcilla/limo} + C \% \text{ materia orgánica}) / (A + 25 B + 10 C)$$

Donde: VIS = valores de intervención para un suelo particular.

VISE = valores de intervención para un suelo estándar (10% materia orgánica y 25% arcilla)

Valores de A, B y C usados para el cálculo del VIS de los elementos			
Elemento	A	B	C
Arsénico	154	0,4	0,
Cadmio	0,4	0,007	0,021
Cromo	50	2	0
Cobalto	2	0,28	0
Cobre	15	0,6	0,6
Mercurio	0,2	0,0034	0,0017
Plomo	50	1	1
Molibdeno	1	0	0
Níquel	10	1	0
Cinc	50	3	1,5

Ref.: Adaptado de: c:\ukqaa\steering committee info\environment agency and waste\code of practice & risk assessment \environmental testing and emerging uk and eu legislation november 2002.doc Page 1 of 1 Date printed: 30/01/03 13:32.

**Cuadro 3.** Calculo del valor de referencia de concentración de metales pesados en el suelo (Brion y Rosso, 1998)

Metal	Valor A
Cd	$0,4 + 0,007 (\text{Arc}^{\#} + 3 \text{MO}^{\#\#})$
Co	20
Cr	$50 + 2 \text{Arc}$
Cu	$15 + 0,6 (\text{Arc} + \text{MO})$
Ni	$10 + \text{Arc}$
Pb	$50 + \text{Arc} + \text{MO}$
Zn	$50 + 1,5 (2 \text{Arc} + \text{MO})$
<sup>#</sup> Arcilla menor a 0,002 mm (%)	
<sup>\#\#</sup> Materia orgánica (%)	

**Cuadro 4.** Límite máximo de metales pesados en el suelo, según Ley Federal Alemana (European Commission, 2001)

Tipo de ley	Tipo de suelo	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn
-----mg kg <sup>-1</sup> -----									
Ley protección de suelo <sup>1</sup>	Arcilloso (I)	20	100	1,5	100	60	70	1	200
	Limoso (II)	15	70	1	60	30	50	0,5	150
	Arenoso (I)	10	40	0,4	30	100	15	0,1	60
Ordenanza Lodos <sup>2</sup>	Suelos pH 5,5-7,0	-	100	1,5 (1)*	100	60	50	1	100 (150) <sup>#</sup>
LABO <sup>3</sup>	Arenoso	3	15	0,3	20	3	3	0,03	15
	Limoso	10	50	0,3	50	30	50	0,06	90
	Arcilloso	10	75	1	100	60	75	0,14	120

<sup>1</sup> Ordenanza BBoSchG/1999 (U.E, 2004);

<sup>2</sup> Ordenanza AbfKlärV/1992;

<sup>3</sup> Valores de referencia para reciclar compost

<sup>#</sup> Valores más bajo para suelos arenosos debido a su vulnerabilidad

**Cuadro 5.** Concentración máxima permitida de metales pesados totales en suelos agrícolas

País		Elemento (mg kg <sup>-1</sup> )								
		As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn	Cr
Chile <sup>1</sup>	Macrozona norte pH >6,5	20	2	150	1,5	112	75	4	175	n.n.
	Macrozona Norte pH < 6,5	12,5	1,25	100	1	50	50	3	120	n.n.
	Macrozona sur pH > 5	10	2	75	1	30	50	4	175	n.n.
U E <sup>2</sup>		n.n.	1-3	50-140	1-1,5	30-75	50-300	n.n.	150-300	100-150
	Francia	n.n.	2	100	1	50	100	n.n.	300	150
	Italia	n.n.	1,5	100	1	75	200	n.n.	300	-
	España	n.n.	0,4	40	0,3	30	40	n.n.	100-150	60
	Holanda <sup>3</sup> valor A	20	1	50	0,5	50	50	n.n.	200	100
	Holanda Valor B	30	5	100	2	100	150	n.n.	500	250
	Holanda valor C	50	20	500	10	500	600	n.n.	3000	800
Turquía <sup>4</sup>	Suelos pH > 5	n.n.	3	100	2	50	100	n.n.	300	100
Australia <sup>5</sup>	Suelos pH < 5	20	1	100	1	60	150	5	200	100
US <sup>6</sup>		n.n	20	750	8	210	150	n.n	1400	1500
Canada <sup>7</sup>	Suelos pH>6	14	1,6	100	0,5	32	60	1,6	220	20

<sup>1</sup> Norma lodos NCh2952c-2004 (INN, 2004); <sup>2</sup> Directiva 86/278/EEC (Marmo, 2003); <sup>4</sup> Ley ambiental 2878- 1983; <sup>5</sup> Norma Australian Standard AS 4454-1999 (ARMCANZ/ANZECC ,2000); <sup>6</sup> McGrath et al (1994); <sup>7</sup> Lovell et al., 1998.

**Cuadro 6.** Contenidos máximos de metales pesados totales permitidos en lodos aplicados en distintos suelos de Chile y otros países.

Metal	Chile <sup>1</sup>		UE <sup>2</sup>		U.S. E.P.A <sup>3</sup>			Australia <sup>4</sup>	
	Suelos aptitud frutal y/o forestal	Suelos degradados	Suelos pH<7	Suelos pH>7	Concentración	Tasa anual	Carga acumulada	Lodo C1	Lodo C2
	-----mg kg <sup>-1</sup> M.S.-----					kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	
As	20	40	n.n.	n.n.	75	2	41	20	60
Cd	8	40	20	40	85	1,9	39	3	20
Cu	1000	1200	1000	1750	4300	75	1500	100	2500
Hg	10	20	16	25	840	15	300	1	15
Ni	80	420	300	400	75	0,90	18	60	270
Pb	300	400	750	1200	420	21	420	150	420
Se	50	100	n.n.	n.n.	100	5	100	3	50
Zn	2000	2800	2500	4000	7500	140	2800	200	2500
Cr	n.n.	n.n.	1000	1500	3000	150	3000	100	500
Mo	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	57	0,85	17	n.n.	n.n.

<sup>1</sup> Norma lodos Nch2952c -2004 (INN,2004); <sup>2</sup>Directiva 86/278/EEC (marmo,2003); <sup>3</sup> Norma 503 - 40 CFR/1993 (US EPA, 1993); <sup>4</sup> Norma Australian Standard AS 4454-1999 (ARMCANZ/ANZECC ,2000).

**Cuadro 7.** Contenido máximo permitido de metales pesados totales en compost de Chile y otros países.

Metal	Chile <sup>1</sup>			Alemania	Austria <sup>2</sup>			Holanda <sup>3</sup>	Australia <sup>5</sup>	U.S. E.P.A. <sup>6</sup>
	Compost	Compost de Lodo	Compost orgánico	Compost	Clase I	Clase II	Clase III	Compost alta calidad	EPA-Victoria	Compost y biosolidos
	mg kg <sup>-1</sup> M.S.									
As	15	40	10	n.n	n.n	n.n	n.n	n.n	20	41
Cd	2	8	1	1,5	0,7	1	4	< 0,7	3	39
Cu	100	1000	50	100	70	100	400	< 25	60	1500
Cr	120	600	60	100	70	70	150	< 50	50	
Hg	1	4	1	1	0,7	1	4	< 0,2	1	
Ni	20	80	10	50	42	60	100	< 10	60	420
Pb	100	300	50	150	70	150	500	< 65	150	300
Zn	200	2000	60	400	210	400	1000	< 75	200	2800

<sup>1</sup> Nch2880-2004; <sup>2</sup> Valor límite para compost ONORM S 2200; <sup>3</sup> Estándares de calidad de acuerdo al decreto y a la ley de fertilizantes;

<sup>5</sup> EPA-Victoria 1996; <sup>6</sup> EPA CFR 40/503 Sludge rule

**Cuadro 8.** Indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad del suelo en zonas de relevancia y tiempo requerido para el cambio.

Propiedades del suelo	Zonas donde el parámetro es relevante	Tiempo requerido para percibir cambios
<b>Físicas</b>		
Textura	Todas	>10 <sup>3</sup> años
Estructura: tipo, tamaño, grado	ZN <sup>1</sup> , ZCR	>10 años
Estabilidad estructural: diámetro ponderado medio (erodabilidad)	ZSCCC, ZCR, ZSICCS	<2 años
Profundidad efectiva	Todas	2-10 años
Velocidad de infiltración estabilizada	Todas	<1 año
Retención de agua (humedad aprovechable)	Todas	<1 año
Resistencia a la penetración	Todas	<1año
Capacidad de aire del suelo (Aireación)	ZCR, ZHS	< 2 años
Densidad Aparente	Todas	< 2 años
<b>Químicas</b>		
Carbono orgánico del suelo (COS)	Todas	>5 años
Relación C/N	Todas	2-5 años
NPK disponible	Todas	<2 años
Disponibilidad de metales pesados <sup>#</sup>	Todas	
Reacción del suelo (pH)	Todas	> 5 años
Conductividad eléctrica (CE)	ZN, ZCR	< 2 años
Razón de adsorción de sodio: RAS	ZN, ZCR	< 2años
Aluminio intercambiable	Todas, si pH < 5,6	meses
Capacidad de intercambio catiónico	Todas	0 – 10 años
<b>Biológicas</b>		
Biomasa microbiana: C biomásico, N biomásico	Todas	<1 año
Respiración: evolución del CO <sub>2</sub>	Todas	< 1 año
Mesofauna: Lombrices (diversidad, cantidad y biomasa)	Todas	< 2 años
Act. deshidrogenasa	Todas	< 1 año

<sup>1</sup> **ZN** = Zona Norte; **ZCR**: Central de Riego ;**ZSCCC** = Secano de la Cordillera de la Costa de Chile Central; **ZSICCS**: Zona del Secano Interior de la Cordillera de la Costa Sur; **ZHS**: Zona húmeda del Sur.



**Cuadro 9.** Grupos de metales pesados y metaloides según adsorción, fototoxicidad y riesgo para la cadena alimentaria.

Grupo	Metal	Adsorción en el suelo	Fitotoxicidad	Riesgo para la cadena alimentaria
1	Ag, Cr, Sn, Ti, Y y Zr	Baja solubilidad y fuerte retención en el suelo	Baja	Bajo riesgo, porque ellos son tomados en menor grado por las plantas
2	As, Hg y Pb	Adsorbidos fuertemente por los coloides del suelo	La plantas pueden adsorberlos pero no trastocarlos a los tallos o generalmente no son fitotóxicos excepto a concentraciones muy altas	Causa mínimos riesgos para la cadena alimentaria humana
3	B, Cu, Mn, Mo, Ni y Zn	Menos fuertemente adsorbido al suelo comparado con los grupos 1 y 2	Fácilmente tomados por las plantas, son fitotóxicos a concentraciones que causan bajo riesgo a la salud humana	Conceptualmente la barrera “suelo-planta” protege a la cadena alimentaria de estos elementos
4	Cd, Co, y Se	Menor grado adsorción al suelo en relación a los otros metales	Causan riesgo en la salud humana o animal a concentraciones en el tejido de la planta que generalmente no son fitotóxicas	Existe bioacumulación a través de la cadena alimentaria suelo-planta-animal

Fuente (Chaney 1980)

**Cuadro 10.** Indicadores de calidad del suelo zona norte

Indicadores	Typic Torrifluvent	Vertic Haplocambid	Typic Torriorthent
<b>Físicos</b>			
Textura	X	X	X
Estructura		X	
Prof. Efectiva	X	X	X
VIE <sup>#</sup>	X	X	X
Humedad aprovechable	X	X	X
Resistencia a la penetración	X	X	X
Densidad aparente	X	X	X
<b>Químicos</b>			
Carbono orgánico	X	X	X
Relación C/N	X	X	X
NPK disponible	X	X	X
pH	X	X	X
CIC	X	X	X
Conductividad eléctrica	X	X	X
Razón de adsorción de sodio	X	X	X
<b>Biológicos</b>			
Biomasa microbiana	X	X	X
Respiración: CO <sub>2</sub>	X	X	X
Lombrices	X	X	X
Act. Deshidrogenasa	X	X	X
<sup>#</sup> Velocidad de infiltración estabilizada			
<sup>##</sup> Capacidad de intercambio catiónico			

**Cuadro 11.** Indicadores de calidad del suelo zona Secano de la Cordillera de la Costa de Chile Central

Indicadores	Ultic Haploxeralf	Typic Rhodoxeralf	Ultic Argixeroll
<b>Físicos</b>			
Textura	X	X	X
DPM <sup>#</sup>	X	X	
Prof. Efectiva	X	X	X
VIE <sup>##</sup>	X	X	X
Humedad aprovechable	X	X	X
Resistencia a la penetración	X	X	X
Densidad aparente	X	X	X
<b>Químicos</b>			
Carbono orgánico	X	X	X
Relación C/N	X	X	X
NPK disponible	X	X	X
pH	X	X	X
Aluminio intercambiable	X	X	
CIC <sup>###</sup>	X	X	X
<b>Biológicos</b>			
Biomasa microbiana	X	X	X
Respiración: CO <sub>2</sub>	X	X	X
Lombrices	X	X	X
Act. Deshidrogenasa	X	X	X
<sup>#</sup> DPM			
<sup>##</sup> Velocidad de infiltración estabilizada			
<sup>###</sup> Capacidad de intercambio catiónico			

**Cuadro 12.** Indicadores de calidad del suelo zona Central de riego.

Indicadores	Entic Haploxeroll	Typic Melanoxerand	Leptic Haploxerert	Halic Haploxerert
<b>Físicos</b>				
Textura	X	X	X	X
Estructura			X	X
DPM <sup>#</sup>	X	X		
Prof. Efectiva	X	X	X	X
VIE <sup>##</sup>	X	X	X	X
Humedad aprovechable	X	X	X	X
Resistencia a la penetración	X	X	X	X
Densidad aparente	X	X	X	X
Aireación			X	X
<b>Químicos</b>				
Carbono orgánico		X	X	X
Relación C/N		X	X	X
NPK disponible		X	X	X
CIC <sup>###</sup>	X	X	X	X
pH		X	X	X
Conductividad eléctrica			X	X
Razón de adsorción de sodio			X	X
<b>Biológicos</b>				
Biomasa microbiana		X	X	X
Respiración: CO <sub>2</sub>		X	X	X
Lombrices		X	X	X
Act. Deshidrogenasa		X	X	X
<sup>#</sup> Velocidad de infiltración estabilizada				
<sup>##</sup> Capacidad de intercambio catiónico				
<sup>###</sup> Capacidad de intercambio catiónico				

**Cuadro 13.** Indicadores de calidad del suelo zona de la Precordillera centro-sur y Zona del Secano Interior de la Cordillera de la Costa Sur.

Indicadores	Typic Haploxerand	Xeric Palehumult
<b>Físicos</b>		
Textura	X	X
DPM <sup>#</sup>		X
Prof. Efectiva	X	X
VIE <sup>##</sup>	X	X
Humedad aprovechable	X	X
Resistencia a la penetración	X	X
Densidad aparente	X	X
<b>Químicos</b>		
Carbono orgánico	X	X
Relación C/N	X	X
NPK disponible	X	X
CIC <sup>###</sup>	X	X
pH	X	X
Aluminio intercambiable	X	X
<b>Biológicos</b>		
Biomasa microbiana	X	X
Respiración: CO <sub>2</sub>	X	X
Lombrices	X	X
Act. Deshidrogenasa	X	X
<sup>#</sup> Velocidad de infiltración estabilizada		
<sup>##</sup> Capacidad de intercambio catiónico		
<sup>###</sup> Capacidad de intercambio catiónico		

**Cuadro 14.** Indicadores de calidad del suelo zona húmeda del Sur.

Indicadores	Hydric Hapludand	Typic Hapludand	Typic Placudand
<b>Físicos</b>			
Textura	X	X	X
Prof. Efectiva	X	X	X
VIE <sup>##</sup>	X	X	X
Humedad aprovechable	X	X	X
Resistencia a la penetración	X	X	X
Densidad aparente	X	X	X
Aireación			X
<b>Químicos</b>			
Carbono orgánico	X	X	X
Relación C/N	X	X	X
NPK disponible	X	X	X
pH	X	X	X
Aluminio intercambiable	X	X	X
CIC <sup>###</sup>	X	X	X
<b>Biológicos</b>			
Biomasa microbiana	X	X	X
Respiración: CO <sub>2</sub>	X	X	X
Lombrices	X	X	X
Act. Deshidrogenasa	X	X	X
<sup>#</sup> DPM			
<sup>##</sup> Velocidad de infiltración estabilizada			
<sup>###</sup> Capacidad de intercambio catiónico			

**Cuadro 15.** Metales pesados importantes como indicadores químicos de calidad del suelo, según zona agroecológica (El criterio considerado para la elaboración del cuadro 8 fue el pH, textura, drenaje y contenido de materia orgánica de los perfiles de suelo utilizados).

Metal	Zona agroecológica donde el parámetro puede ser relevante
Cromo	ZSICCS, ZHS, más IM <sup>1</sup>
Manganeso	ZN <sup>2</sup> , ZPCS, ZSICCS, ZHS
Níquel	ZPCS, ZSICCS, ZHS
Cobre	ZSCCC, ZCR, más IM
Cinc	ZSCCC, ZCR, ZPCS, ZSICCS, ZHS, más IM
Arsénico <sup>2</sup>	ZN, ZCR, más IM
Selenio <sup>2</sup>	ZN, Todas
Molibdeno	ZN, ZCR, más IM
Cadmio	Todas, más IM
Mercurio	Todas, más IM
Plomo	Todas, más IM y urbanas

<sup>1</sup> **IM:** localidades afectadas por la industria metalúrgica y la minería

<sup>2</sup> **ZN:** zona Norte; **ZPCS:** zona de la Precordillera Centro-Sur; **ZSICCS:** zona del Secano Interior de la Cordillera de la Costa Sur, **ZHS:** zona húmeda del Sur; **ZSCCC:** zona Secano de la Cordillera de la Costa de Chile Central; **ZCR:** zona central de riego; **U:** zonas Urbanas.

<sup>3</sup> Metaloides

**Cuadro 16.** Importancia potencial de los metales pesados en perfiles típicos de la Zona Norte.

Metal	Typic Torrifluvent	Vertic Haplocambid	Typic Torriorthent
Cromo (VI)	Baja	Media	Baja
Manganeso	Baja	Alta	Media
Níquel	Baja	Baja	Baja
Cobre	Media	Baja	-
Cinc	Media	Baja	-
Arsénico <sup>#</sup>	Alta	Media	Media
Selenio <sup>#</sup>	Alta	Media	Media
Molibdeno	Alta	Media	Media
Cadmio	Baja	Baja	Baja
Mercurio	Baja	Baja	Baja
Plomo	Baja	Baja	Baja

<sup>#</sup> Metaloides

**Cuadro 17.** Importancia potencial de los metales pesados en suelos de la Zona Secano de la Cordillera de la Costa de Chile Central

Metal	Ultic Haploxeralf	Typic Rhodoxeralf	Ultic Argixeroll
Cromo (VI)	Baja	Media	Baja
Manganeso	Baja	Baja	Baja
Níquel	Baja	Baja	Baja
Cobre	Media	Media	Media
Cinc	Media	Media	Media
Arsénico	Baja	Baja	Baja
Selenio	Baja	Baja	Baja
Molibdeno	Baja	Baja	Baja
Cadmio	Media	Media	Baja
Mercurio	-	-	-
Plomo	Baja	Media	Baja



**Cuadro 18.** Importancia potencial de los metales pesados en suelos de la Zona central de riego.

Metal	Entic Haploxeroll	Typic Melanoxerand	Leptic Haploxerert	Halic Haploxerert
Cromo (VI)	Baja	Baja	Baja	Media
Manganeso	Baja	Media	Media	Baja
Níquel	Baja	Baja	Baja	Baja
Cobre	Media	Media	Baja	Baja
Cinc	Media	Media	Baja	Baja
Arsénico	Baja	Baja	Baja	Media
Selenio	Baja	Baja	Media	Media
Molibdeno	Baja	Baja	Media	Alta
Cadmio	Media	Media	Baja	Baja
Mercurio	-	-	-	Baja
Plomo	Baja	Media	Baja	Baja

**Cuadro 19.** Importancia potencial de los metales pesados en suelos de las Zonas Precordillera Centro Sur y Secano Interior de la Cordillera de la Costa Sur.

Metal	Typic Haploxerand	Xeric Palehumult
Cromo (VI)	Baja	Media
Manganeso	Baja	Media
Níquel	Baja	Media
Cobre	Media	Baja
Cinc	Media	Baja
Arsénico	Baja	Baja
Selenio	Baja	Baja
Molibdeno	Baja	Baja
Cadmio	Media	Alta
Mercurio	-	-
Plomo	Media	Alta

**Cuadro 20.** Importancia potencial de los metales pesados en suelos de la Zona húmeda del Sur.

Metal	Hydric Hapludand	Typic Hapludand	Typic Placudand
Cromo (VI)	Media	Media	Alta
Manganeso	Media	Media	Alta
Níquel	Media	Media	Alta
Cobre	Baja	Baja	Baja
Cinc	Baja	Baja	Baja
Arsénico	Baja	Baja	Baja
Selenio	Baja	Baja	Baja
Molibdeno	Baja	Baja	Baja
Cadmio	Alta	Alta	Baja
Mercurio	-	-	-
Plomo	Media	Media	Media

**Cuadro 21.** Concentración máxima tolerable de metales pesados en distintos tipos de cultivos agrícolas de consumo regular

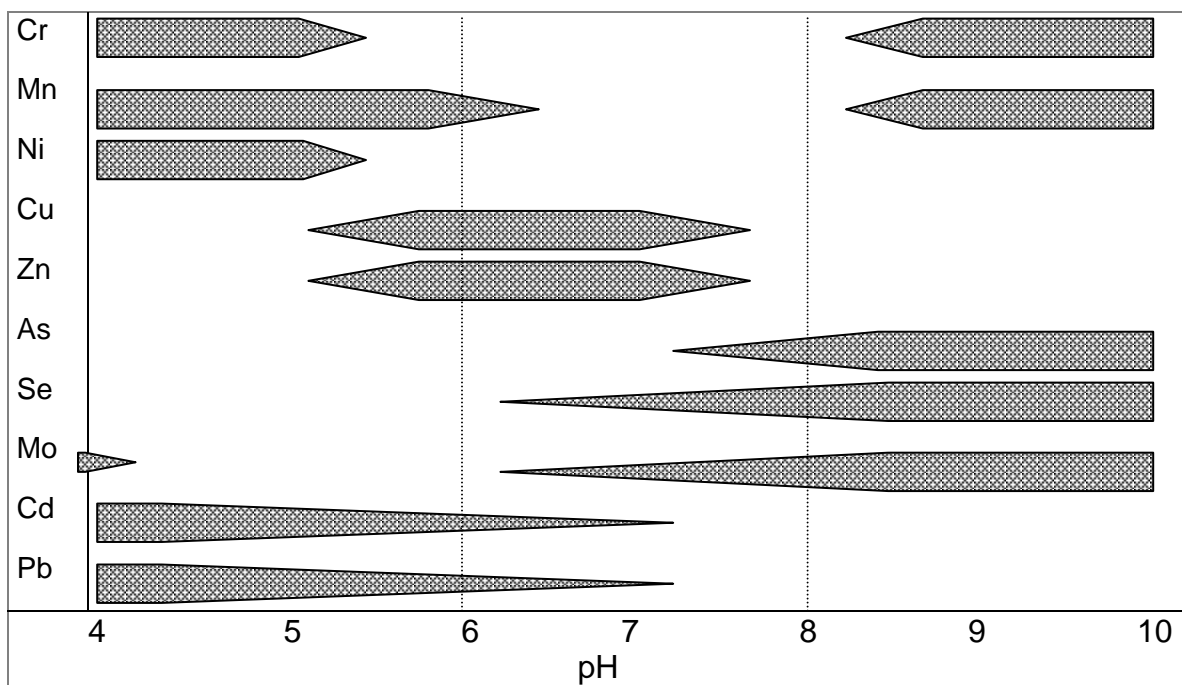
Elemento	Concentración máxima tolerable en cultivos agrícolas	Cultivo					
		Granos			Tubérculos	Raíz	Hojas
		Trigo	Maíz	Arroz	Papa	Zanahoria	Lechuga
----- mg kg <sup>-1</sup> . peso seco -----							
Cromo	2	0,2	-	-	0,02	1,5 <sup>##</sup>	1,5 <sup>##</sup>
Manganeso	300	105,0	4,0	40,0	15,0	30,0	30,0
Níquel	1 - 10	0,7	0,4	1,2	1	1	1,8
Cobre	5 - 20	10,3	2,1	5,1	6,6	8,4	8,1
Cinc	50 – 100	47,0	36,0	28,0	26,0	27,0	73,0
Arsénico	0,1 – 1,0	0,01	0,4	0,2	0,2	0,08	0,25
Selenio	1,0 - 5	0,430	-	-	0,011	0,064	0,057
Molibdeno	0,2 - 5 <sup>#</sup>	1,1	0,18	3,05	0,25	0,04	0,07
Cadmio	0,05 – 0,5	0,35	0,1	0,23	1,05	1,73	0,66
Mercurio	0,05 – 0,5	0,033	0,0046	-	0,047	0,086	0,0083
Plomo	0,5 - 10	1,0	3,0	0,07	3,0	3,0	3,6

<sup>#</sup> Valor suficiente o normal en la planta, <sup>##</sup> Peso de las cenizas.

Los valores máximos en cultivos agrícolas corresponden a la cantidad (mg **metal** kg<sup>-1</sup> masa seca vegetal consumida) bajo la cual no hay riesgo para la salud humana por ingesta directa.

**Cuadro 22.** Metales pesados de posible riesgo, según biodisponibilidad, para algunos cultivos en suelos de las diferentes zonas agroecológicas.

Zona agroecológica	Suelo	Metales según cultivo					
		Trigo	Maíz	Arroz	Papa	Zanahoria	Lechuga
Norte	Typic Torrifluvent	Cu, Mo	As	Cu, As	Cu, As, Mo	Cu	As, Cu, Zn
	Vertic Haplocambid	Mo	As	Mo, As	As, Mo		As
	Typic Torriorthent	Mo	As	Mo,As	As, Mo		As
Secano de la Cordillera de la Costa de Chile Central	Ultic Haploxeralf	Cd, Cu	Cd	Cu, Cd	Cu, Cd	Cd, Cu	Cd, Cu, Zn
	Typic Rhodoxeralf	Cd, Cu, Pb	Cd, Pb	Cu, Cd	Cu, Cd, Pb	Cd, Cu, Pb	Cd, Cu, Pb, Zn
	Ultic Argixeroll	Cu		Cu	Cu	Cu	Cu, Cd, Zn
Central de riego	Entic Haploxeroll	Cd, Cu	Cd	Cu	Cu, Cd	Cu, Cd	Cu, Cd, Zn
	Typic Melanoxerand	Cd, Cu, Pb	Cd, Pb	Cu	Cu, Cd, Pb	Cu, Cd, Pb	Cu, Cd, Pb, Zn
	Leptic Haploxerert			Mo	Mo		
	Halic Haploxerert			Mo	Mo		
Precordillera centro sur	Typic Haploxerand	Cd, Cu, Pb	Cd, Pb	Cu	Cu, Cd, Pb	Cu, Cd, Pb	Cu, Cd, Pb, Zn
Secano interior de la Cordillera de la Costa Sur	Xeric Palehumult	Cd, Pb	Cd, Pb	Ni	Cd, Pb, Ni	Cd, Pb, Ni	Cd, Pb, Mn, Ni
Húmeda del sur	Hydric Hapludand	Cd, Pb	Cd, Pb	Ni	Cd, Pb, Ni	Cd, Pb, Ni	Cd, Pb, Mn, Ni
	Typic Hapludand	Cd, Pb	Cd, Pb	Ni	Cd, Pb, Ni	Cd, Pb, Ni	Cd, Pb, Mn, Ni
	Typic Placudand	Pb	Pb	Ni	Pb, Ni	Pb, Ni	Pb, Mn, Ni



**Figura 1.** Rango de disponibilidad de algunos elementos traza

## 6. LITERATURA CITADA

Anh J. And Kim, K.W. 2004. Environmental assessment of contamination soil around abandoned mines using the current soil quality standards. Journal environmental policy. [www.kei.re.kr/files/journal/sub/05\\_02\\_05.pdf](http://www.kei.re.kr/files/journal/sub/05_02_05.pdf)

ARMCANZ/ANZECC ,2000 .Guidelines for Direct Land Application of Biosolids and Biosolids Products. Australia.

Astier-Calderón M., Maass-Moreno M y Etchevers-Barra J. 2002. Derivación de indicadores de calidad del suelos en el contexto de la agricultura sustentable. Agrociencia 36: 605-620.

Bannick, C.G., Bachmann, G., and Dreher, P. (1998) Soil Values for the application of organic waste to agricultural land and the recycling of mineral waste, Land Contamination and Reclamation, 6,2, 103-106.

Basta N.T. 2004. Heavy metal and trace element chemistry in residual-Treated soil: Implications on metal bioavailability and sustainable land application. In: Sustainable land application Conference, January, 4-8, Florida; University of Florida.

Bautista, C.A., J. Etchevers, R.F. del Castillo y C. Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. Ecosistemas 2004/2 [http://www.aeet.org/ecosistemas/042/revisión2.htm]

Brady, N.C. and R. Weil. 2002. The nature and properties of soils. Thirteenth Edition. Prentice Hall, New Jersey, USA. 960 p.

Brejeda, J.J. and T.B. Moorman. 2001. Identification and interpretation of regional soil quality factors for the Central High Plains of the Midwestern USA. In D.E Stott. R.H. Mohtar and G.C. Steinhardt (eds). Sustaining the Global Farm. 535-540 p.

Brion, J. Y Rosso, M. 1998. Impacto de los Sitios Contaminados. Argentina. [www.ingenieroambiental.com](http://www.ingenieroambiental.com)

Cathcart, J. 2004. Soil Quality Indicators: A Review With Implications For Agricultural Ecosystems In Alberta : Indicators of Soil/Land Quality – Examples. Alberta Government. [WWW.agric.gov.ca](http://WWW.agric.gov.ca)

- Chaney, R. L. 1980. Health risks associated with toxic metals in municipal sludge. *In* G. Bitton, D. L. Damro, G. T. Davidson and J. M. Davidson, eds. Sludge - Health risks of land application. pp. 59-83. Ann Arbor Sci.
- Chen Z.S. 2000. Relationship between heavy metal concentrations in soils of Taiwan and uptake by crops. En línea en <http://www.fftc.agnet.org/library/article/tb149.html> Food and fertilizer technology center.
- Comisión de las Cominidades Europeas (CCE), 2002 .Hacia una estrategia temática para la protección del suelo [www.europarl.eu.in](http://www.europarl.eu.in)
- Connell, Does W. 1997. Basic concepts in environmental chemistry. Lewis Publishers, NY, USA. 506 P.
- Council of the European Communities (1986) Council Directive on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture 86/278/EEC. Official Journal of the European Communities, 4.7.86 No L181/6-12.
- Elliot, H.A. and G.A. Shields. 1988. Comparative evaluation of residual and total metal analysis in polluted soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:1907-1917.
- European Commission. 2001. Survey of wastes spread on land. Appendix F Germany <http://europa.eu.int/comm/environment/pubs/home.htm>
- EUROPEAN COMMISSION (E.C.). 2003. Disposal and recycling routes for sewage sludge-Part .[En línea] Unión Europea. (consultado el 7 de Septiembre de 2004) [http://europa.eu.int/comm/environment/waste/sludge/sludge\\_disposal2.pdf](http://europa.eu.int/comm/environment/waste/sludge/sludge_disposal2.pdf)
- FAO, 1995. Planning for sustainable use of land resources: towards a new approach . *In*: Sombroek, W.G., Simms, D.(Eds). Land and Water bullentin No. 2 FAO, Rome.
- González M., S. 1994. Capítulo 11. Estado de la conservación de suelos en Chile. En: CONAMA (ed.). Perfil Ambiental de Chile. Secretaría Técnica, CONAMA, Santiago. pp. 199-234.
- Hünemeyer, J.A., De Camino, R. y Müller, S. 1997. Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. San José, Costa Rica.

INN (Instituto nacional de normalización) 2004 Norma Uso de Lodos y Norma chilena Compost- Clasificación y requisitos. [www.inn.cl](http://www.inn.cl)

John, D.A. and Leventhal, J.S. 1995. Bioavailability of metals. *In*: Du Bray Ed. Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models, Denver, Colorado.U.S. Departament of interior. U.S. Geological Survery (U.S.G.S) <http://pubs.usg.gov/of/1995/>

Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris, and G.E. Schuman. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4–10.

Lacstusu, R. 1998. Appraising levels of soil contamination y pollution with heavy metals. European soil bureau. Research report N° 4 p393-399.

Larson, W.E. and E.J. Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. Pp 175-203. *In*: J. Dumanski *et al.* (eds.). Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World. Volume 2: Technical Papers. Proceedings of the International Workshop, Chiang Rai, Thailand. Sept. 15-21, 1991. International Board for soil Resource Management, Bangkok, Thailand.

Lasat M. 2001. The uses of plants for removal of toxic metal from contaminated soil. US-EPA

Letey J; Sojka, R.; Upchurch, D.;Cassel D.; Olson, K.; Payne, W.; Petrie, S.; Price, G.; Reginato, R.; Scott, H.; Smethurst, and Triplett, G. 2003. Deficiencies in the soil quality concept and its application. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58: 4 p180-187.

Lovell, B.; Toombs, M.; Blackie, M. and Schleihau, J. 1998. Title:Land Application Of Sewage Biosolids For Crop Production <http://www.gov.on.ca:80/OMAFRA/english/environment/facts/95-069.htm>

Ma, L.Q. and G. Rao.1997. Chemical fractionation of cadmium, copper, nickel, and zinc in contaminated soils. *J. Environ. Qual.*, 26:259-264.



Marmo I. 2003. Heavy metals in the context of EU policies on soil and waste. European Commission, DG Environment [www.europa.eu.int](http://www.europa.eu.int)

McGrath, S., Chang, A.C., Page, A.L., and Witter, E. 1994. Land application of sewage sludge: scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and United States. *Environment rev.* 2, 108.

Masera, O. R, M. Astier, y S. López Ridaura. 1999. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS. GIRA. Mundi-Prensa e Instituto de Ecología-UNAM, México. 109 p.

National Resource Conservation Soil (NRCS, 2004). What is soil quality?. United States Department Agriculture. [[http://soils.usda.gov/sqi/soil\\_quality/what\\_is/](http://soils.usda.gov/sqi/soil_quality/what_is/)]. Visitado el 2/12/04.

Perez, J. 2001. Repercusiones del futuro decreto real de suelos contaminados. VII Congreso nacional de medio ambiente 25- noviembre 2004.

Piersynski, G. M., Sims, J.T., and Vance, G.F., 2000. Soils and environmental quality. Second edition. CRC Press Boca Raton, London New York. Washington, D. C. 459p.

Riechman M.S. 2002. The responses of plants to metals toxicity: A review focusing on copper, manganese and zinc. Australian Minerals and Energy Environment Foundation 54p.

Rieuwerts J.S., Thornton I., Farago M.E and Ashmore M.R. 1998. Factors influencing metals bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 10(2): 61-75.

Silveira M.L.A., Alleoni L.R.F. and Guilherme L.R.G. 2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola* 60 (4): 793-806.

Sims, J.T., and J.S. Kline. 1991. Chemical fractionation and plant uptake of heavy metals in soils amended with co-composted sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 20:387-395.

Spiegel H. 2002. Trace element accumulation in selected bioindicators exposed to emissions along the industrial facilities of Danube Lowland. Turk. Journal Chemistry. 26: 815-823.

Union Europea (UE). 2004. [www.europarl.eu.int](http://www.europarl.eu.int)

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). 1993. Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge (40 Code of Federal Regulations Part 503). Washington, D.C., U.S. Environmental Protection Agency.

Von Sothen, F. 2001. The heavy metal input on farmland: an indicator for a sustainable agriculture system. In: Seminar on sustainable agriculture in central and eastern european countries: The environmental effects of transition and needs for change. Nitra/Slovakia, 10-16 September.

Wander, M. M., Water, G. L., Nissen, T. M., Bollero, G. A. M., Andrews, S. S. and Cavanaugh-Grant, D. A. 2002. Soil quality and process. Agronomy Journal 94: 23-32.