



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas**  
**Departamento de Química Inorgánica y Analítica**  
**Laboratorio de Química y Bioquímica de Suelos**

**EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE NUTRIENTES  
Y CONTAMINANTES EN SUELOS Y SUELOS  
ADICIONADOS DE BIOSÓLIDOS Y COMPOST**

**Memoria para Optar al Título de Químico**

**Marcela Andrea Guerrero Langenegger**

**Profesor Patrocinante**

María Silvia Aguilera Santelices

**Profesoras Directoras**

María Silvia Aguilera Santelices

Gilda Valeria Borie Biagini

Santiago, Chile  
2005

A mi amada familia, con todo mi corazón por su apoyo incondicional y a Gonzalo por acompañarme con su amor durante este largo proceso.

Por su disposición, amabilidad y apoyo a mis profesores Gilda Borie, Maria Aguilera y Pedro Peirano. A todo el grupo humano que rodea el Laboratorio de Química y Bioquímica de Suelos y a mis compañeros de carrera.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>Resumen</b> .....	1
<b>Summary</b> .....	3
<b>I. Introducción</b> .....	5
<b>II. Objetivos</b> .....	12
<b>III. Metodología</b>	
<b>3.1 Toma y tratamiento de muestras</b> .....	13
<b>3.2 Preparación de las muestras</b> .....	14
<b>3.3 Caracterización de las muestras</b> .....	15
<b>IV. Análisis y Discusión de los resultados</b>	
<b>4.1 Caracterización de Residuos Lodos y Compost</b> .....	17
<b>4.1.1 Caracterización de Suelos Experiencia en terreno e Incubados</b> ....	20
<b>4.2 Efectos de la adición de lodos y compost en el contenido de macro y micro elementos en suelos en experiencia en terreno e incubados</b>	
<b>4.2.1 Caracterización del contenido de metales en Lodos y Compost</b> ....	23
<b>4.2.2 Contenido de metales totales en Experiencia en Terreno</b> .....	24
<b>4.2.3 Contenido de metales totales en Suelos Incubados</b> .....	35
<b>4.3 Efectos de la adición de lodos y compost en el contenido de metales solubles en incubaciones</b>	
<b>4.3.1 Contenido de metales solubles en agua y tiempo de incubación</b> ..	45
<b>4.3.2 Contenido de metales solubles en acetato de amonio y bicarbonato de sodio de los suelos incubados</b> .....	50
<b>Conclusiones</b> .....	53
<b>Bibliografía</b> .....	55
<b>Anexos</b> .....	59

## RESUMEN

Al igual que la mayoría de los países del mundo, en Chile los biosólidos son un desafío. Mejores condiciones sanitarias para la población requieren una gestión aún más rigurosa de estos residuos. Producto de ello, la disposición final de éstos se transforma en una problemática. Una de las posibles vías de solución es la utilización de los lodos sanitarios, adicionados como lodos propiamente tal o formando parte del compost en plantaciones forestales, ya que éstos tienen la capacidad de agregar nutrientes y materia orgánica a los suelos en donde se apliquen.

Para ello se ha tomado como área en estudio suelos forestales de bosques chilenos y mezclas de suelos forestales correspondientes a cada una de las regiones en estudio del país: V, VI y VII. Estas mezclas fueron incubadas en laboratorio a 25 °C por 8 meses con lodos y compost, en dosis equivalentes a 400 y 800 mg/kg de N, correspondientes a una aplicación de 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> respectivamente.

Las muestras de suelos, lodos, compost, suelo-lodo y suelo-compost fueron caracterizadas, estudiándose además el impacto de la incorporación de biosólidos en suelos forestales en una experiencia en terreno. En forma paralela se incubaron en laboratorio suelos forestales (sin aplicación alguna) con biosólidos y compost. Se determinó el contenido total de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg) y contaminantes (Cu, Pb, Zn, Cd, Ni, Fe, Mn) en los suelos de la experiencia en terreno y en las mezclas incubadas. También se estudió la extractabilidad de los metales de los suelos incubados en tres extractantes distintos: Acetato de Amonio 1M a pH 7.0, Bicarbonato ácido de sodio 0.5 M a pH 8.5 y Agua destilada; realizándose con éste último tres extracciones durante distintos períodos de las incubaciones: 1 mes, 3 meses y 8 meses a partir del inicio de éstas.

Las mezclas de suelos incubadas con lodo y compost presentan pHs que oscilan entre 4.5 y 5.5, siendo la acidez mayor para las dosis más altas de aplicación. En los suelos en terreno el pH oscila entre 5.2 y 6.37 para Jaururo, mientras que para San Pedro lo hace entre 4.65 y 5.89, aumentando el pH a medida que aumentaba la profundidad de los horizontes.

En la experiencia en terreno los valores de los índices de concentración de macro y micro elementos no reflejan la cantidad de material orgánico incorporado a los suelos por parte de las dosis 15 y 30 Ton de nitrógeno por hectárea, atribuyendo probablemente dicha situación al terreno mismo, un sistema natural altamente variable, que no permite concluir con certeza que hubo un aumento real en la concentración de los elementos como resultado de una aplicación directa.

El comportamiento general en los índices de metales pesados en ambas incubaciones, lodos y compost, es a incrementar levemente estos valores en las mezclas de suelos, a partir de un nivel basal testigo, comparado con las dosis aplicadas 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup>. Sin embargo, este incremento no es notorio en base a la diferencia de los valores de dichas dosis. En todos los casos los niveles de concentración están por debajo de las normas ambientales establecidas. La solubilidad de los suelos en agua, medida en tres períodos distintos disminuye a medida que transcurre el tiempo de incubación, lo que estaría evidenciando que la capacidad de retención de metales y estructura misma de los suelos esta mejorando. En el caso de los otros extractantes, bicarbonato y acetato, que a pesar de poseer una fuerza de extracción superior que el agua, tampoco extraen del suelo en forma notoria los elementos metálicos.

Todo esto ayudaría a afirmar que el uso de lodos y compost, como mejoradores, es beneficioso para los suelos y constituye una salida útil a un problema de disposición final de los residuos generados en la plantas de tratamientos de aguas servidas.

## SUMMARY

### **Evaluation of the nutrient and contaminant contents in soils and added soils with biosolids and compost.**

Like in the majority of the world's countries, the biosolids are a challenge in Chile. Better hygienic conditions for the population require an even more rigorous management of these residues. As a result, their final physical location becomes a problem. One of the possible solutions is to use added sewage sludges as sludges or forming part of the compost in forest plantations, since they have the capacity to add nutrients and organic matter to the soil wherever they are applied.

For that, forest soils of Chilean woods and mixtures of forest soils have been taken as research areas which correspond to every region of the country researched: V, VI and VII regions. These mixtures were incubated in a laboratory at 25°C for 8 months with sludges and compost in equivalent doses of 400 and 800 ppm of N which correspond to an application of 15 and 30 ton ha<sup>-1</sup> respectively.

The samples of soils, sludges, compost, soil-sludge and soil-compost were characterized and also the impact of the addition of biosolids on forest soils were studied in the field. At the same time, forest soils were incubated in a laboratory (without any application) with biosolids and compost. The total content of nutrients (N, P, K, Ca, Mg) and contaminants (Cu, Pb, Zn, Cd, Ni, Fe, Mn) on soils studied in the field and in the incubated mixtures were determined. Also, the extractability of the incubated soils in three different solutions were studied: 1M to pH 7.0 of ammonium acetate; 0.5M to pH 8.5 of acid bicarbonate of sodium and distilled water from which three extractions were made during the different incubation periods: 1 month, 3 months and 8 months from the beginning of these incubations.

The mixtures of the soils incubated with sludge and compost show pHs between 4.5 and 5.5 being the highest acidity for the highest doses of the application. In the fields the pH goes between 5.2 and 6.37 for Jaururo, and between 4.65 and 5.89 for San Pedro increasing the pH as the depth of the segments increase too.

The study done in the field, the concentration rate of macro and micro elements does not reflect the quantity of organic matter incorporated by the doses of 15 and 30 Ton of N per hectare to the soil, probably due to the field itself, a natural

system highly variable which does not permit to conclude with certainty that there was an actual increase in the concentration of the elements as a result of a straight application.

In both incubations, sludges and compost, the general behaviour in the rates of solid metals is the slightly increase of these rates in the soil mixtures from the soil rates without application compared with the doses 15 and 30 ton ha<sup>-1</sup> applied. Nevertheless, this increase is not significant according to the difference in the rates of such doses. In all cases, the concentration levels are below the established environmental standards. The solubility of the soils in water measured within 3 different periods decrease as time of incubation pass which shows that the capacity of retention of metals and soil structure is improving. In the case of the other solutions, bicarbonate and acetate, do not extract from the soil metallic elements in great quantities either even though they have better mechanism of extraction than distilled water.

Everything mentioned before would help to affirm that the use of sludges and compost as conditioners is beneficial for the soils and it is a useful solution for a problem of a final physical ubication of residues generated by sewage disposal plants.

## INTRODUCCIÓN

La ciencia de los suelos tuvo sus inicios en la antigüedad. Prácticas como la incorporación de residuos orgánicos para mejorar sus propiedades se remonta a cientos de años atrás; existen referencias bíblicas en cuanto a los beneficios del uso de estiércol cerca de las plantas. El origen del estudio científico del suelo probablemente puede atribuirse al gran químico alemán Julius Van Liebig, quien anunció el concepto de que los elementos minerales son esenciales para el suelo y que los abonos son complementarios para el crecimiento de las plantas.

### 1.1 Suelos

Se acostumbra definir como suelo a la capa superficial no consolidada de la superficie terrestre, la que está formada predominantemente por compuestos inorgánicos, con un porcentaje variable de sustancias orgánicas [11]. El suelo es un sistema polidisperso constituido por fases sólida, líquida o solución de suelo, y gaseosa. Estas fases están en permanente equilibrio entre ellas y, como consecuencia de ello, los nutrientes esenciales se encuentran distribuidos en el material coloidal sólido y en la solución de suelo. Este material coloidal está constituido, a su vez, por un complejo coloidal humus-arcilla en el cual ambos coloides están en estrecha asociación [31].

Los suelos constituyen una capa muy delgada de material sobre la superficie terrestre. La profundidad del suelo y sus propiedades fisicoquímicas varían de acuerdo con el lugar, pero en general el suelo tiene 5 componentes principales:

1. **Minerales:** Éstos se componen principalmente de minerales primarios y secundarios. Su proporción determina la retención de agua, estructura y disponibilidad de aire y nutrientes en los suelos.
2. **Residuos orgánicos:** Restos vegetales y animales que forman el componente orgánico del suelo en diferentes etapas de descomposición, los cuales proporcionan el recurso energético, estabilizándose en la fracción llamada humus.
3. **Agua:** La cual es necesaria para la actividad microbiana y su presencia en el suelo depende de varios factores.
4. **Gases:** Principalmente  $N_2$ ,  $O_2$  y  $CO_2$  cuando existe actividad microbiana.

5. Sistemas biológicos: Constituidos por sistemas radiculares de plantas, animales pequeños y microorganismos; siendo bacterias y hongos la población mas grande de microorganismos en los suelos.

## **1.2 Suelos Forestales**

En el mejoramiento de los suelos, se debe tener presente que no todos los constituyentes de éstos son iguales, por ello se hace mención a la diferencia de suelos forestales con otro tipo de suelos. La cubierta forestal y su capa superficial resultante proporcionan un microambiente y un espectro de microorganismos diferentes de los relacionados con la mayor parte de los demás suelos. Desarrollándose además procesos tan dinámicos como los ciclos de nutrientes entre los componentes de los campos forestales y la formación de ácidos orgánicos a partir de residuos en descomposición y la subsecuente lixiviación de las bases.

## **1.3 Desechos Orgánicos como fuente de nutrientes**

El uso de residuos orgánicos como lo son los llamados lodos sanitarios, los cuales se generan en las plantas de tratamiento de residuos líquidos (PTRL), y su incorporación en suelos forestales, pretenden influir positivamente en éstos y a la vez buscar una salida adecuada a su acumulación sucesiva y progresiva en estas plantas.

Al igual que la mayoría de los países del mundo, en Chile los lodos sanitarios o biosólidos de acuerdo a la definición de la EPA, son un desafío. Mejores condiciones sanitarias para la población requieren una gestión aún más rigurosa de estos residuos. Producto de ello, la disposición final de éstos se transforma en una problemática. Una de las posibles vías de solución es la utilización de los lodos sanitarios, adicionados como lodos propiamente tal o formando parte del compost en plantaciones forestales, ya que éstos tienen la capacidad de agregar nutrientes y materia orgánica a los suelos en donde se apliquen.

La utilización de residuos producidos por el hombre ha sido, hasta ahora poco frecuente. Residuos de basuras, productos industriales y aguas servidas, generalmente tienen altos valores de materia orgánica y elementos nutritivos, pero conllevan un grave problema de contaminación [11].

El uso de los desechos orgánicos como fuente complementaria de nutrientes para los bosques parece ser una alternativa viable. A menudo, los sistemas de eliminación de los residuos producidos en las plantas de tratamientos son costosos y pueden contaminar la atmósfera o dañar a los sistemas hídricos como resultado del incremento del agua en elementos y por adición de sustancias que se utilizan durante las distintas etapas del tratamiento de aguas servidas. Por otra parte, la incorporación de los biosólidos en los bosques, en las proporciones que toleran los bosques, pueden hacer que disminuyan los costos de eliminación así como en la energía que se necesita para producir una cantidad equivalente de nutrientes como fertilizantes. Zonas forestales cercanas a los centros de producción de desechos disminuyen al mínimo la necesidad de sobrecargarlos. Como la vegetación forestal no forma parte de la cadena alimenticia del hombre, la presencia de sustancias tóxicas o de gérmenes patógenos no es tan importante como cuando estos materiales se difunden sobre las tierras dedicadas a la agricultura.

El aporte que estos residuos hacen al sistema edáfico es múltiple siendo proporcionadores de C, N, P y de macro y micro nutrientes como Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, etc [3]. Este reservorio debe incorporarse a los suelos, para que éstos a su vez se beneficien. Este traspaso es posible mediante la actividad microbiana, ya que sin ésta los ciclos de nutrientes como el del carbono o del nitrógeno no se completarían. Dentro de esta "población microbiana" el grupo predominante lo constituyen bacterias y hongos. Las bacterias degradan las complejas sustancias orgánicas e inorgánicas, algunas en condiciones aeróbicas y otra en condiciones anaeróbicas. Los hongos descomponen la celulosa y otros componentes importantes de los tejidos forestales [11].

En las condiciones favorables que crean los rellenos sanitarios o formación de abono se pueden emplear los organismos del suelo para degradar los residuos.

### **1.3.1 Biosólidos**

La operación de plantas de tratamiento de agua potable, aguas servidas y residuos industriales líquidos genera gran cantidad de lodos.

La Comisión Nacional del Medio Ambiente en su Anteproyecto de Reglamentación para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas, define como lodo la acumulación de sólidos orgánicos sedimentables separados en los distintos procesos de tratamiento de aguas. Para

prevenir eventuales impactos negativos en el medio ambiente, que pueden provocar, este organismo establece condiciones para su correcto tratamiento y disposición. Se consideraran lodos no peligrosos aquellos que no presentan ninguna característica de toxicidad, toxicidad por lixiviación, reactividad, inflamabilidad o corrosividad y define como lodo sanitario a aquellos removidos durante las distintas etapas de tratamiento de aguas servidas, considerándose crudos si es que no han sido objeto de proceso de estabilización alguno.

En Chile se están implementando plantas de tratamiento de aguas servidas en las principales ciudades del país, y la velocidad de desarrollo de las políticas ambientales, hará que en el futuro próximo estas plantas estén en pleno funcionamiento, con lo cual se empezarán a producir y a acumular millones de toneladas de lodos sanitarios. Estos lodos, en la actualidad no cuentan con estudios básicos e integrales para su utilización en forma masiva y adecuada, para que ambientalmente no produzcan impactos negativos grandes, dado su alta carga de metales pesados en las ciudades más industrializadas.

En Chile se han establecido las cantidades máximas de aplicación a los suelos, las cuales son determinadas según el criterio de la CONAMA, estableciendo como tasa de aplicación máxima en suelos agrícolas y forestales incluidos suelos erosionados con potencial de uso agrícola **15 Ton/ha/año** en base seca [12].

### **1.3.2 Compost**

La estabilización de residuos orgánicos previo a su incorporación al suelo tiene como finalidad acelerar la descomposición o mineralización primaria de subproductos y desechos orgánicos para obtener un producto orgánico mas estable biológicamente, enriquecido en compuestos húmicos y libre de patógenos [29].

Los bioprocesos utilizados en la descomposición de desechos orgánicos se basan en la digestión de tipo aeróbica, empleada en compostaje y de tipo anaeróbica, fermentación con producción de biogas en biosólidos. En cada caso, el material orgánico es estabilizado ya sea por oxidación en el caso del compost o por reducción biológica para los biosólidos. Esto provoca que la composición química de ambos productos, compost y biosólidos, sea variable dependiendo de la materia prima usada y el tiempo de estabilización.

El compostaje es una forma de manejo de residuos sólidos orgánicos (restos vegetales, excrementos de animales y lodos sanitarios), el cual de manera natural sufre un proceso de transformación biológica aeróbica provocado por la acción de múltiples microorganismos los cuales promueven la descomposición (altas temperaturas) y la recombinación de los compuestos orgánicos complejos. Estos microorganismos requieren una fuente de carbono que les proporcione energía y material para nuevas células, elemento aportado por el material orgánico, junto a un suministro de nitrógeno para proteínas celulares [29]. Estas necesidades son cubiertas por el aporte conjunto de los lodos, debido al alto contenido de nitrógeno y por los residuos forestales los que proporcionan la fuente de carbono para la energía de los microorganismos.

En general, ambos productos orgánicos obtenidos, independiente del proceso utilizado para su estabilización son buenos acondicionadores o mejoradores de las propiedades físicas de los suelos, porque aportan niveles interesantes de materia orgánica.

#### **1.4 Materia Orgánica**

Según recomendación de la Soil Science Society of America, la materia orgánica del suelo se define en los términos siguientes: "...fracción orgánica del suelo que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del suelo." [11]

La cantidad y calidad de la materia orgánica influye sobre diversos procesos bioquímicos y químicos en el sistema edáfico y representa la base de la fertilidad de los suelos [29]. También es la base de la actividad biológica del suelo, influenciando características de importancia silvoagropecuaria como el contenido de P, el ciclo del N, la estructura del suelo y sus condiciones asociadas de infiltración de agua, permeabilidad y aireación.

Los compuestos orgánicos del suelo constituyentes de la materia orgánica, consisten en residuos de plantas, animales y microbios frescos en diferentes estados de descomposición y de humus.

El humus está compuesto por los restos post-mortem de vegetales y animales, que depositados en el suelo, son constantemente sometidos a procesos de descomposición, transformación y resíntesis [11]. Este constituye aproximadamente el 85% del total de la materia orgánica y se forma durante la descomposición biológica de los residuos orgánicos. El humus es una mezcla compleja, de naturaleza coloidal, de color oscuro, constituida por sustancias amorfas altamente poliméricas y de un alto PM. Para su estudio, el humus se ha fraccionado en base a su solubilidad decreciente, en PM y estabilidad crecientes en Ácidos Fúlvicos, Ácidos Húmicos y Huminas [13].

En general variados son los procesos en que interviene la materia orgánica, entre los que se mencionan ser fuente de energía para los procesos biológicos heterótrofos y fuente primaria de nutrientes como N, P y S. Aporta acidez, aumenta la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y ayuda a la fijación de sustancias orgánicas e inorgánicas. Además contribuye a la regulación térmica debido al color oscuro del humus y aumenta la capacidad de retención de agua, por nombrar algunas actividades edafológicas que la materia orgánica tiene.

## **1.5 Elementos Esenciales, Micro nutrientes y Contaminantes**

Las plantas absorben del suelo muchos elementos, pero no todos ellos son esenciales para su existencia y bienestar. Los elementos que las plantas requieren a fin de completar sus ciclos vegetativo y reproductivo, necesitan para cumplir una función que no puede ser reemplazada por otro o se identifique como integrante de un metabolito u otra estructura química de la planta se llaman *elementos esenciales*. El carbono, el hidrógeno y el oxígeno se obtienen a partir del dióxido de carbono y del agua. Por medio de la fotosíntesis se convierten en carbohidratos simples y con el nitrógeno, el fósforo y el azufre, forman aminoácidos, proteínas y protoplasma. Existen tres elementos que son el nitrógeno, el fósforo y el potasio que a menudo se llaman *nutrientes vegetales primarios* porque la planta los consume en cantidades relativamente grandes y son los que más a menudo están deficientes en los suelos. Otros tres como calcio, magnesio y azufre se conocen como *nutrientes vegetales secundarios* y los elementos restantes se llaman *micro nutrientes* porque los árboles los necesitan en cantidades muy pequeñas y es

menos probable que sean deficientes en los suelos. Atendiendo a un criterio estructural los nutrientes se pueden clasificar en cuatro grupos [22]:

- Grupo 1: C, O, H, N y S, se encuentran *covalentemente* ligados como integrantes fundamentales de la materia organizada.
- Grupo 2: P y B, existentes en forma de *oxianiones*, fosfato o borato.
- Grupo 3: K, Mg, Ca, Mn y Cl, presentes en forma iónica como reguladores osmóticos, aunque algunos puedan desempeñar funciones más específicas como integrantes de sistemas enzimáticos, generalmente en forma de complejos *metal-proteína*, más que de auténticas metaloenzimas.
- Grupo 4: Fe, Cu, Zn y Mo, existentes como quelatos o metaloenzimas que participan en procesos de óxido-reducción o de otra naturaleza.

Actualmente en Chile como una alternativa de uso no convencional de biosólidos, se presenta su utilización como mejorador de suelos forestales. A futuro se pretende ampliar este uso a suelos agrícolas o como abono en jardines públicos, todo esto acompañado de una concientización y educación de la población.

Variados estudios e investigaciones se están realizando actualmente con el propósito de demostrar que los biosólidos, generados y acumulados en miles de toneladas en las plantas de tratamiento, pueden tener un destino distinto y mucho más beneficioso para nosotros mismos que los rellenos sanitarios.

En este trabajo, que pretende sumarse a muchos otros, se entregan resultados de mediciones del contenido de macro y micro elementos realizadas en suelos forestales, que han recibido aplicaciones de biosólidos en distintas dosis, las cuales constituyen experiencias reales en bosques chilenos. En forma paralela, se llevaron a cabo mediciones similares en suelos de los mismos bosques sin tratamiento alguno (línea base) incubados en laboratorio con las mismas dosis, todo esto formando parte del Proyecto de investigación FONDEF D0111034.

## **II OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto de la adición de lodos sanitarios y compost en el contenido de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg) y metales pesados (Cu, Pb, Zn, Cd, Ni, Fe y Mn) en suelos forestales después de 2 años de tratamiento en terreno y en experiencias de incubación en laboratorio bajo condiciones controladas.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Caracterización de las muestras de: suelos, lodo, compost, suelo-lodo, suelo-compost (pH, porcentaje de humedad, contenido de materia orgánica, N).
2. Estudiar el impacto de biosólidos y compost mediante incubación en laboratorio por 8 meses en suelos con lodos y compost con dosis equivalentes a 400 y 800 ppm de nitrógeno.
3. Determinar el contenido total de nutrientes esenciales en las diversas muestras de que se dispone.
4. Determinar el contenido de metales pesados que poseen los lodos, el compost, los suelos y los suelos tratados con adición de los sustratos orgánicos en estudio.
5. Determinar el contenido de nutrientes y contaminantes solubles en Acetato de amonio, Carbonato de sodio y agua en ambas incubaciones.
6. Analizar los resultados verificando si los metales producen efectos de contaminación.
7. Estudiar los resultados obtenidos determinando así, el aporte beneficioso que produciría adicionar lodos sanitarios utilizados como fertilizantes.

### III METODOLOGIA

La realización del tema de estudio de tesis fue dentro del marco del Proyecto FONDEF D 0111034, “Desarrollo de prácticas sustentables de reciclajes de biosólidos en plantaciones forestales”. Dicho proyecto se llevó a cabo por la Universidad de Chile a través de sus Facultades de Ciencias Químicas y Farmacéuticas y de Ciencias Forestales, junto a las empresas ESVAL, ESSEL, ESSBIO, empresas forestales e instituciones públicas.

#### 3.1 Toma y Tratamiento de muestras

El estudio se realizó con un diseño experimental para cada región del país en estudio y estado del rodal, consistente en tratamientos de diferentes dosis de lodo con tres repeticiones cada uno. Las unidades de medición corresponden a parcelas cuadradas, de las cuales se obtuvieron las muestras de suelos utilizadas tanto para el estudio en terreno como para los incubados. Los tratamientos corresponden a aplicaciones con dosis equivalentes a 0, 400 y 800 kg de Nitrógeno en peso seco equivalente por hectárea con y sin compostaje. El ensayo se planteó en suelos forestales con plantaciones jóvenes de 5 años sin intervención silvoculturales, y en bosques establecidos de 10 años, con intervención silvocultural. Las especies forestales corresponden a las de mayor importancia y representatividad en la zona: *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*. Las muestras fueron obtenidas desde la capa superficial hasta una profundidad de 30 cm.

1. Se tomaron muestras de suelos forestales de tres regiones del país:

- VII región, Forestal Bosques Chile predio San Pedro.
  - Rodal adulto
  - Rodal juvenil
- VI región, CONAF predio Tanumé.
  - Rodal adulto
  - Rodal juvenil
- V región, predio Jaururo.
  - Rodal adulto

2. Se tomaron muestras de lodos de las plantas de:
  - Curicó VII región, sanitaria ESSBIO.
  - Rancagua VI región, sanitaria ESSEL
  - Ligua V región, sanitaria ESVAL.
  
3. Se tomaron muestras de compost de las 3 regiones en estudio:
  - Compost 1: Lodos Curicó con aserrín y corteza Bosques de Chile.
  - Compost 2: Lodos Rancagua con aserrín CONAF.
  - Compost 3: Producido por ESVAL en Planta de compostaje Quillota.

## **3.2 Preparación de las muestras**

### **A) Experiencia en terreno**

En el laboratorio las muestras de suelos en terreno que corresponden a aquellas tomadas bajo el punto directo de aplicación de los acondicionadores, se homogenizaron, disgregaron y tamizaron, guardándose en forma separada y etiquetada.

### **B) Suelos incubados**

Se realizaron mezclas de suelos para cada una de las regiones en estudio, los cuales corresponden a suelos sin tratamiento de lodo muestreados el año 2003 de los predios mencionados anteriormente. Se pesaron los suelos de las parcelas de cada región para obtener cantidades similares de cada una de ellas. El criterio usado en la elección de las parcelas fue un % similar de Carbono (%C bajos). A cada mezcla de suelo se le adicionó tanto lodo como lodo compostado de su respectiva región en dosis de 400 y 800 kg N ha<sup>-1</sup>. Durante el estudio, los suelos testigos y sus respectivas mezclas con los acondicionadores, se ajustaron a 60% de humedad aprovechable y se incubaron a temperatura ambiente de laboratorio a partir del mes de Septiembre a Abril de este año. Desde el inicio de la incubación se controló su peso y se repuso con agua el peso perdido, esto con el fin de mantener las condiciones naturales originales del suelo.

### 3.3 Caracterización de las muestras

- **pH:** Se determinó el pH de los suelos incubados preparando una suspensión suelo-agua destilada en relación 2:1. La suspensión se agitó por un tiempo determinado, se dejó reposar y el pH se midió potenciométricamente en el sobrenadante usando un pHmetro.
- **Humedad:** La humedad de los suelos incubados se midió por gravimetría, pesando una cantidad conocida de suelo aproximadamente 20 g, y luego llevando a sequedad a 105°C por un periodo de 2 horas, y por diferencia de masa se obtuvo el valor de humedad correspondiente.
- **Contenido de materia orgánica y Análisis elemental:** La determinación de C y N, en los incubados se realizará mediante un analizador elemental Vario-El.
- **Metales Totales:** Esta determinación en los suelos de la experiencia en laboratorio fue realizada al mes de comenzada la incubación y en la experiencia en terreno al cabo de un año de tratamiento.  
Los metales pesados y nutrientes se determinaron luego de destruir la materia orgánica en horno microondas mediante digestión ácida usando una mezcla  $H_2O_2$ - $HNO_3$ . Las determinaciones se harán por medio de Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA) de llama.  
Se pesaron aproximadamente 500 mg de suelo y se traspasaron a vasos de microonda. A continuación se adicionaron 2 ml de  $HNO_3$  al 30% "Perhydrol" y 2 ml de  $H_2O_2$  bajo campana. Una vez armado el equipo se llevo al horno, donde mediante un programa ya dispuesto se procedió a la digestión. Este procedimiento se repetía para asegurar una mineralización efectiva. A continuación se procedió a filtrar las soluciones usando papel Whatman nº 9 y colectando en matraces aforados de 25 ml y completando volumen con agua nanopura. Finalmente se trasvasijó a frascos plásticos rotulados para

así proceder a determinar concentración en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer 3110 con llama.

Se determinaron las concentraciones de metales pesados y nutrientes, tanto en los suelos de la experiencia en terreno como en las incubaciones suelo-lodo y suelo-compost.

**Fósforo:** El P se determinará como P disponible por el método colorimétrico del azul de molibdeno y el P total por método de Walkley-Black.

**Potasio:** La concentración de este elemento se determinó en un Fotómetro de llama.

- **Extractabilidad de Metales:** Se evaluó el efecto que tienen distintas soluciones sobre la solubilidad de los metales presentes en los suelos incubados, siendo dichas soluciones  $\text{NaHCO}_3$  0.5 M a pH 8.5 y  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  1 M a pH 7.0 con las cuales se realizó una extracción. El tercer extractante empleado fue agua destilada, realizándose tres extracciones distintas en tres períodos distintos de la incubación.

Se tomaron 20 gr de los suelos incubados, tanto de los testigos como de los adicionados de biosólidos y compost (400 y 800 ppm), se traspasaron a frascos plásticos y se les adicionaron 50 mL de cada solvente. A continuación se agitaron durante 1 hora aproximadamente en un agitador a 20-25 °C y se dejaron reposar por 12 horas. Luego se centrifugaron por 15 min a 2500 rpm y finalmente se filtraron usando papel Whatman n° 9 hasta que se obtuvo una solución clara con la cual era posible proceder a la lectura en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer con llama.

## IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 Caracterización de Residuos Lodos y Compost

Es relevante conocer como se caracterizan químicamente lodos y compost para así entender mejor el aporte que proporcionan a los suelos en su calidad estructurante y nutriente.

Se acompaña datos de pH y contenidos de C y N en lodos de las plantas de tratamiento de aguas servidas de la V, VI y VII Región y también en compost elaborados a partir de esos mismos lodos, además de la relación C/N para evaluar la calidad del sustrato, los cuales se aprecian en la Tabla 1.

**Tabla 1: Características generales de biosólidos y compost**

	<i>pH</i>	<i>%C</i>	<i>%N</i>	<i>C/N</i>
<b>Lodo V</b>	5.64	31.3	5.2	6
<b>Lodo VI</b>	5.24	39.2	5.9	6.6
<b>Lodo VII</b>	5.62	36.5	6.1	6
<b>Compost V</b>	7.79	36	2.4	15
<b>Compost VI</b>	6.05	30.5	2.0	15
<b>Compost VII</b>	5.34	23.7	1.5	16

Fuente: Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales, 2005.

Se observa que los rangos de pH para ambos productos son adecuados para su uso en suelos forestales donde la mayor parte de las especies arbóreas se cultivan dentro de la escala entre pH 4.5 y 6.5, levemente ácidos en lodos y más neutros en el caso del compost. El contenido de C cercano al 30% para ambos productos, asegura un aporte importante de materia orgánica total. Por su parte el contenido de N total fluctúa entre 5.2 y 6.1% en los biosólidos lo que significa un buen aporte de N y sobre este valor se efectúan los cálculos para determinar las

dosis de aplicación a suelos. En el caso del compost se asegura un aporte de N que varía entre 1.5 y 2.4%. Las relaciones C/N en lodos son del orden de 6 mientras que en los compost, 15 y 16 lo que muestra que se diluye el contenido de nitrógeno y da un producto más estable.

**Tabla 2: Balance de Carbono (g C /100 g ss)**

	<b>%C total</b>	<b>C-hum</b>	<b>C-HA</b>	<b>C-FA</b>	<b>%C estable</b>	<b>C-sol</b>
<b>Lodo V</b>	31.3	15.2	0.2	2.6	57.3	13.4
<b>Lodo VI</b>	39.2	13.4	4.6	2.3	51.8	18.8
<b>Lodo VII</b>	36.5	13.8	2.0	3.7	53.7	16.8
<b>Compost V</b>	36	22.8	2.2	4.8	82.8	6.2
<b>Compost VI</b>	30.5	9.9	3.6	1.0	47.5	15.9
<b>Compost VII</b>	23.7	7.3	3.3	0.6	47.5	12.4

Fuente: Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales, 2005.

**Tabla 3: Balance de Nitrógeno (g N /100 g ss)**

	<b>%N total</b>	<b>N-hum</b>	<b>N-HA</b>	<b>N-FA</b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> mg/kg</b>	<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>%N estable</b>	<b>N-sol</b>
<b>Lodo V</b>	5.2	1.856	0.033	0.39	6	0.35	50	2.6
<b>Lodo VI</b>	5.9	1.458	0.613	0.39	3	0.42	48.8	3.0
<b>Lodo VII</b>	6.1	1.618	0.274	0.70	5	0.54	51.3	2.9
<b>Compost V</b>	2.4	0.635	0.224	0.35	9	0.09	54.6	1.09
<b>Compost VI</b>	2.0	0.608	0.385	0.12	149	0.19	64.7	0.72
<b>Compost VII</b>	1.47	0.427	0.288	0.054	288	0.0003	54.3	0.67

Fuente: Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales, 2005.

El fraccionamiento de la parte más estable de la materia orgánica, el humus, en sus formas: ácidos húmicos (HA), ácidos fúlvicos (FA) y huminas (hum) y la suma de tales fracciones estables y su diferencia con el elemento-total, tanto para C y N permite conocer el pool de C y N disponible en formas solubles y rápidamente aprovechables para todos los procesos químicos y biológicos que se desarrollan en el sistema edáfico.

En la Tabla 2, el balance de Carbono muestra que para los lodos el C total oscila entre un 30 y 40 g C / 100 g ss, de este valor un porcentaje alrededor del 60-70% corresponde a fracciones estables las cuales facilitan la agregación del suelo, mejorando la aireación y permeabilidad. El resto corresponde a la parte lábil que sirve de reserva energética y material para nuevas células en los procesos biológicos.

En el caso del compost, el % C estable muestra valores mas disímiles debido a que el proceso de compostaje depende de muchos factores, como el tipo de material orgánico que se esté tratando, el tiempo, la temperatura, el pH, clima de la región, por nombrar algunos; y en el caso del C lábil se observa una situación similar.

En la tabla 3, las fracciones estables del N para el caso de los lodos corresponden aproximadamente al 50%, mientras que el pool lábil o nitrógeno soluble corresponde al otro 50%, lo que ratifica el alto contenido de este elemento presente en los lodos lo que se refleja también en la relación C/N con valor 6 para éstos. Una situación distinta se aprecia para los compost donde el N total disminuye a menos de la mitad por dilución del elemento y además por procesos de transformación biológica aerobia, en donde los microorganismos toman los altos contenidos de N presentes en los lodos y los utilizan como suministro para nuevas proteínas celulares, mientras que los residuos forestales proporcionan la fuente de carbono como recurso energético y de material para nuevas células. El contenido de N estable aumenta en comparación con los valores de los lodos lo que asegura una mayor permanencia y futura disponibilidad de este elemento en el suelo.

#### 4.1.1 Caracterización de Suelos Experiencia en terreno e Incubados

##### A) Experiencia en terreno

Los suelos evaluados que formaron parte del experimento en terreno fueron Jaururo y San Pedro 2º Toma año 2004, ambos con aplicaciones de lodos. La toma de muestra corresponde a las muestras de suelo ubicadas bajo el punto directo de aplicación.

En ambos suelos Jaururo y San Pedro se determinaron sólo los valores de pH, el resto de los parámetros de caracterización son parte de otro trabajo. En ambos suelos se observó que a medida que aumenta la profundidad de los perfiles (0-10, 10-20 y 20-30 cm) el pH aumenta. En Jaururo el valor de pH oscila entre 5.28 y 6.37, mientras que para San Pedro lo hace entre 4.65 y 5.89, pH ácidos característicos de suelos forestales, especialmente cuando en ellos crecen coníferas.

##### B) Suelos incubados

Las incubaciones suelo-lodo y suelo-compost corresponden a suelos de tres regiones: Jaururo V región con rodal de eucalipto, Tanumé VI región y San Pedro VII región con rodal pino insigne.

**Tabla 4: Características generales incubaciones suelo-lodo.**

Suelo	<i>pH</i>	%C	%N	C/N
Jaururo Testigo	5.6	1.16	0.13	8.7
Jaururo 400	4.9	1.30	0.30	4.2
Jaururo 800	3.9	1.43	0.25	5.5
Tanumé Adulto Testigo	5.6	2.05	0.14	14.5
Tanumé Adulto 400	5.0	2.22	0.21	10.2
Tanumé Adulto 800	4.9	2.56	0.38	6.7

<b>Suelo</b>	<b>pH</b>	<b>%C</b>	<b>%N</b>	<b>C/N</b>
<b>Tanumé Juvenil Testigo</b>	4.7	1.60	0.15	10.3
<b>Tanumé Juvenil 400</b>	4.7	1.73	0.18	9.1
<b>Tanumé Juvenil 800</b>	4.8	1.55	0.18	8.4
<b>San Pedro Adulto Testigo</b>	5.8	2.93	0.18	16
<b>San Pedro Adulto 400</b>	4.9	2.62	0.22	11.6
<b>San Pedro Adulto 800</b>	4.6	2.55	0.39	6.5
<b>San Pedro Juvenil Testigo</b>	5.1	1.95	0.10	18.5
<b>San Pedro Juvenil 400</b>	4.5	2.82	0.16	17.1
<b>San Pedro Juvenil 800</b>	4.4	2.70	0.19	13.7

**Tabla 5: Características generales incubaciones suelo-compost.**

<b>Suelo</b>	<b>pH</b>	<b>%C</b>	<b>%N</b>	<b>C/N</b>
<b>Jaururo Testigo</b>	5.39	3.87	0.30	12.8
<b>Jaururo 400</b>	5.73	0.94	0.09	9.92
<b>Jaururo 800</b>	5.37	1.80	0.18	9.98
<b>Tanumé Adulto Testigo</b>	4.98	2.55	0.18	13.9
<b>Tanumé Adulto 400</b>	5.09	2.62	0.20	12.7
<b>Tanumé Adulto 800</b>	4.81	3.92	0.33	11.8
<b>Tanumé Juvenil Testigo</b>	4.66	1.60	0.16	9.8
<b>Tanumé Juvenil 400</b>	4.62	1.97	0.20	9.8
<b>Tanumé Juvenil 800</b>	4.63	2.19	0.23	9.5
<b>San Pedro Adulto Testigo</b>	5.18	3.35	0.20	16.7
<b>San Pedro Adulto 400</b>	5.30	3.48	0.21	16
<b>San Pedro Adulto 800</b>	5.32	4.30	0.26	16.5
<b>San Pedro Juvenil Testigo</b>	4.77	4.91	0.31	15.7
<b>San Pedro Juvenil 400</b>	4.73	5.15	0.26	19.5
<b>San Pedro Juvenil 800</b>	4.73	5.69	0.28	20.3

Al observar los valores de las tablas 4 y 5 que corresponden a la determinación de análisis elemental realizada al término del período de incubación, se aprecia que a medida que la dosis de aplicación de lodo y compost aumenta, los valores para las relaciones C/N disminuyen en relación a los valores de las incubaciones de los suelos testigos. Las incubaciones suelo-compost presentan %C mayores que van de los 0.94 a los 5.69%, mientras que las incubaciones con lodo varían entre 1.16 y 2.93%, esto puede atribuirse al carbono extra que les proporcionan los residuos forestales (materia orgánica) a la mezcla del compost en su forma de corteza y aserrín. Por su parte los %N en ambas incubaciones no varían en forma notoria entre uno u otro material acondicionador.

En cuanto a los valores de pH, éstos se vuelven ligeramente más ácidos a medida que la dosis de lodo y compost aplicada aumenta comparando con los valores de pH de los suelos testigos.

## **4.2 Efectos de la adición de lodos y compost en el contenido de macro y micro elementos en suelos en experiencia en terreno e incubados**

Se midió el efecto de la aplicación de lodos en los suelos forestales durante su segundo año, así como también el efecto de lodos y compost en los suelos incubados, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación. Estos resultados corresponden al trabajo en duplicado de todas las muestras.

### **4.2.1 Caracterización del contenido de metales en Lodos y Compost**

El contenido de metales pesados en los lodos no debe sobrepasar los valores de concentraciones máximas establecidas en el proyecto de Normas Chilenas para Lodos.

**Tabla 6: Contenido de Macro y Micro Elementos en Lodos (mg/kg)\***

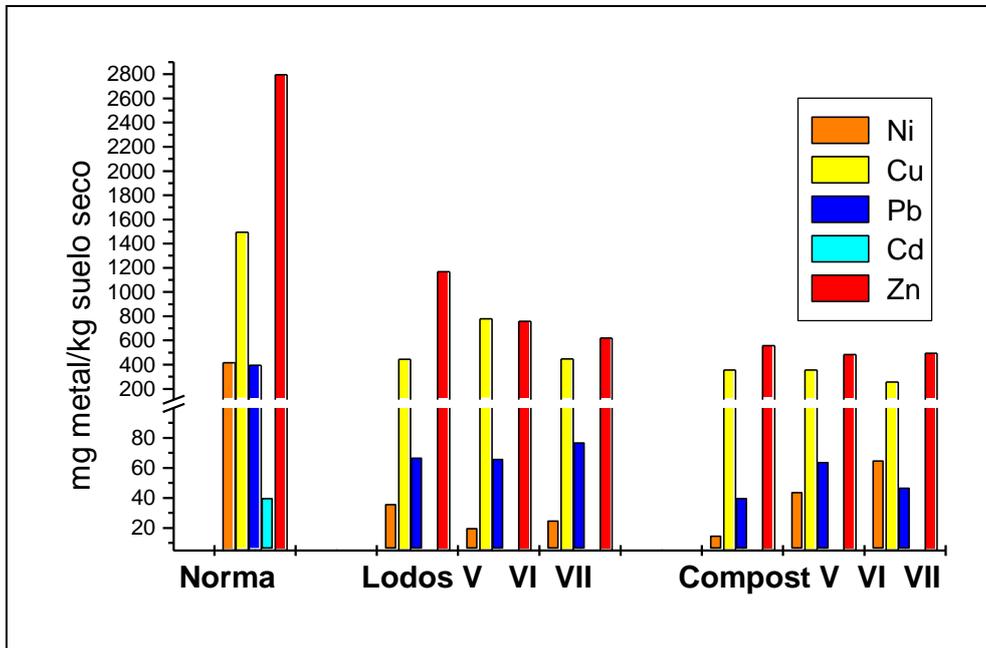
	<b>Ca</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>
<b>Lodo V</b>	1496	7378	516	1174	449	36	67	<5
<b>Lodo VI</b>	967	9161	127	763	784	20	66	<5
<b>Lodo VII</b>	7932	8307	125	625	452	25	77	<5

Fuente: Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales, 2005. \*En base a lodo seco.

**Tabla 7: Contenido de Macro y Micro Elementos en Compost (mg/kg)\***

	<b>Ca</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>
<b>Compost V</b>	7794	8230	490	561	362	15	40	0
<b>Compost VI</b>	12501	12337	249	490	360	44	64	<5
<b>Compost VII</b>	3368	18337	249	499	262	65	47	0

Fuente: Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales, 2005. \*En base a compost seco.



**Figura 1: Comparación del contenido de Metales pesados entre la Norma y los acondicionadores**

La figura 1 muestra que el contenido máximo de metales pesados presentes tanto en lodos como compost de las 3 regiones, están muy por debajo de lo establecido por el Proyecto de Norma chilena. En las tablas 6 y 7, se puede apreciar que el contenido de nutrientes es adecuado para el crecimiento de las especies forestales y los niveles de metales pesados resultan inocuos para su aplicación en suelos con ellas.

#### 4.2.2 Contenido de metales totales en Experiencia en Terreno

Los valores de pH de los suelos, en general, varían entre 3 y 10 (Forest service, 1961), pero los suelos forestales, salvo cuando se trata de suelos calcáreos, varían entre pH 4 y pH 6.3, es decir, desde muy ácidos hasta ligeramente ácidos (casi neutros) [6]. Esta situación se presenta en los valores de pH de los suelos en la experiencia en terreno, Jaururo y San Pedro 2º Toma, con tratamiento de lodo correspondiente a 400 y 800 Ton N ha<sup>-1</sup>. Ciertas especies producen hojarasca o

mantillo que produce gran cantidad de ácidos cuando se descomponen, destacan entre estas especies las coníferas, en especial las Pináceas como es el caso del predio San Pedro, factor que contribuiría con la acidez de los suelos de las parcelas controladas. Dependerá del pH, el tipo de cationes que adsorban las arcillas del suelo. Como se tiene conocimiento de que los suelos San Pedro y Jaururo poseen solo tratamientos con lodos (L400 y L800), los efectos en la magnitud de la capacidad de retención y concentración de metales serían resultado del aporte del lodo aplicado.

El paso de los metales presentes en el lodo a los suelos, es entre otros factores, producto de la lixiviación de éstos mediante el agua. Como se mencionó con anterioridad, los pH de los suelos eran levemente más ácidos en el primer horizonte, ejerciendo quizás el agua cierta influencia en ello. El agua al reaccionar con el CO del suelo, produce cierto nivel de concentración de  $H_2CO_3$  en superficie, sumado a ello, el aporte de ácidos orgánicos e inorgánicos, que se producen como resultado del metabolismo de los microorganismos del suelo al descomponer la materia orgánica que se les esta aportando; hacen probablemente que el pH sea más bajo en el horizonte superficial que en los horizontes más profundos [13].

En general, en todas las Figuras (Figura 2 hasta Figura 8), se ve que entre perfiles se aprecian leves diferencias de concentraciones de los elementos. Situación que se presenta en los suelos San Pedro juvenil y adulto y suelos Jaururo.

En relación a los macro nutrientes Ca y Mg, no se registran diferencias notorias en la concentración de ambos metales entre las dosis aplicadas para los suelos San Pedro y Jaururo (Figuras 2, 3 y 4). En cuanto a la profundidad de los perfiles, tampoco se diferencia el aporte que realizan en los suelos las dosis de lodo 400 y 800 en la concentración de Ca y Mg. Salvo el caso de las dosis 400 en las parcelas 4 y 5 para Jaururo, donde los perfiles más profundos presentan una mayor concentración de Mg ( Figura 2). El Ca se encuentra más concentrado en los perfiles superiores casi en todas las parcelas Jaururo en estudio.

En los suelos San Pedro juvenil y adulto, el Ca también se encuentra mas concentrado en el primer perfil; en tanto que la concentración de Mg no varía entre perfil (Figuras 3 y 4).

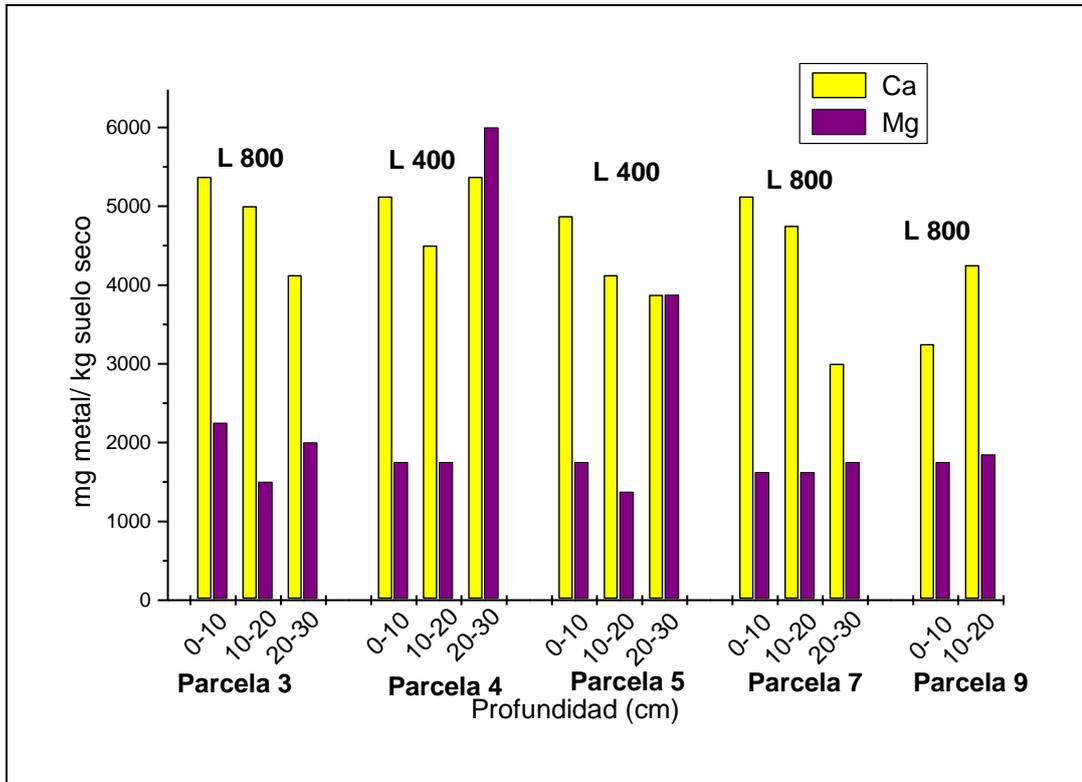


Figura 2: Concentración total de Ca y Mg en suelo Jaururo

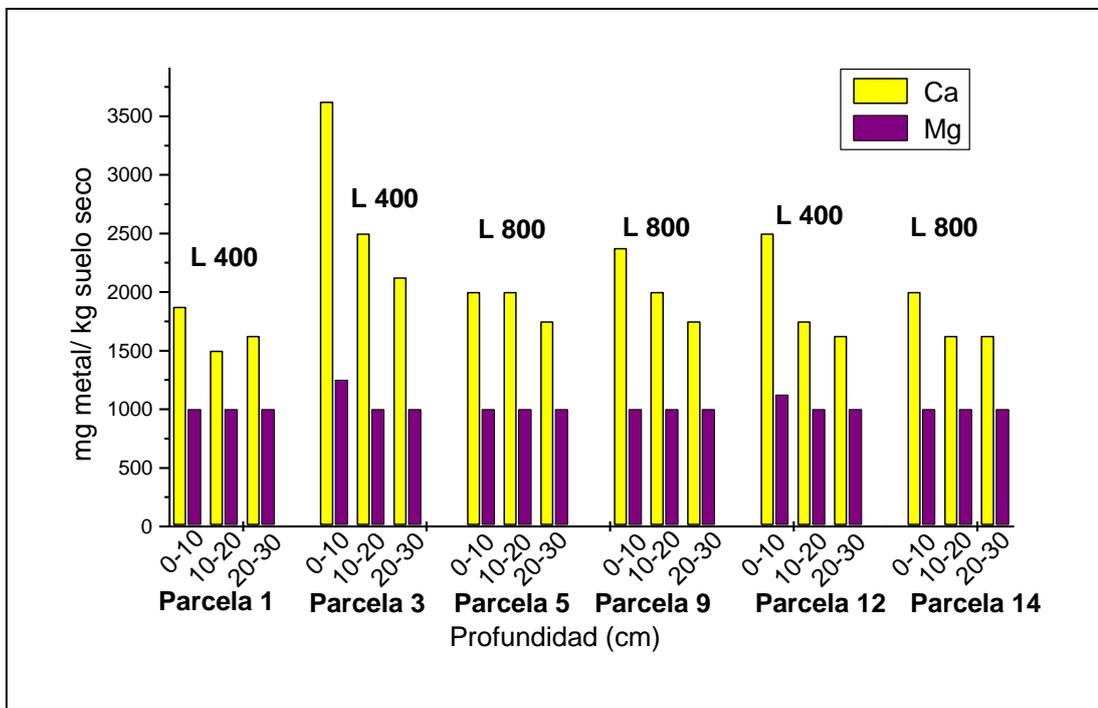


Figura 3: Concentración total de Ca y Mg en suelo San Pedro Juvenil

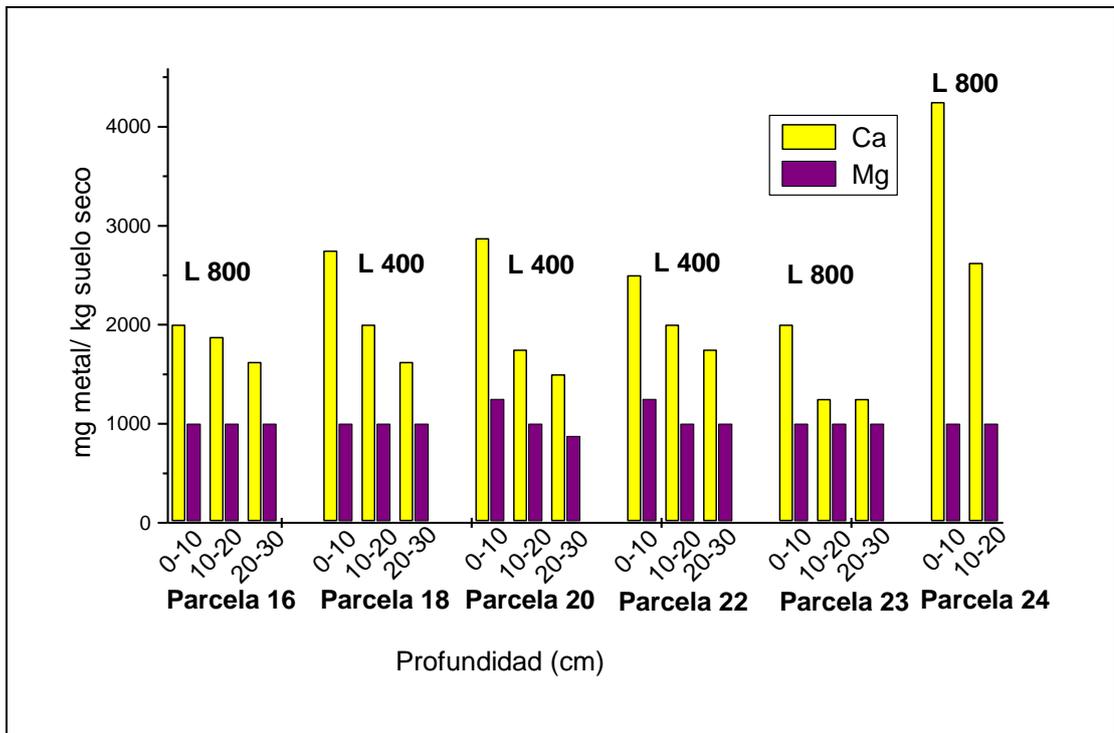


Figura 4: Concentración total de Ca y Mg en suelo San Pedro Adulto

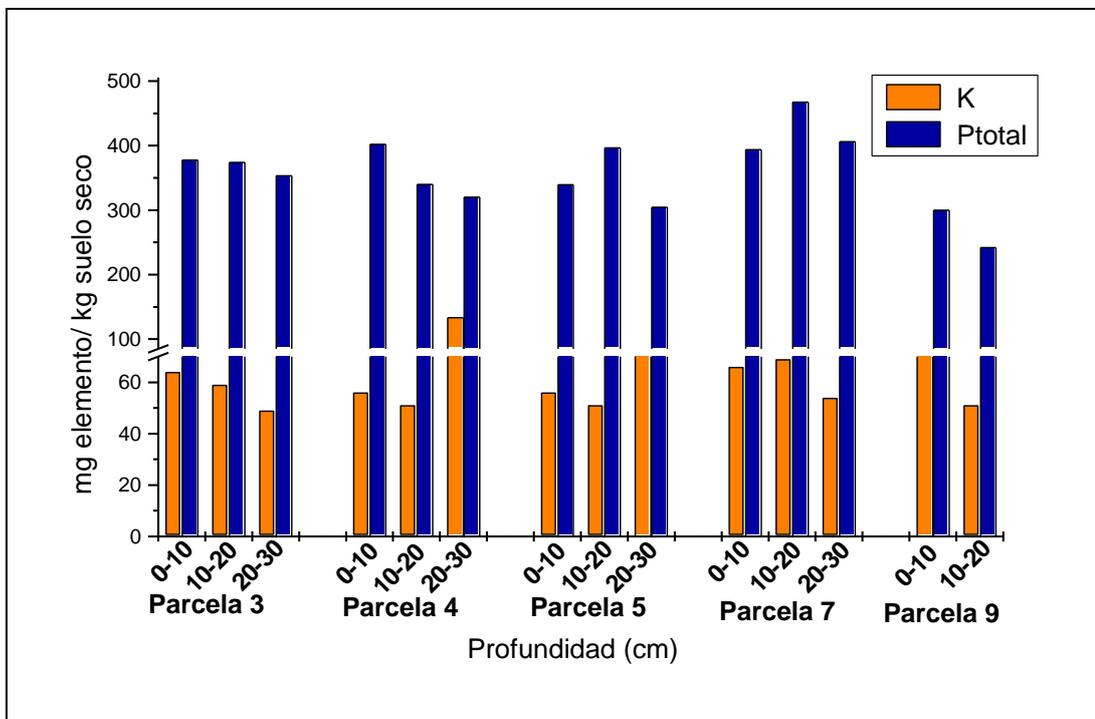
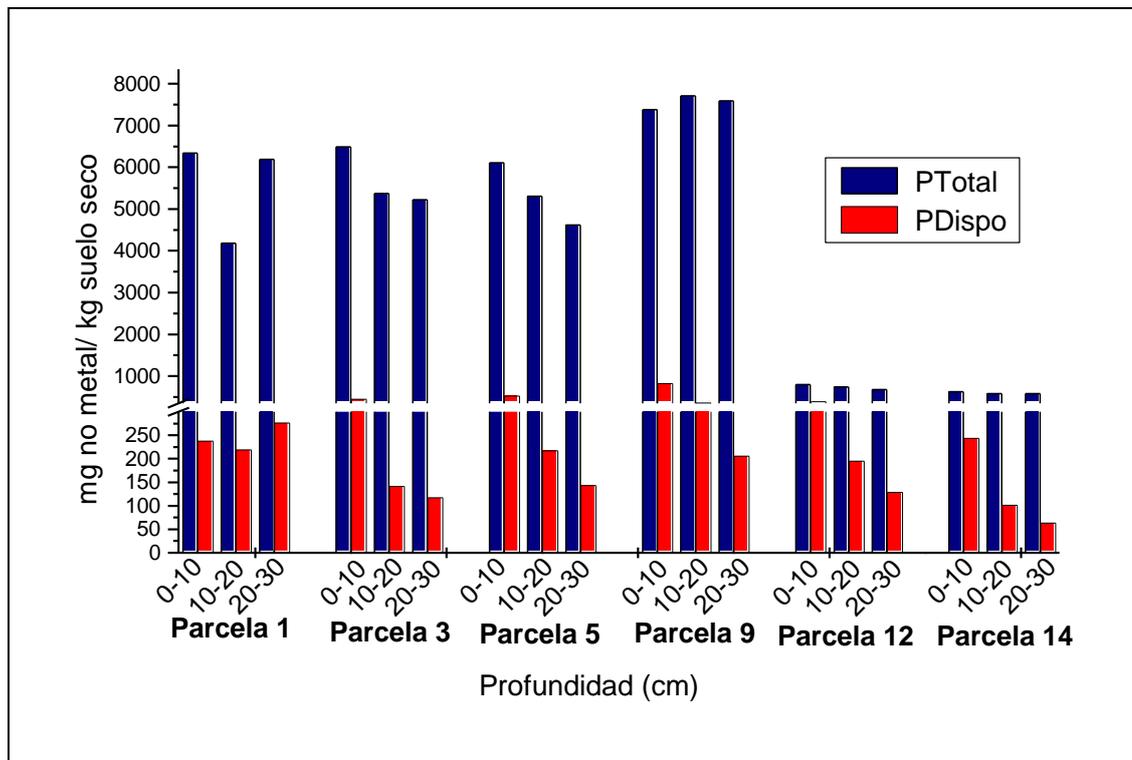


Figura 5: Concentración total de P y K en suelo Jaururo.

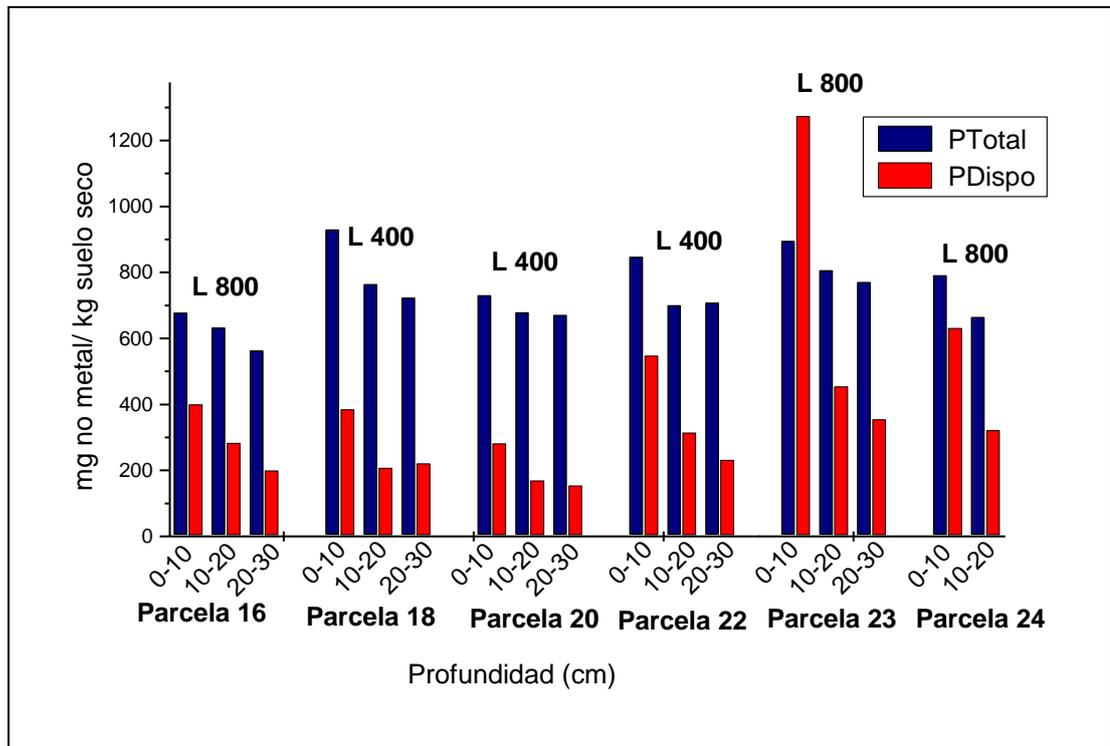
El caso del P y K es similar al descrito anteriormente, no se presentan diferencias relevantes en las concentraciones de ambos metales resultado de las dos dosis aplicadas en los suelos Jaururo (Figura 5), tampoco entre los horizontes se ven diferencias.

En los suelos San Pedro, la concentración de P total es considerablemente superior en el predio juvenil que en el adulto. En el predio juvenil, tampoco se diferencian las concentraciones entre una dosis 400 y una 800. El P disponible bordea los 250 ppm en todas las parcelas, presentándose esta concentración en los perfiles superiores disminuyendo a medida que aumenta la profundidad de éstos.

En el predio con bosque adulto de los suelos San Pedro (Figuras 6 y 7), la concentración de P disponible en los perfiles superiores de las parcelas es mayor a los valores presentados en los predios juveniles y el P total no varía mayormente entre horizontes y dosis aplicadas.

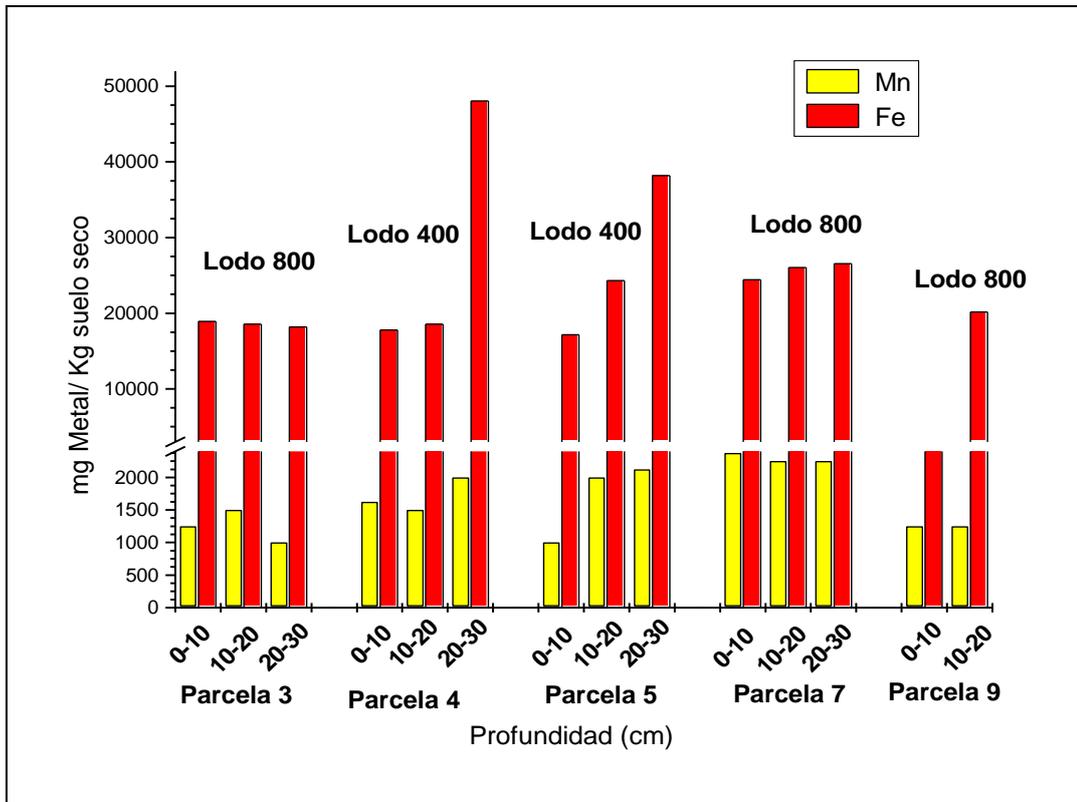


**Figura 6: Concentración de P Total y Disponible en suelo San Pedro Juvenil**

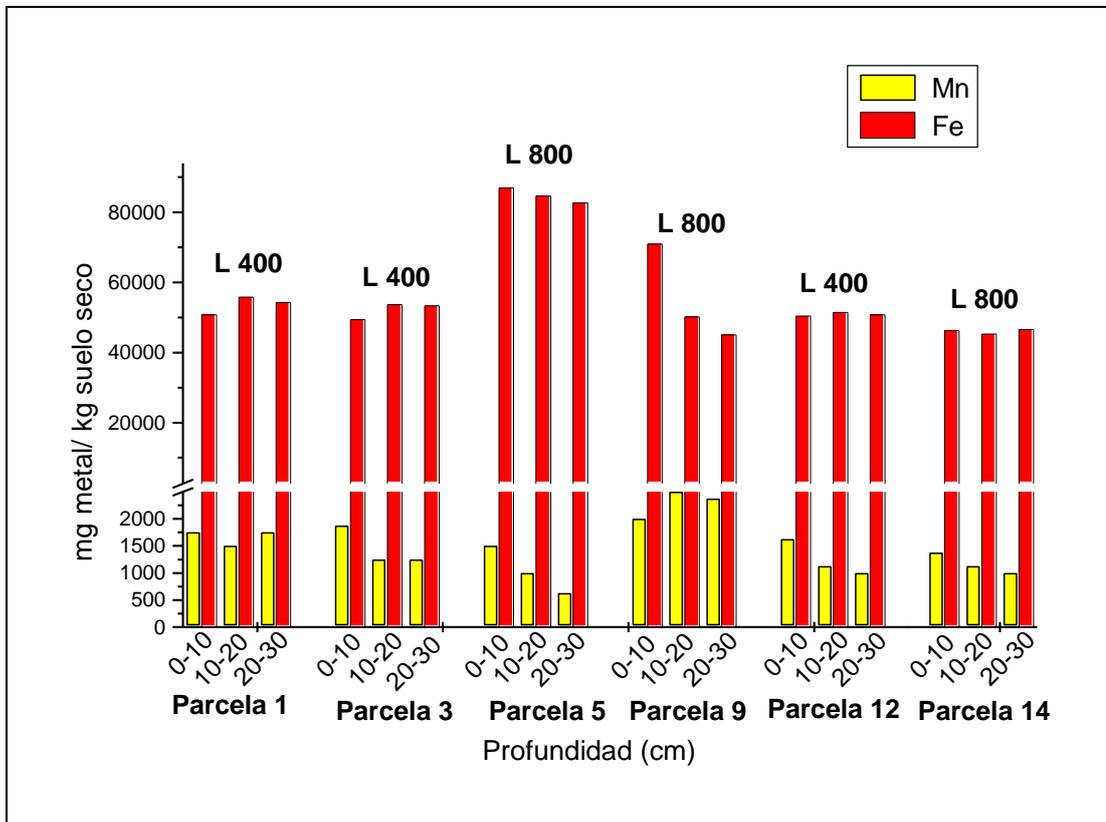


**Figura 7: Concentración de P Total y Disponible en suelo San Pedro Adulto**

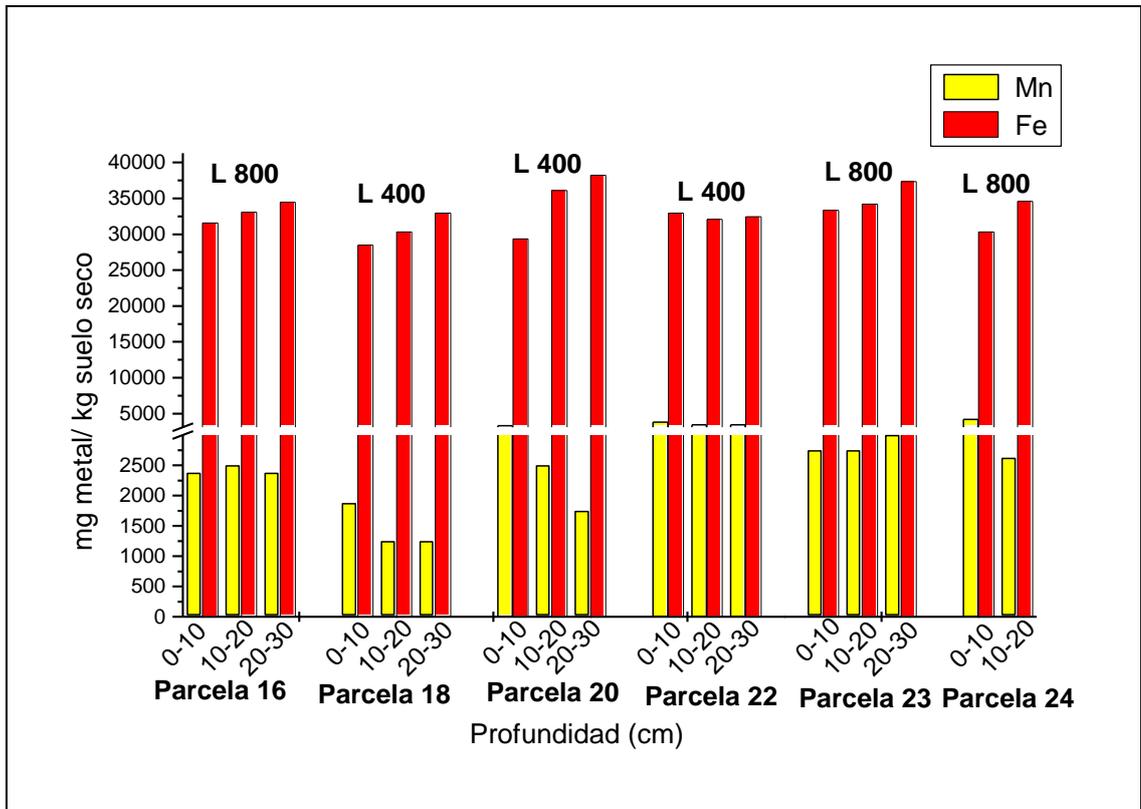
En la Figura 8, se presentan las concentraciones de Fe y Mn en los suelos Jaururo. El Fe se encuentra en concentraciones apreciables no registrándose variaciones considerables en torno a las dosis aplicadas en dichos suelos y la mayor concentración de éste se aprecia en los perfiles más profundos. En cuanto al Mn, sus valores tampoco difieren entre la dosis 400 u 800, pero tienden a incrementarse levemente a medida que aumenta la profundidad de los perfiles. En los suelos San Pedro, la concentración de Fe es mucho mayor en los predios con bosques juveniles, destacándose en este caso que es superior para la dosis 800. La concentración de Fe en los predios con bosques adultos, es aproximadamente la mitad de la concentración registrada en los juveniles y también tiende a aumentar levemente a medida que aumenta la profundidad del perfil (Figuras 9 y 10).



**Figura 8: Concentración total de Fe y Mn en suelo Jaururo**

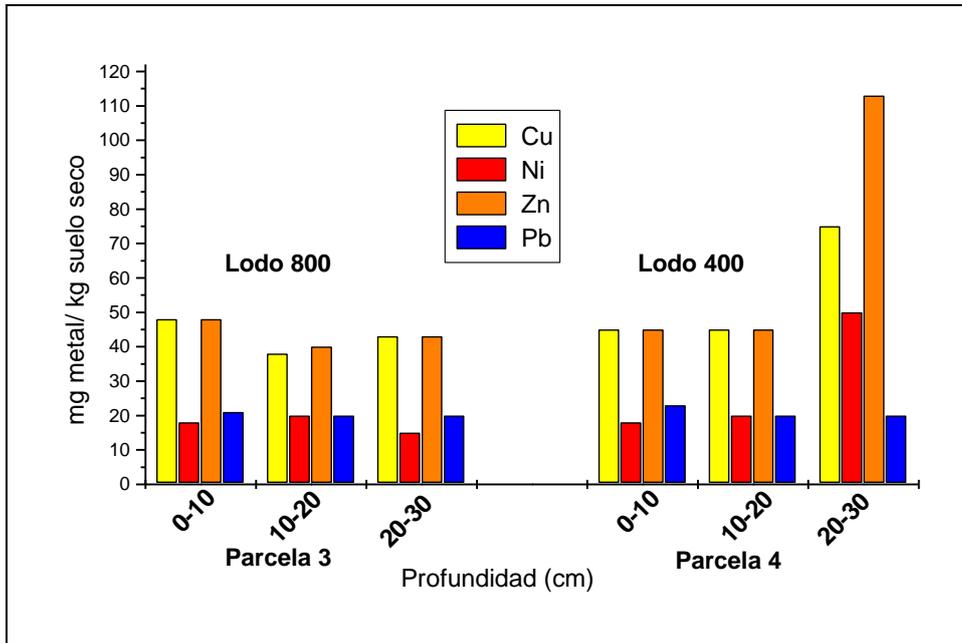


**Figura 9: Concentración total de Fe y Mn en suelo San Pedro Juvenil.**

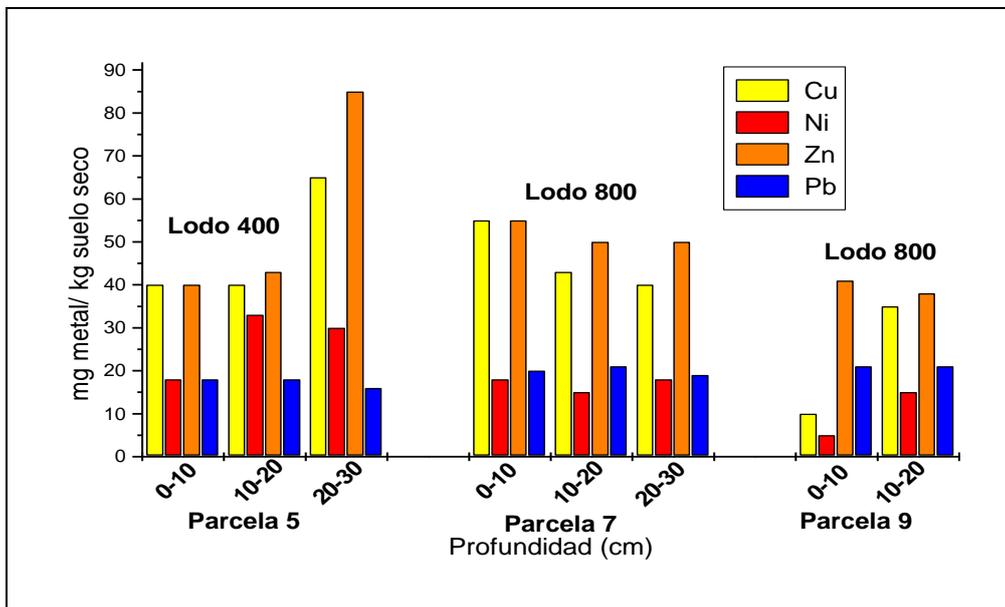


**Figura 10: Concentración total de Fe y Mn en suelo San Pedro Adulto**

Al observar la concentración de micro elementos en los suelos, Figuras 11 y 12 para los suelos Jaururo, se destaca que en todos los casos no se sobrepasan los límites establecidos por las normas chilenas [16], encontrándose muy por debajo de ellos. Asimismo, los suelos San Pedro juvenil y adulto tampoco exceden norma alguna.

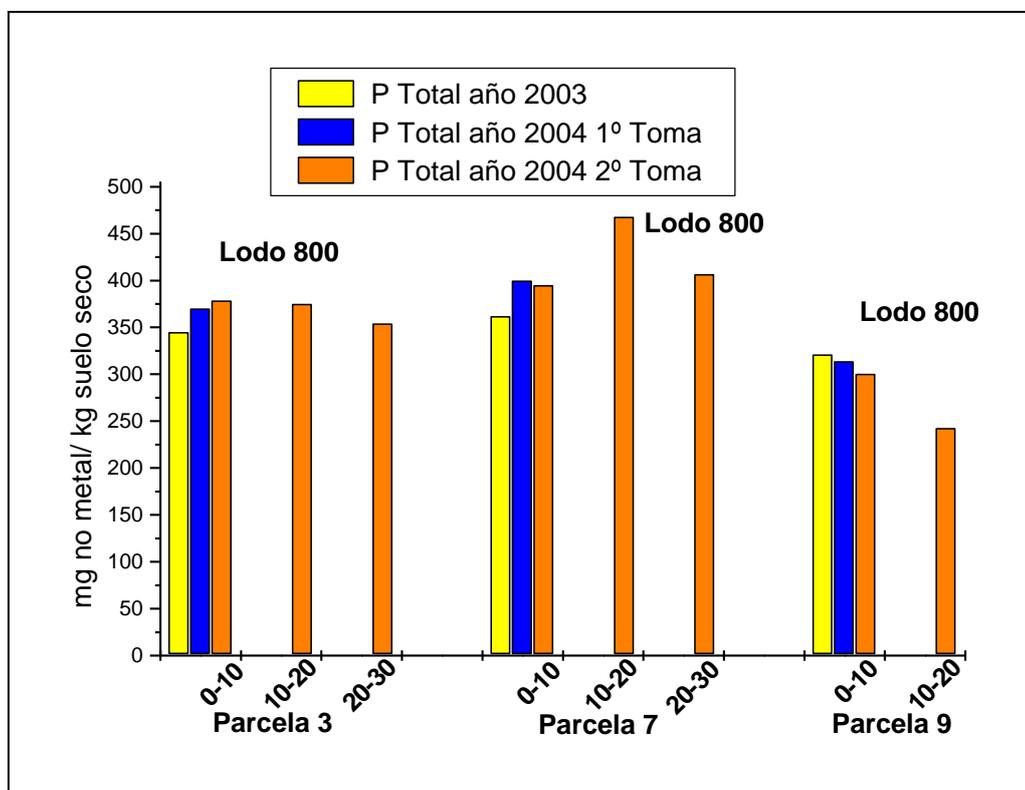


**Figura 11: Concentración total de Cu, Ni, Zn y Pb en Parcelas 3 y 4 suelo Jaururo**

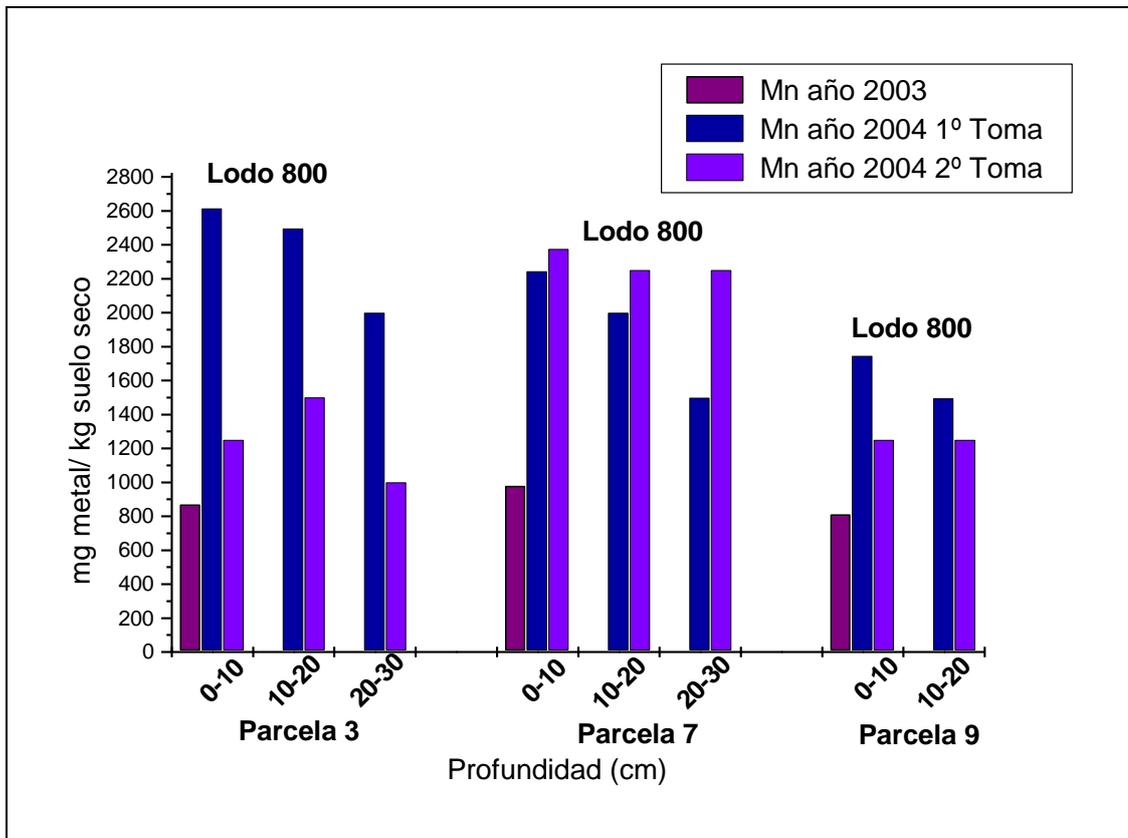


**Figura 12: Concentración total de Cu, Ni, Zn y Pb en Parcelas 5, 7 y 9 suelo Jaururo**

A modo de comparar el aporte, producto de la incorporación de lodos en los suelos en la experiencia en terreno, en este caso suelos Jaururo dosis 800, se grafican en las Figuras 13 y 14 las concentraciones de P Total y Mn registradas en los años 2003 (línea base), año 2004 (primera toma) y año 2004 (segunda toma). Se aprecia que en el caso del P hubo un leve incremento en la concentración de este elemento, el cual muestra valores en el año 2003 que son superados el año 2004 en la 1º y 2º Toma, donde en ésta última aparecen los resultados según la profundidad del perfil.



**Figura 13: Comparación de la concentración de P Total con dosis 800 en los suelos en terreno Jaururo registradas durante los años 2003 y 2004**



**Figura 14: Comparación de la concentración de Mn con dosis 800 en los suelos en terreno Jaururo registradas durante los años 2003 y 2004**

Al observar los elementos P y Mn, se aprecia un importante incremento al año de la aplicación, el cual disminuye en la última toma. Esto deja en evidencia que desde el punto de vista químico, la concentración de macro y micro elementos aportados por los biosólidos no se aprecia con claridad, siendo difícil establecer que hubo un aumento en su concentración por la variabilidad de los suelos empleados de la experiencia en terreno.

### 4.2.3 Contenido de metales totales en Suelos Incubados

En general todos los elementos muestran una leve tendencia a incrementar sus niveles de concentración a medida que la dosis de aplicación aumenta, con algunas excepciones (Mn en la incubación suelo-compost para suelos San Pedro Juvenil).

En los suelos Jaururo (V región) se observa que la concentración de macro y micro elementos totales en las incubaciones testigo, sin aplicación de lodo y compost (lodo compostado), presentan valores mas bajos en comparación con las incubaciones con dosis aplicadas, las cuales mostraron un leve incremento tal como se ilustra en la Figura 15 para el caso del metal Fe. Este incremento, en ningún caso superó los límites de concentración establecidos por el proyecto de norma chilena (Tabla 9). En general esta tendencia a incrementar levemente las concentraciones de los metales al incorporar lodos y compost se repite también para las incubaciones San Pedro y Tanumé.

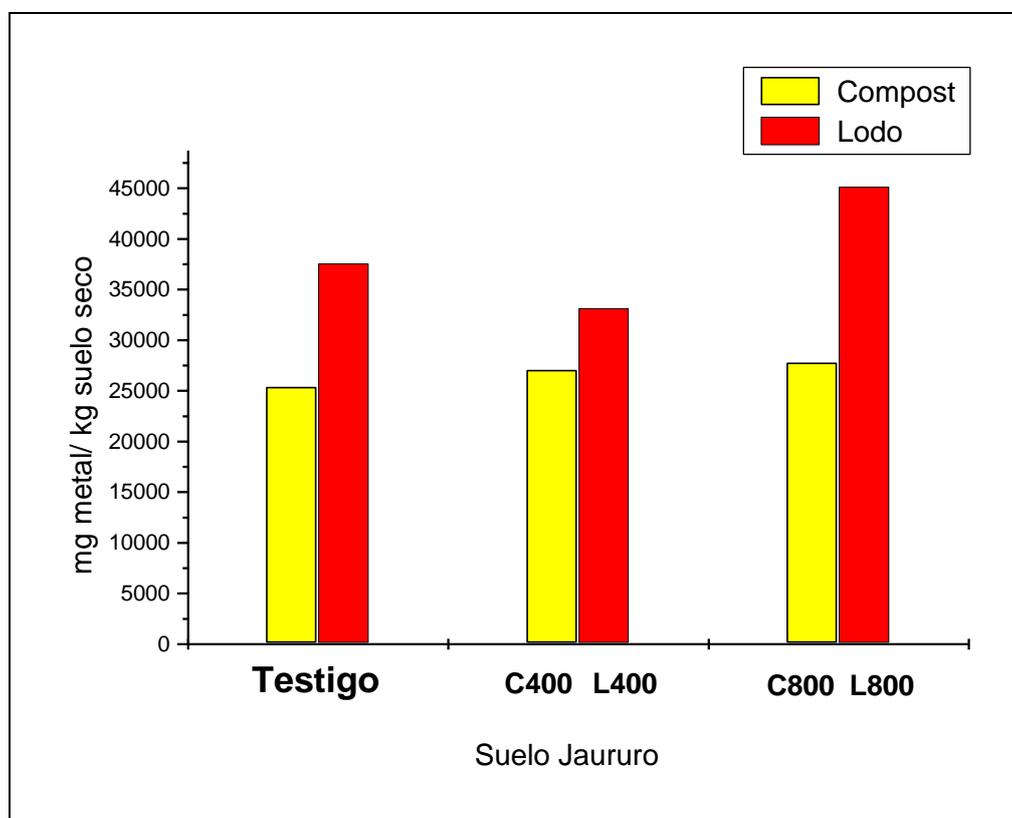


Figura 15: Contenido total de Fe en suelos Jaururo acondicionados con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost.

El potasio (Figura 16) mostró altos niveles de concentración en las incubaciones Jaururo comparado con los valores registrados en los otros suelos y con los otros nutrientes, dichos niveles no difieren entre suelos con lodo o lodo compostado. Los árboles absorben K en cantidades relativamente grandes y por fortuna se halla en la mayor parte de los suelos en cantidades considerables, situación que se refleja en este caso. Como los árboles hacen circular el K de manera eficiente, raramente se encuentran en los suelos forestales deficiencias de este elemento.

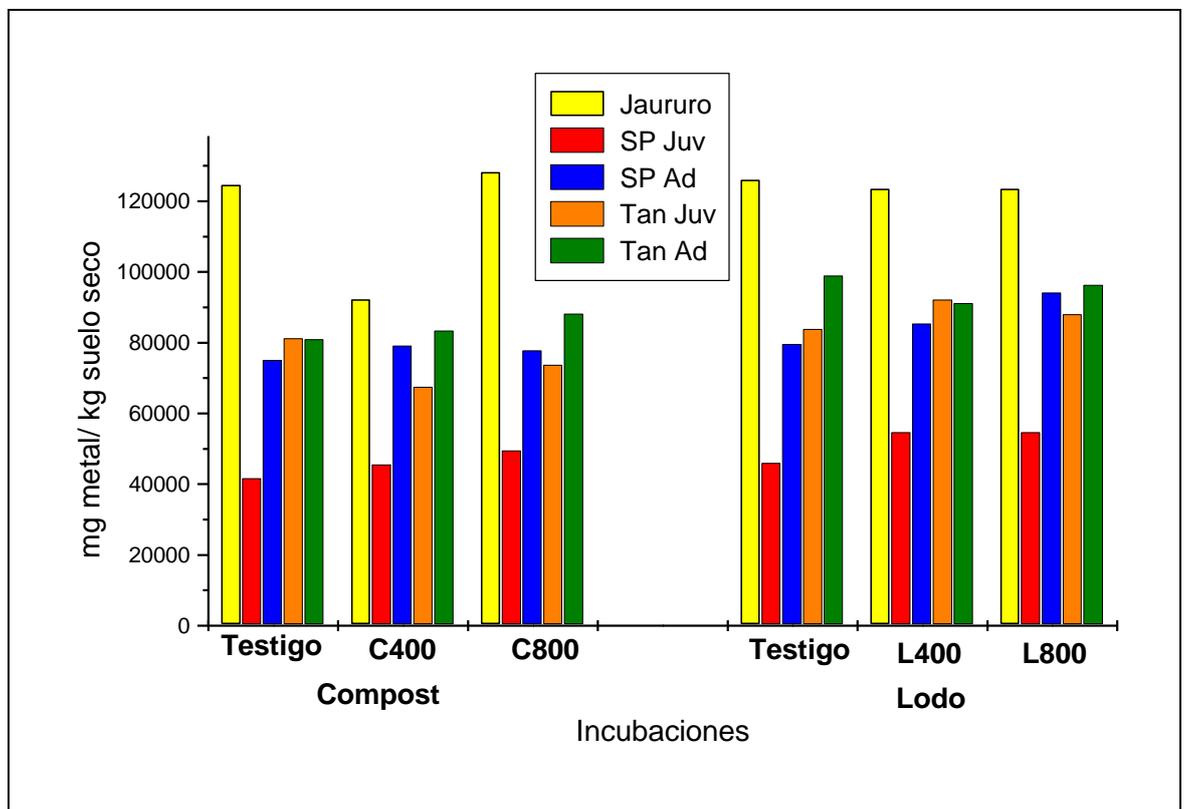
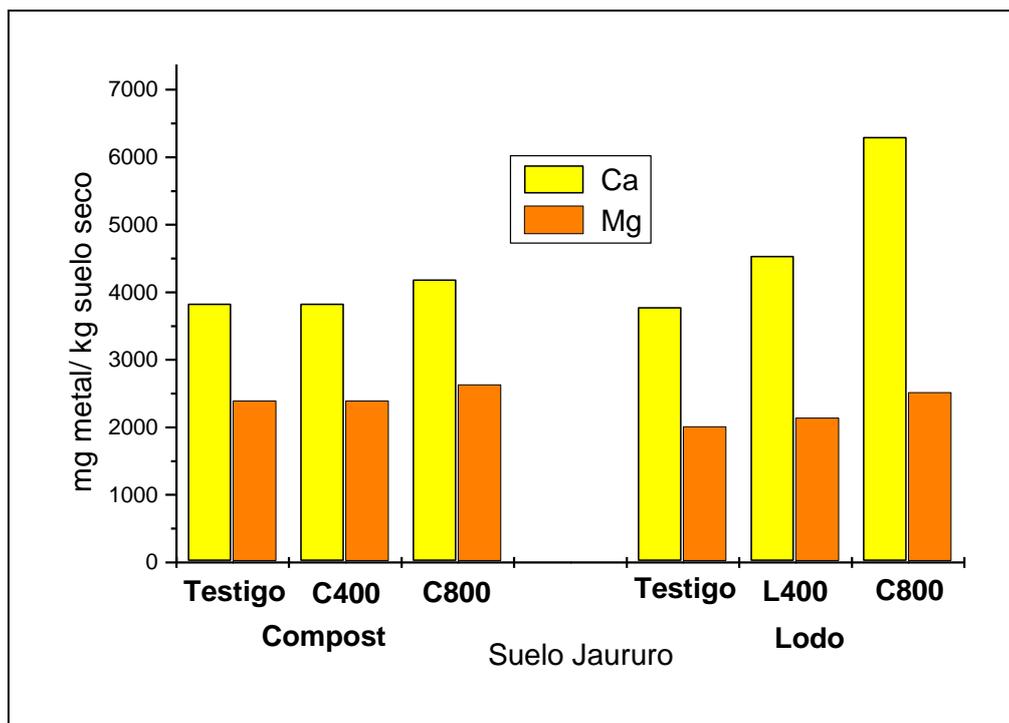


Figura 16: Contenido total de K en incubaciones acondicionadas con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost.

En cuanto al Ca y Mg el aumento en todas las incubaciones producto de las dosis aplicadas, tomando los testigos como referencia, también es leve y se puede apreciar al observar las Figuras 17, 18 y 19. Así como el K, los árboles consumen Ca y Mg en cantidades relativamente grandes, pero raramente hay deficiencias de estos elementos en los suelos forestales. Se ve que existe un aporte positivo por parte de los acondicionadores, lodos y compost. La concentración de Ca es mayor en las dosis 800 en lodos y compost, tanto en los suelos Jaururo como en los San Pedro y Tanumé. Sin embargo, sobresalen los suelos Jaururo donde esta concentración alcanza valores del orden de los 6000 ppm aproximadamente para la aplicación de lodo y 4500 ppm para compost, valores superiores a los observados en los otros suelos incubados.



**Figura 17: Contenido total de Ca y Mg en las incubaciones suelos Jaururo acondicionadas con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost.**

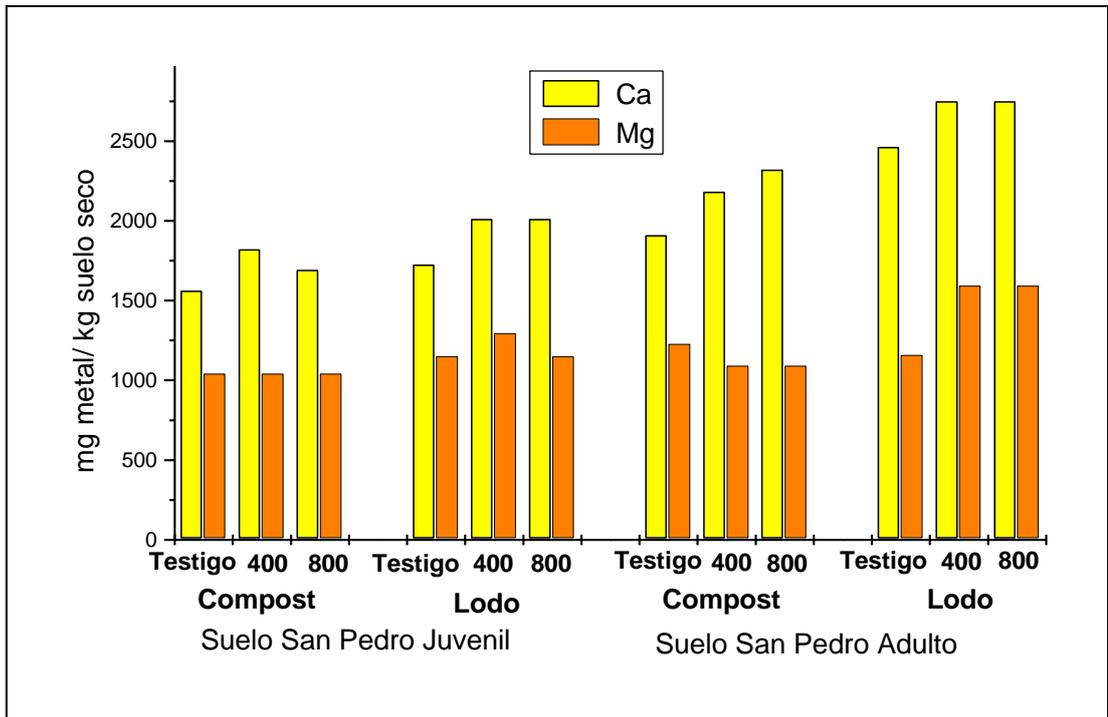


Figura 18: Contenido total de Ca y Mg en las incubaciones suelos San Pedro y Tanumé acondicionadas con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost

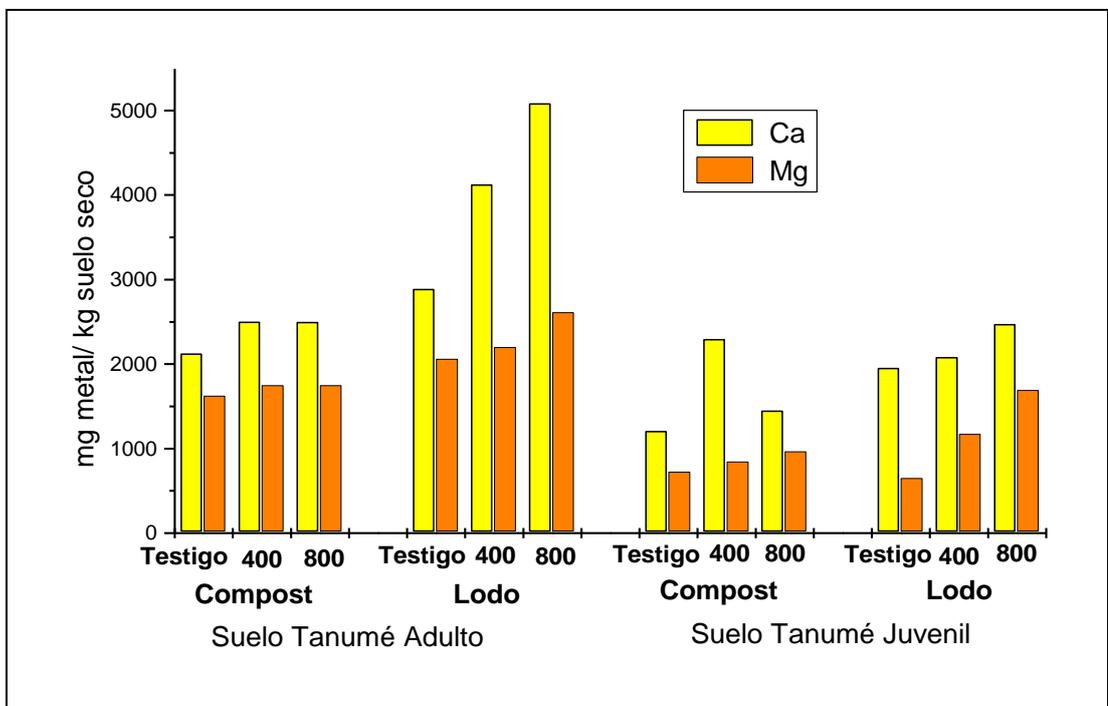
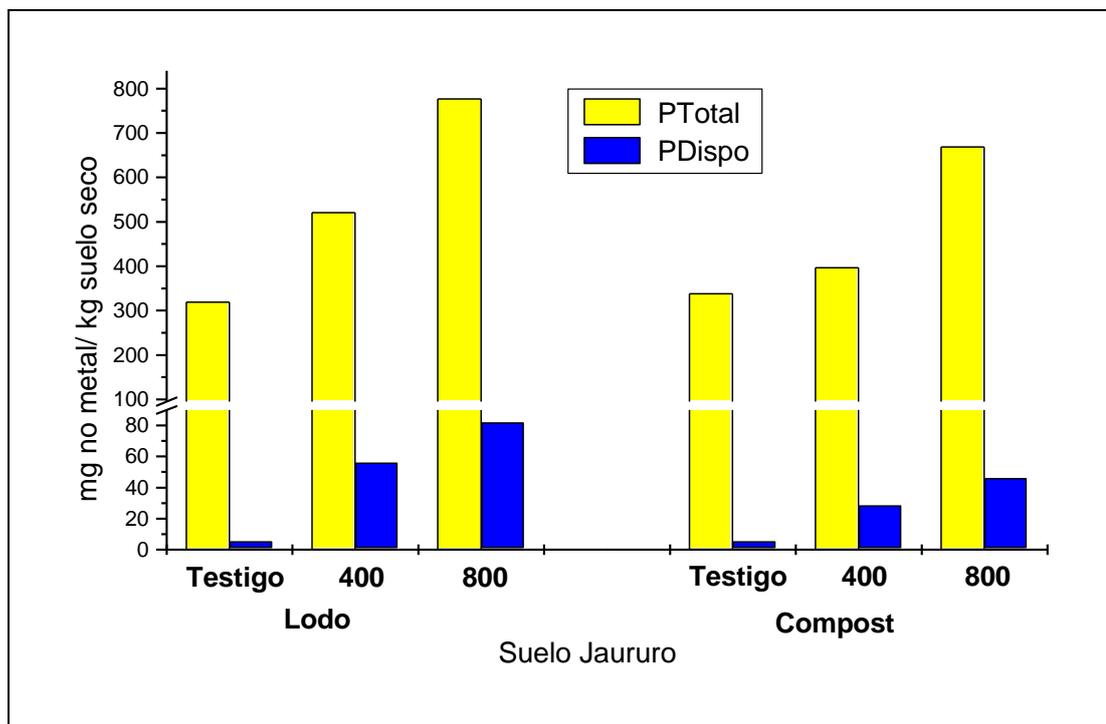


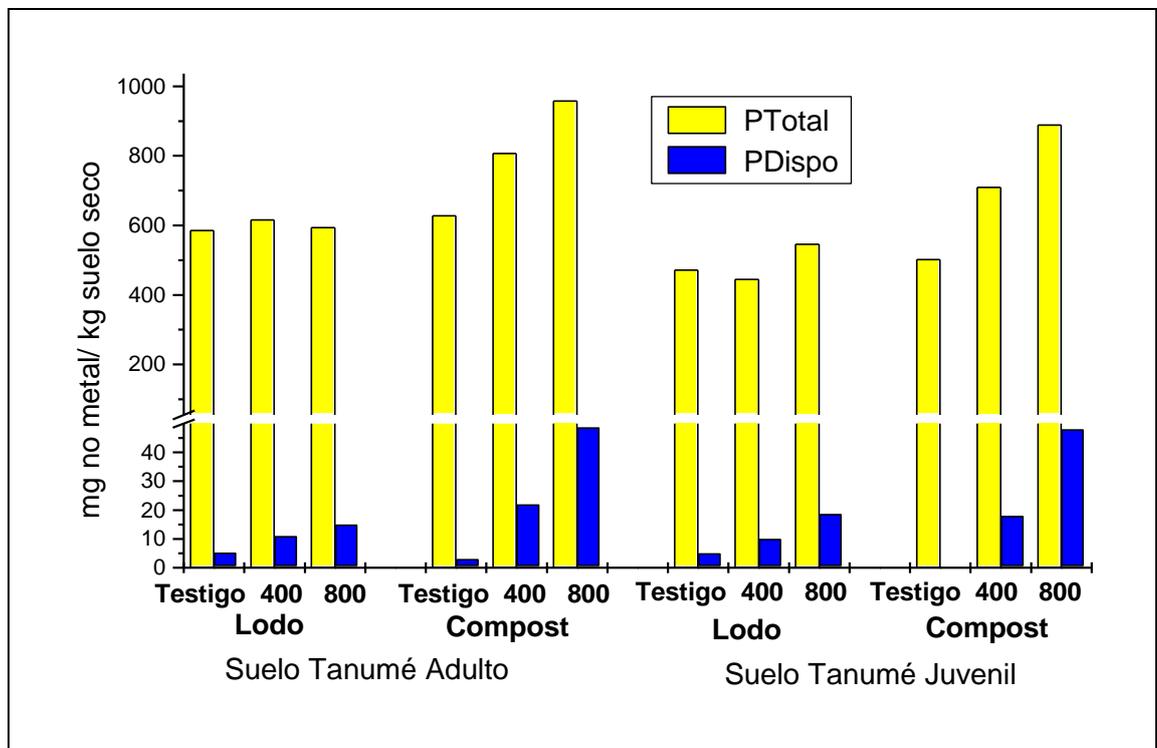
Figura 19: Contenido total de Ca y Mg en las incubaciones suelos San Pedro y Tanumé acondicionadas con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost

El P muestra, un leve incremento en su concentración, tomando como referencia la concentración de éste en los suelos testigos incubados, justificando el uso de lodos y compost como fertilizante fosfatado. A pesar que las dosis aplicadas de estos acondicionadores (15 y 30 ton ha<sup>-1</sup>) son una el doble de la otra, su aporte en forma individual en los suelos incubados no es tan marcado basándose en la diferencia de material orgánico nutritivo aplicado en cada dosis. El P al ser un elemento esencial en procesos de transferencia de energía debiese encontrarse en los suelos en niveles adecuados que permitan un desarrollo edafológico óptimo. El pH de las incubaciones se encuentra entre valores apropiados para suelos forestales 4.5 y 6.5, estos valores permiten condiciones favorables para la biodisponibilidad del P por parte de los árboles. En condiciones muy ácidas donde suelen hallarse cierta cantidad de Fe, Al y Mn solubles, suelen ocurrir reacciones con los iones fosfatos, haciendo que el P se vuelva insoluble y no disponible para el consumo de la mayor parte de las plantas. Estas reacciones de los iones fosfatos con el Fe, Al y Mn dan por resultado la formación de los hidroxifosfatos.



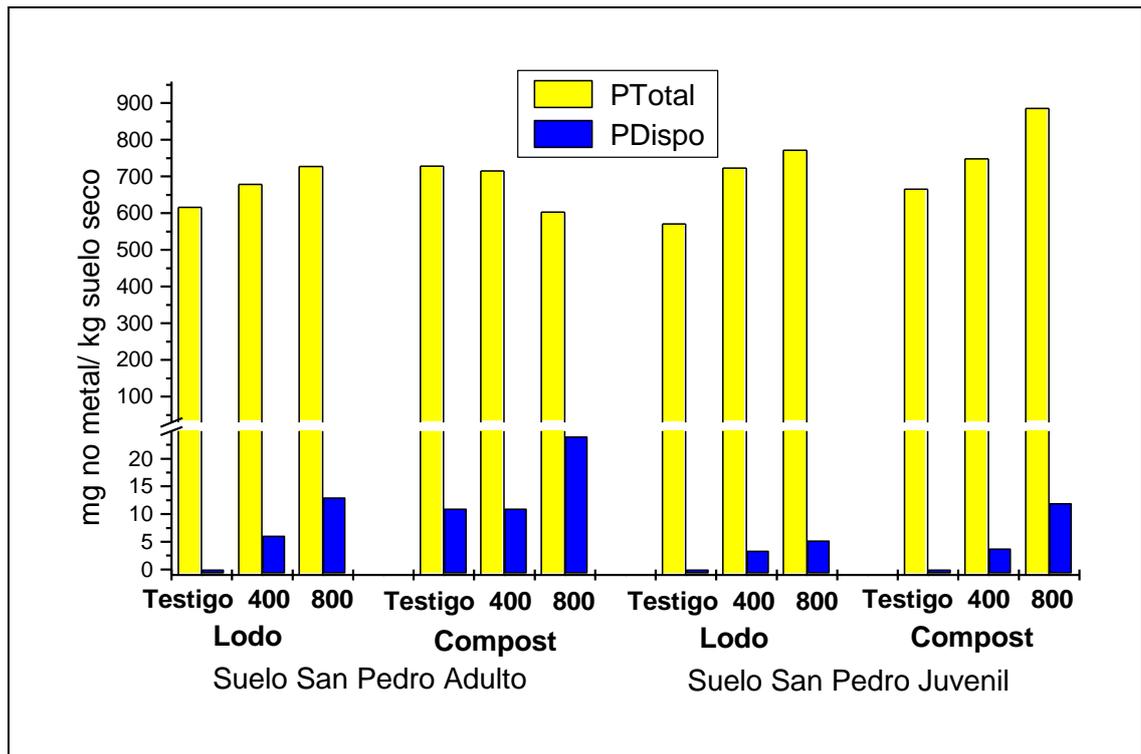
**Figura 20: Contenido de P total y P disponible en las incubaciones suelos Jaururo acondicionadas con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost**

La cantidad de P en la solución del suelo en cualquier tiempo dado es muy baja y la cantidad disponible se ve influenciada por diversos factores. Por lo general, hay menos P en los suelos que sostienen cultivos de coníferas, esto también pudo presentarse en las incubaciones donde los niveles de P disponible en suelos Jaururo con plantaciones de Eucaliptos (Figura 20) alcanzan niveles de 82 y 46 ppm, para lodo y compost respectivamente con sus dosis mas altas de aplicación, valores superiores a los observados en los otros suelos con plantaciones de *Pinus radiata*. (Figura 21 y 22)



**Figura 21: Contenido de P total y P disponible en las incubaciones suelos Tanumé Juvenil y Adulto acondicionadas con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost**

El aporte de lodos y compost, evidencia que aumenta de manera leve la concentración de P disponible considerando que son valores pequeños (inferiores a 50 ppm) y de manera un poco mas notoria la de P total producto de la aplicación directa de acondicionadores a los suelos incubados. Difiere un poco el aporte que hacen a los suelos tanto lodos como compost.

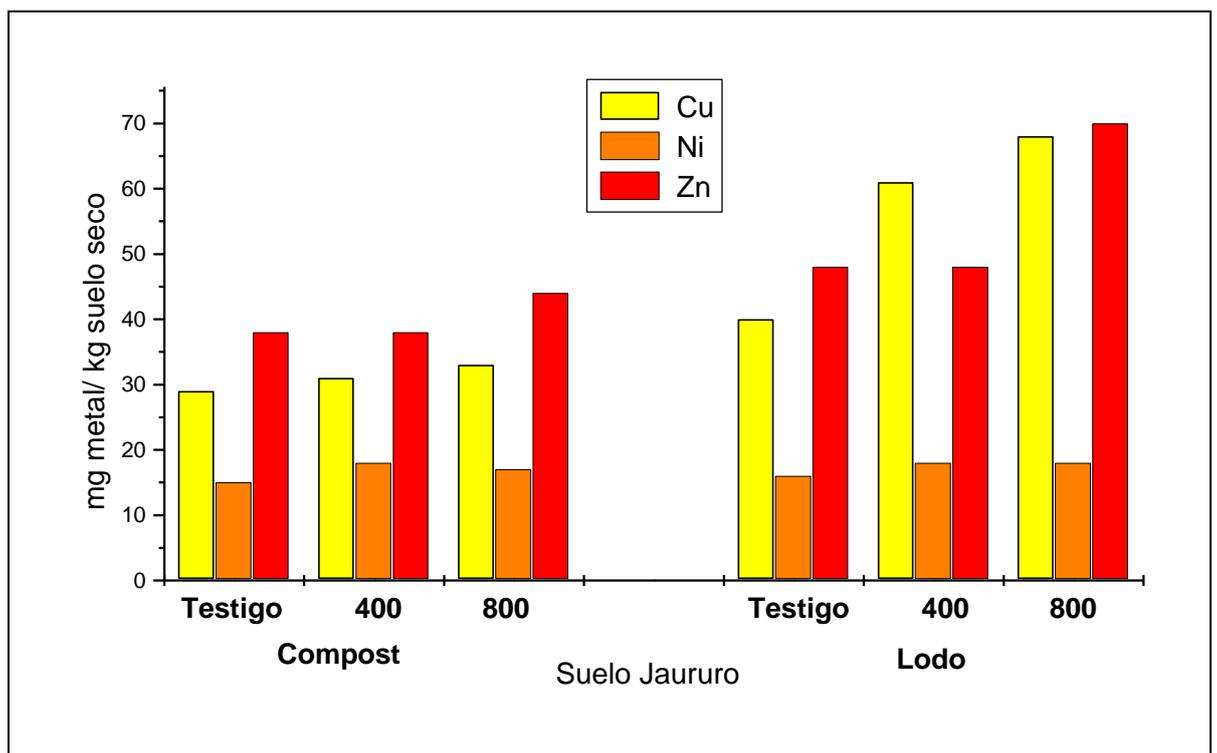


**Figura 22: Contenido de P total y P disponible en las incubaciones suelos San Pedro Juvenil y Adulto acondicionadas con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost.**

Salvo Jaururo (Figura 20), donde la concentración de P disponible es mayor producto de la adición de lodo, las otras incubaciones muestran que los valores mas altos de esta forma de P son debido a las aplicaciones de compost, material estabilizado y rico en carbono que sustenta la actividad microbiana en los suelos. Este notorio aporte nutritivo que hace el lodo compostado sobre la concentración de P disponible en los suelos de las incubaciones puede solucionar problemas de biodisponibilidad de este elemento cuando por lixiviación pasa a horizontes inferiores, lugar donde los fosfatos no son fácilmente asequibles a los árboles jóvenes y se debe recurrir a la utilización de fertilizantes fosfatados los cuales

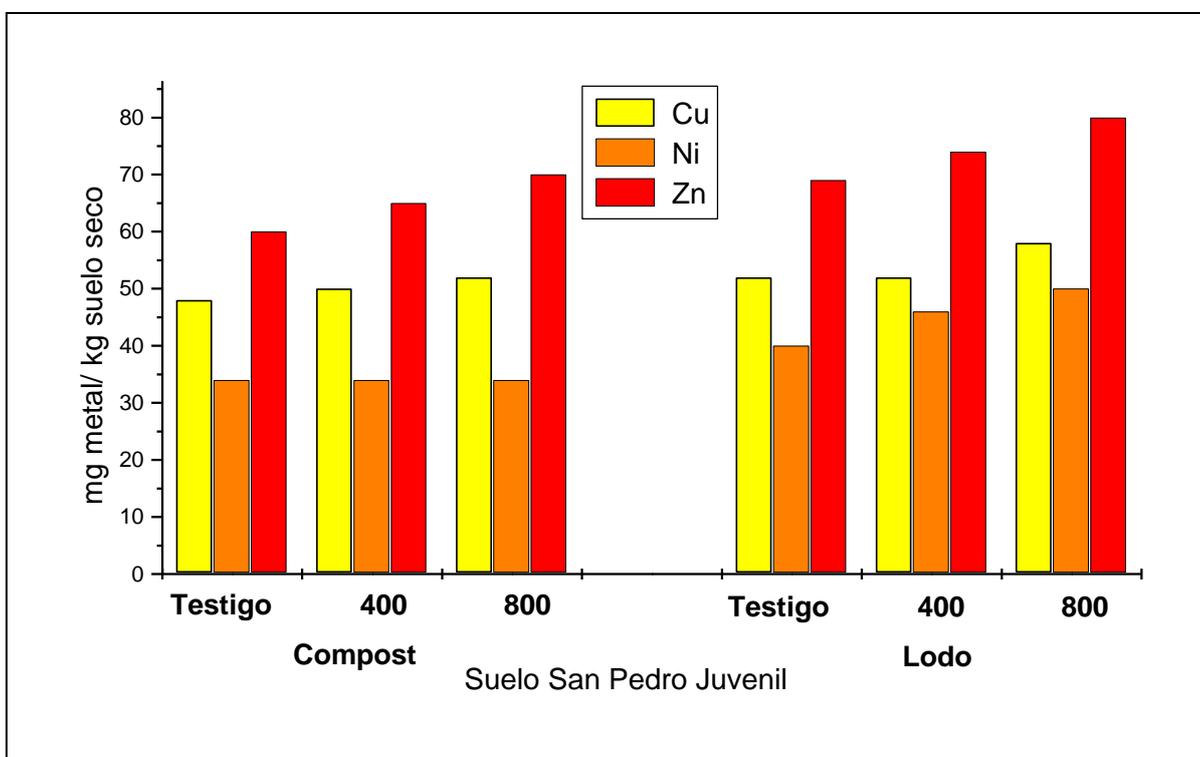
contribuyen al desarrollo de las raíces y con frecuencia quedan disponibles en el suelo durante muchos años después de la fertilización.

En cuanto a los micro elementos, también muestran una tendencia a incrementar levemente su concentración en los suelos producto del aumento de las dosis aplicadas. El aporte que hacen a los suelos lodos y compost, en el contenido de materia orgánica que entregan, hacen que aumente la capacidad de adsorber cationes que se encuentran disponibles en la solución del suelo, es decir la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Este aporte de material orgánico, se traduce en el contenido de ácido húmico que contienen lodos y lodos compostados, el cual presenta valores más altos tanto en el balance de C y N de los lodos (Tablas 2 y 3). Este mayor contenido de ácido húmico permite obtener (disolver) más nutrientes a partir de los minerales del suelo.

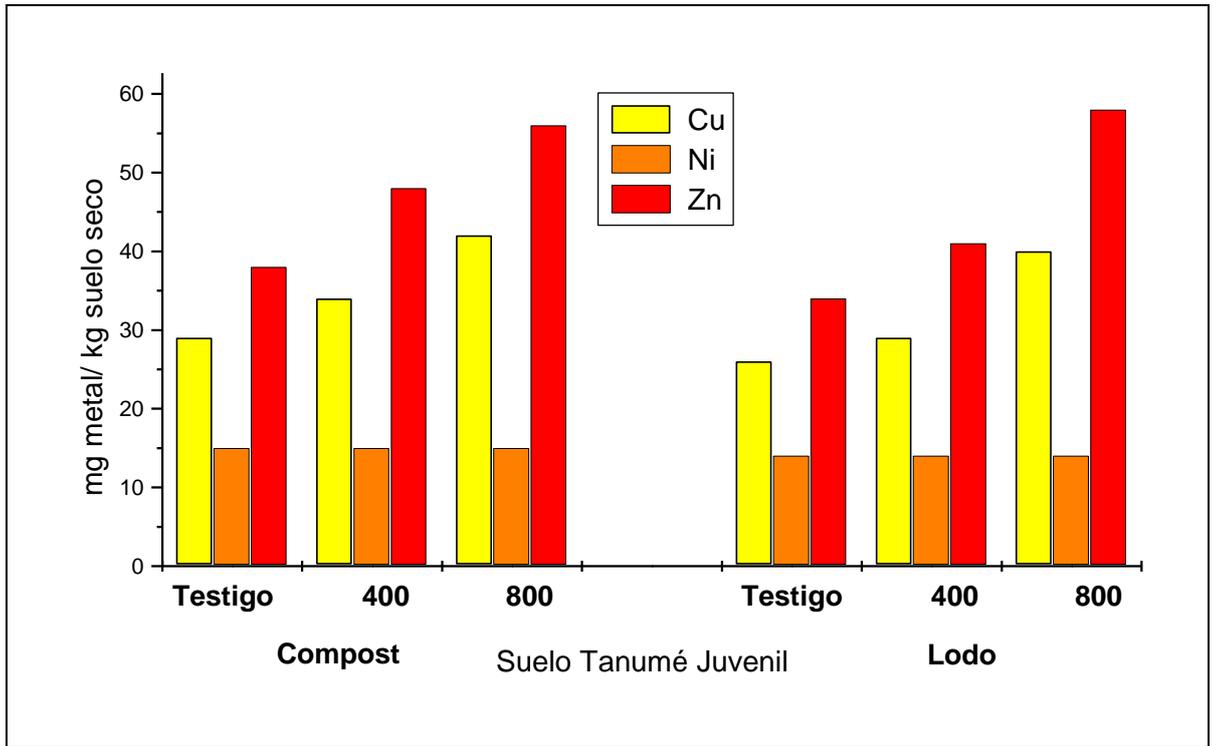


**Figura 23: Contenido de metal total Cu, Ni y Zn en las incubaciones suelos Jaururo acondicionadas con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost.**

En la Figura 23 se grafica lo que ocurre en forma más frecuente, donde se pone de manifiesto que en casi la mayoría de los casos las incubaciones suelo-lodo muestran valores más altos de concentración a medida que la dosis aumenta, que las incubaciones suelo-compost. Dicho comportamiento se refleja tanto en el contenido de nutrientes y contaminantes. El caso del Cu, Ni, Zn comprueban con sus niveles lo descrito (Figuras 24 y 25) donde suelos con plantaciones juveniles San Pedro y Tanumé se utilizaron para graficar dicha situación, la cual es similar para las plantaciones adultas. También las concentraciones registradas tanto para el Fe y Mn se incrementan levemente a medida que el aporte orgánico lo hace. Asimismo, en el Cu un leve incremento entre el testigo y las dosis aplicadas se aprecia para todos los suelos incubados tanto con lodos como compost, sin embargo, su concentración no muestra variación entre uno u otro material acondicionador del suelo en el caso de las incubaciones San Pedro y Tanumé. Tanto las concentraciones de Pb y Cd como de todos los otros elementos se encuentran muy por debajo de las normas chilenas. Evidenciando que los niveles de toxicidad de los materiales aplicados a los suelos es casi nula.



**Figura 24: Contenido de metal total Cu, Ni y Zn en las incubaciones suelos San Pedro Juvenil acondicionadas con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost.**



**Figura 25: Contenido de metal total Cu, Ni y Zn en las incubaciones suelos Tanumé Juvenil acondicionadas con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost.**

### **4.3 Efectos de la adición de lodos y compost en el contenido de metales solubles en incubaciones**

#### **4.3.1 Contenido de metales solubles en agua y tiempo de incubación**

Se realizaron tres extracciones de las incubaciones suelo-lodo y suelo-compost, las cuales se comenzaron a incubar en septiembre del año pasado, la primera extracción se tomó al tercer mes de comenzada la incubación (diciembre), la segunda extracción al sexto mes (marzo) y la tercera extracción al octavo mes (mayo).

El aporte de lodos y compost en todos los suelos generó leves incrementos en las concentraciones de los metales estudiados por la aplicación de material orgánico proveniente de lodos y compost. Al observar la Figura 26 podría decirse que la extractabilidad disminuye a medida que el tiempo de incubación transcurre. La baja disponibilidad de los elementos metálicos en los suelos incubados, que corresponde a lo extraíble con agua, indicaría que se encuentran retenidos con fuerza ya que no es posible extraerlos con el modelo de extracción que imita lo que ocurriría con el agua de lluvia [7]. Esto sería acorde con los efectos físicos y químicos que tienen lugar en los suelos producto de la incorporación de materia orgánica. La presencia de un tipo de arcilla estaría relacionado con la CIC de los suelos, las arcillas tienen carga neta negativa en su superficie, por tanto los cationes son adsorbidos en la superficie y al mismo tiempo, algunos de ellos pueden ser desorbidos y de esta manera estarían disponibles en la solución del suelo. Además del tipo de arcilla de los suelos, son la materia orgánica y en general la composición mineralógica de los mismos los responsables de la CIC de los suelos. La materia orgánica tiene una alta CIC que le permite fijar y retener cationes evitando su pérdida por lixiviación [6]. El K, Ca y Mg reflejan esta situación donde de valores en la primera extracción del orden de los 10000-20000 mg/kg para el K, bajó a valores aproximados de 100 mg/kg en la última extracción (Figuras 26 y 27). El K, Ca y Mg (Ca graficado en las Figuras 28 y 29), son los macro nutrientes más abundantes y presentan valores bastante variables en las incubaciones de lodos y compost lo que se refleja al estudiar su concentración y su respectiva solubilidad en agua, comparados con los valores de los macro y micro elementos que en

promedio solo llegan a 1 mg/kg, encontrándose estos últimos, casi en todos los casos, bajo el límite de detección del método de absorción atómica.

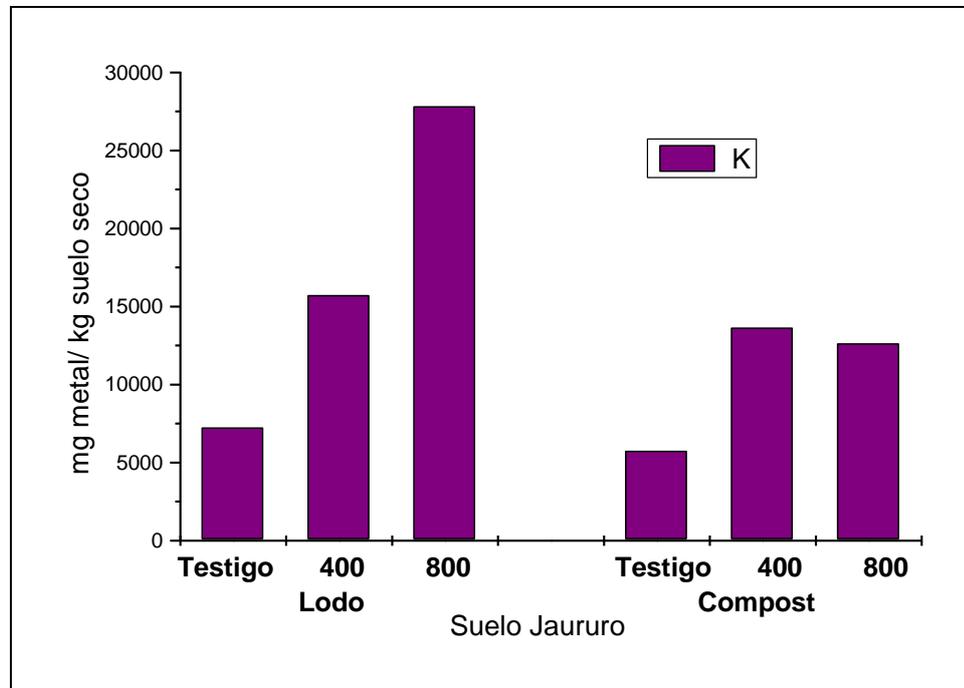


Figura 26: Contenido de K solubilizado en la 1ª Extracción en las incubaciones suelos Jaururo acondicionadas con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost.

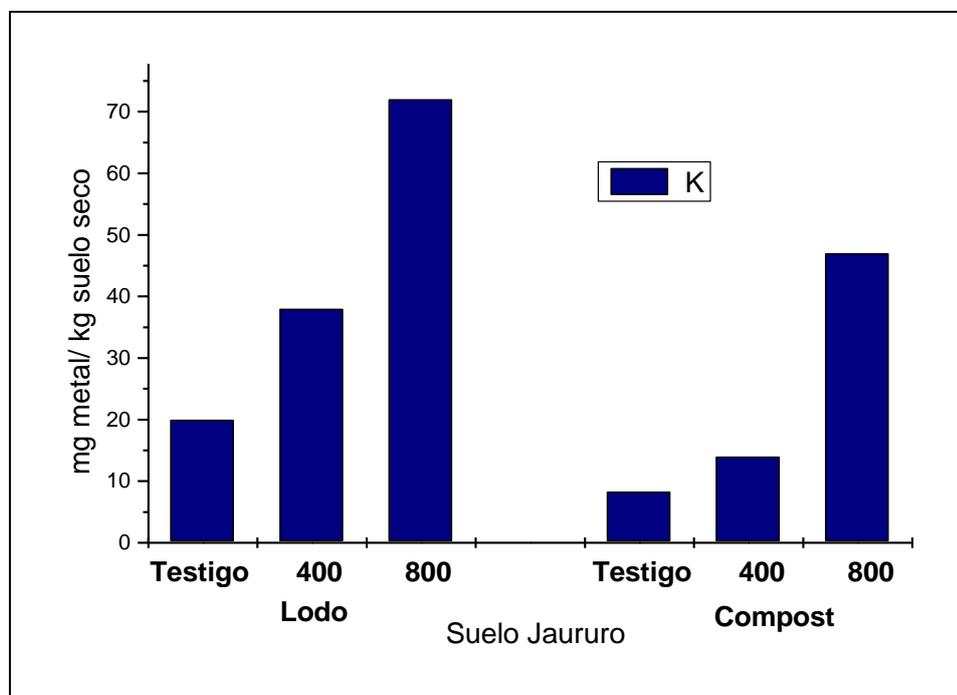


Figura 27: Contenido de K solubilizado en la 3ª Extracción en los suelos incubados Jaururo acondicionados con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost.

El mantener la humedad en forma controlada en las incubaciones es sinónimo de proporcionar constantemente agua que es el vehículo que permite el paso de cationes, desde la fase sólida del suelo a la raíz de los árboles, en el caso de suelos en terreno. Sin agua, no es posible la movilidad de nutrientes ni el proceso de intercambio de aniones o cationes [13]. En las mediciones realizadas con las incubaciones, los resultados de la primera de éstas (diciembre) difieren de las otras dos (marzo y mayo) lo que se podría atribuirse a la falta de control en la humedad durante el mes de febrero. En la segunda medición (marzo) los valores de concentración de los elementos muestran comportamientos que discrepan con los valores que los anteceden y preceden.

La materia orgánica permite retener temporalmente aniones como sulfatos, fosfatos y boratos, evitando que se pierdan por lavado o que precipiten como sales insolubles [13]. Además puede incorporar en su estructura compleja, micro elementos como Fe, Co y Zn formando complejos organo-metálicos llamados quelatos. La materia orgánica al promover una mejor agregación de unidades estructurales y mayor estabilidad de la estructura de los suelos permite que con el transcurso del tiempo de incubación los metales pasen a formar parte de los complejos presentes en éstos. En general, los micro elementos no mostraron variaciones importantes de solubilidad durante el transcurso de la incubación, encontrándose siempre bajo los niveles de detección del método.

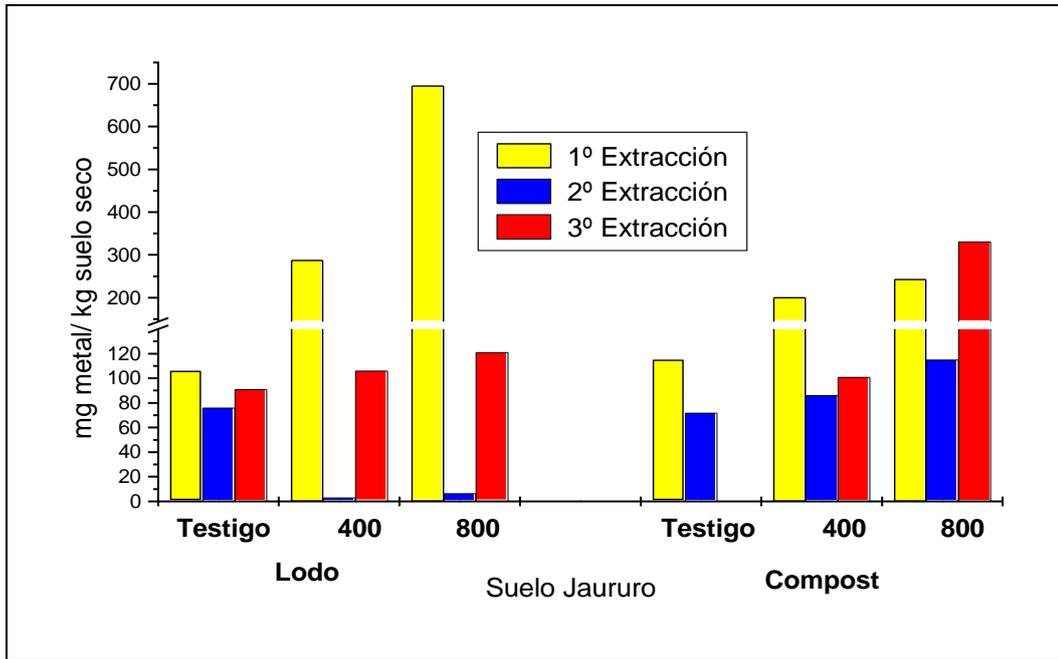


Figura 28: Contenido de Ca solubilizado en las Extracciones con agua en los suelos incubados Jaururo acondicionados con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost.

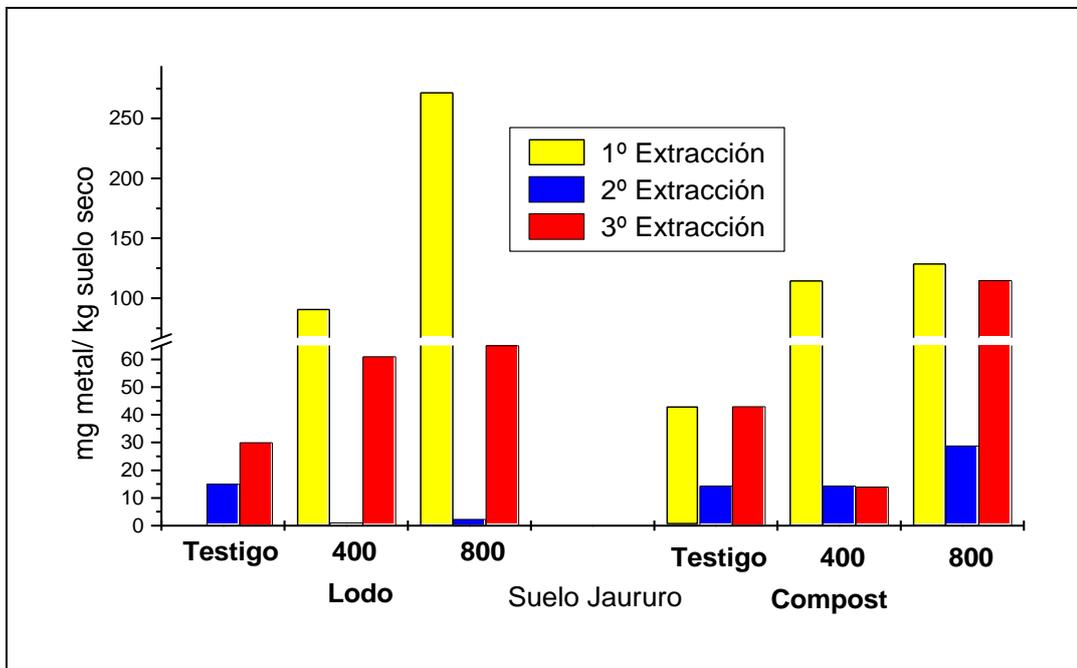


Figura 29: Contenido de Mg solubilizado en las Extracciones con agua en los suelos incubados Jaururo acondicionados con 0, 15 y 30 ton ha<sup>-1</sup> de lodo y compost.

El tiempo de incubación es un referente importante para tener en cuenta cuando se analiza la extractabilidad y disponibilidad de los metales en el suelo. La mineralización que probablemente tuvo lugar en las incubaciones producto de la adición de material orgánico, sería en definitiva responsable de la liberación de nutrientes y la formación de estructuras complejas estables con distintos metales en los suelos. En la primera extracción, los niveles de concentración de macro nutrientes que a pesar de ser valores pequeños disminuyen con respecto a los registrados en la última medición, reflejarían que dicha disminución podría estar relacionada con la actividad enzimática de las incubaciones [27], la cual también disminuye con el tiempo, siendo mas activa en sus inicios cuando el material orgánico es recién incorporado.

Si durante los inicios de la incubación la actividad enzimática y mineralización son mayores en los suelos incubados con lodos y compost, por ende el movimiento de macro nutrientes será mayor que trascurrido cierto tiempo, indicando que se encontrarían retenidos con fuerza ya que no es posible extraerlos. Esto permite afirmar que el uso de lodos y compost no daña el medio ambiente y su uso no contaminaría napas subterráneas o cursos de agua cercanos. .

#### **4.3.2 Contenido de metales solubles en acetato de amonio y bicarbonato de sodio de los suelos incubados**

El metal en las distintas fracciones del suelo varía considerablemente con su reactividad química y su biodisponibilidad [8]. Se puede obtener mayor información separando el contenido total del metal en formas lábiles (entre éstas las formas solubles e intercambiables consideradas como equivalentes al metal biodisponible) y no lábiles. Esto se logra a través de procedimientos que involucran una sola extracción o bien extracciones sucesivas del elemento [5].

Al observar las Figuras 30 y 31 ambos extractantes usados, bicarbonato y acetato, difieren levemente en los niveles de concentración de los metales solubilizados por cada uno.

La metodología de Tessier y modificada por Howard y Shu [25] describen que las fracciones mas lábiles de los metales se encuentran en formas intercambiables y unidas a carbonato.

Las concentraciones de metales solubles en ambos extractantes para lodos y compost, son muy bajas, encontrándose casi en todos los casos bajo el límite de detección del método de absorción atómica. En general, para los micro elementos Fe, Cu, Ni, Zn, Mn y Pb se observan bajos niveles de concentración (inferiores a 1 mg/kg) por lo tanto bajo los límites de detección, lo que se traduce en que las formas lábiles de los metales son las que menos predominan en la solución del suelo (incubaciones).

Del mismo modo como se analizaron los resultados para las extracciones con agua donde se veía una disminución de la solubilidad, indicando esto, que los elementos metálicos son retenidos con fuerza, el uso de otros extractantes también muestra una situación similar. El tiempo de incubación estaría afectando la disponibilidad de los elementos metálicos, aportados por el material orgánico proveniente de lodos y lodos compostados, en ambas incubaciones. El proceso de incubación provoca diferentes efectos en los suelos, relacionados con la materia orgánica agregada a través de biosólidos y compost en los suelos, donde ésta actúa como superficie absorbente de ciertos metales provocando su retención a través de uniones fuertes entre los metales y algunos grupos funcionales de la materia orgánica, formando compuestos estables tipo quelatos [28].

En el caso de los micro nutrientes lo extraíble ya sea con acetato o bicarbonato no muestra diferencias considerables cuando se trata de lodo o de compost, en ambos casos los niveles no son detectables por el método empleado.

Los macro nutrientes Ca, Mg y K (Figura 30 y 31) mostraron mayores niveles de concentración de metales extraíbles, en los suelos con lodo y compost para los extractos con acetato que con bicarbonato, para ilustrar dicha situación se eligieron los extractos de los suelos Jaururo.

En todo caso se puede concluir que la disponibilidad de los elementos metálicos correspondiente en este caso a los extractos con acetato y bicarbonato no se incrementan notoriamente a pesar de que los mecanismos de extracción de estos solventes son superiores al agua sola.

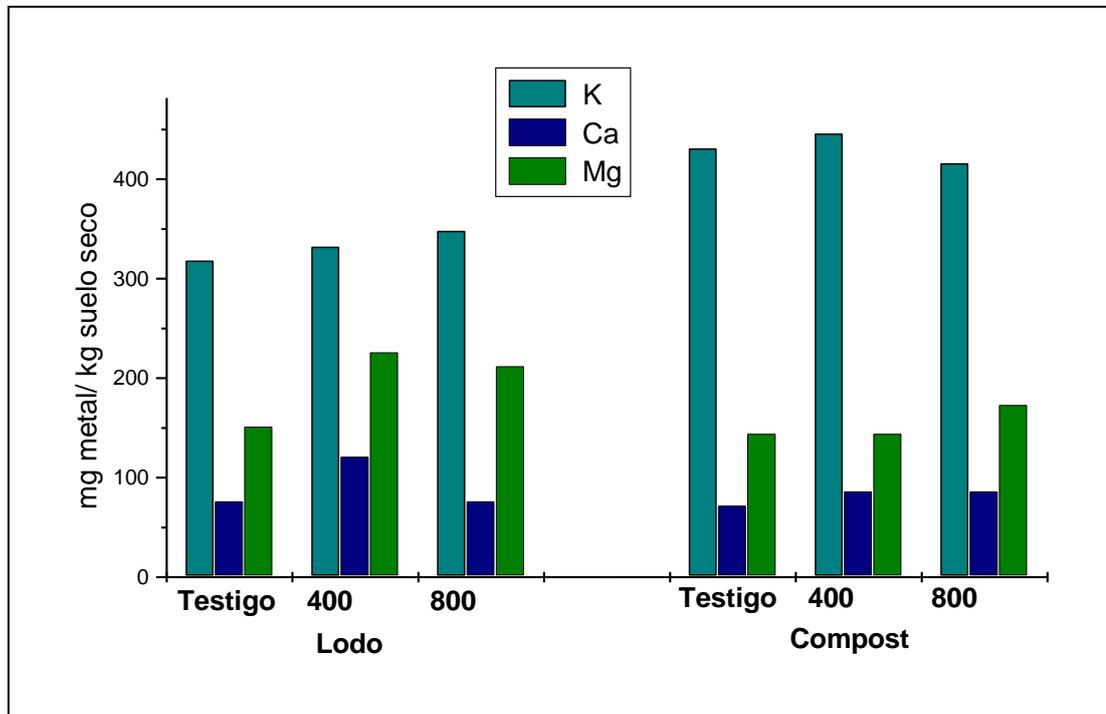


Figura 30: Concentración de K, Ca y Mg solubles en  $\text{NaHCO}_3$  en los suelos incubados Jaururo con lodos y compost

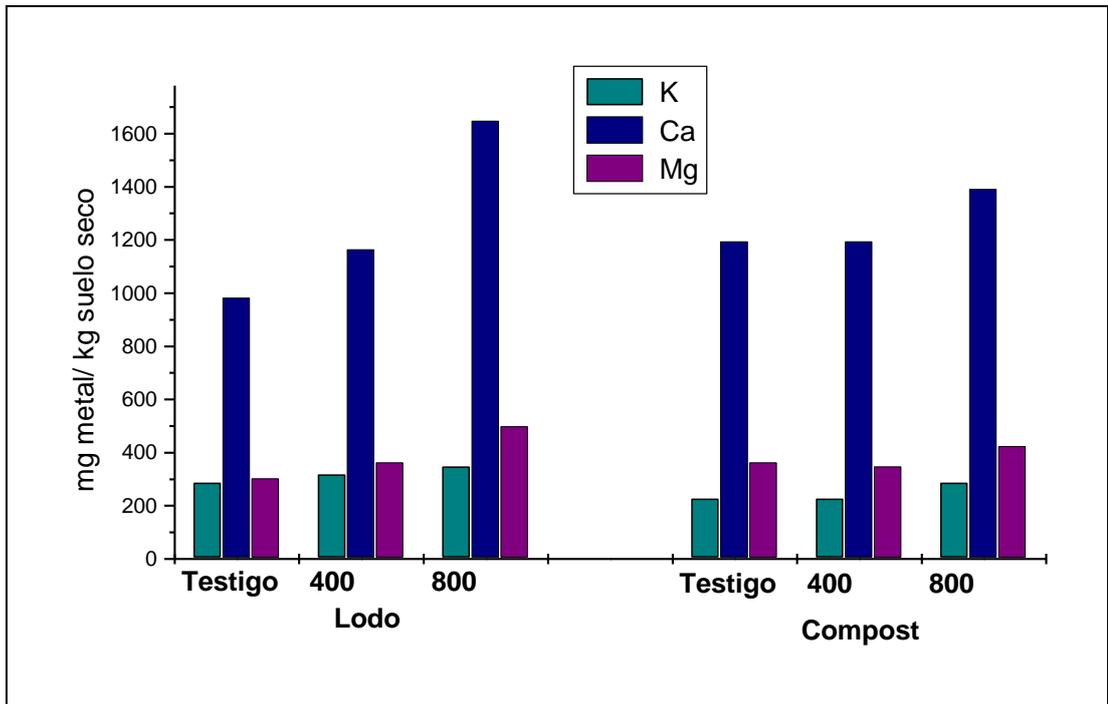


Figura 31: Concentración de K, Ca y Mg solubles en  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  en los suelos incubados Jaururo con lodos y compost

## CONCLUSIONES

El trabajo y el tema de tesis realizado, permiten concluir en base a los resultados experimentales obtenidos, que el uso de lodos y compost en suelos forestales como mejoradores de éstos, no influye en forma negativa alguna sobre los niveles de macro y micro elementos.

Lodos y compost presentan valores de pH adecuados para su uso en suelos forestales y su incorporación en los suelos no modificó de manera notoria los valores de pH de éstos, como para causar problemas con la disponibilidad de los metales. En la experiencia en terreno, los suelos evaluados Jaururo y San Pedro, tendían a ser ácidos y el valor de pH aumentaba con la profundidad de los perfiles. En los suelos incubados el pH no mostró grandes variaciones entre los testigos y las dosis aplicadas.

El contenido de metales nutrientes, presentes en lodos y compost, es adecuado para el crecimiento de especies forestales y los metales contaminantes resultan inocuos para su aplicación en suelos por estar muy por debajo de lo establecido por la Norma Chilena. Esto evidencia que los tratamientos que se les aplican a los lodos sanitarios para hacerlos aptos para su uso, en este caso en suelos forestales, son eficientes y que los variados factores de los que depende el compostaje permiten dar un material orgánico adecuado.

En la experiencia en terreno los suelos mostraron que entre perfiles se apreciaban leves diferencias de concentración de elementos. Los micro elementos se encontraron siempre en bajas concentraciones, por lo general, bajo el límite de detección de la técnica empleada. Entre dosis aplicadas tampoco se registraron diferencias apreciables en los niveles de concentración de macro y micro elementos. Esto deja en evidencia que las dosis de aplicación no reflejan el aporte y cantidad de material orgánico proporcionado por los biosólidos a los suelos. El responsable de las diferencias registradas en las mediciones es el propio terreno, la variabilidad misma de un sistema dinámico en constante transformación.

En las incubaciones se registraron leves incrementos en los niveles de concentración de macro y micro elementos a medida que aumentaba la dosis de aplicación. Sin embargo, los metales pesados se mantuvieron bajo los niveles permitidos y los macro nutrientes se vieron beneficiados en forma positiva al recibir

la materia orgánica proveniente de lodos y compost y entre éstos no se aprecian diferencias notorias.

En cuanto a las experiencias de solubilidad realizadas con agua que simularía lo que ocurre en los suelos con el agua lluvia, en tres tiempos distintos de la incubación, se aprecia una baja capacidad de extracción, es decir, una baja solubilidad de los elementos metálicos en los suelos incubados, que corresponde a lo extraíble con agua indicando que se encontrarían retenidos con fuerza ya que no es posible extraerlos con facilidad. La incorporación de materia orgánica a los suelos, como lodos y compost, estaría mejorando su capacidad de retención y calidad estructurante. En forma similar el uso de los extractantes bicarbonato y acetato, demuestra que a pesar de que poseen fuerzas de extracción superiores al agua, tampoco extraen en forma importante los macro y micro elementos presentes en los suelos. Esto permite afirmar que el uso de lodos y compost no daña el medio ambiente y su uso no contaminaría napas subterráneas o cursos de agua cercanos.

Los altos niveles de nitrógeno presentes en los lodos de las plantas de tratamientos y los niveles de carbono presentes en los residuos forestales los convierten en materiales idóneos para la realización del compostaje. Convirtiéndose esto en una salida útil y beneficiosa para ambos residuos, ya sea al utilizar en forma individual los lodos sanitarios debidamente tratados o como parte del compost. Las relaciones C/N en lodos son del orden de 6, mientras que en los compost 16, lo que demuestra que en éstos últimos se diluye el contenido de N, originándose un producto más estable, lo que podría asegurar una mayor permanencia y futura disponibilidad de este elemento en el suelo.

El tiempo reducido durante el cual se realizó la incubación no permite afirmar con certeza absoluta que el aumento en los niveles de macro y micro elementos desde el punto de vista químico, se deba exclusivamente a la incorporación de lodos y compost a los suelos avalando la importancia de hacer experiencias en condiciones controladas, es decir, incubaciones en laboratorio. Además el no afectar en forma perjudicial a los suelos con la aplicación de lodos y compost permitiría experimentar con dosis de aplicación superiores.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILERA, M., Borie, G., Zunino, H., Espinoza, J., y Bown, H. 2002. "Caracterización del pool de carbono en lodos para su uso en suelos. En: IX CONGRESO NACIONAL DE LA CIENCIA DEL SUELO: 4 y 6 de noviembre de 2002. Talca, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad de Talca. p 253-255.
2. AGUILERA, M., Borie, G., Peirano, P., y Rodríguez, M. 2004. "Evaluación del impacto de reciclaje de residuos en suelos forestales". En: SIMPOSIO Residuos orgánicos y su uso en sistemas agroforestales: 5 y 6 de agosto de 2004. Temuco, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad de la Frontera. p 305-312.
3. AGUILERA, M., y Rodríguez, M. "Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales". Proyecto FONDEF D0111034. 2005. Santiago, Chile. Ed. Impresos Pirámide. 205p.
4. AHUMADA, I., Gudenschwager, O., Carrasco, M., Castillo, G., Sadzawka, M., y Ascar, L. 2004. "Influencia de la aplicación de biosólidos en la distribución y la disponibilidad de Cu y Zn en suelos cultivados con ballica y trébol". En: SIMPOSIO Residuos orgánicos y su uso en sistemas agroforestales: 5 y 6 de agosto de 2004. Temuco, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad de la Frontera. p 319-327
5. ALLENDE, P. "Distribución de cobre y cadmio en suelos: Efecto de la incorporación del metal y el cultivo de *Lactuca Sativa L*". Tesis Químico. 1998. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. 45p.
6. BORIE, G., Peirano, P., Espinoza, J., Zunino, H., y Aguilera, M. 2002. "Distribución del carbono en residuos orgánicos y su interacción con elementos metálicos, nutrientes y/o contaminantes". En: IX CONGRESO NACIONAL DE LA CIENCIA DEL SUELO: 4 y 6 de noviembre de 2002. Talca, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad de Talca. p 150-152.
7. BORIE, G., Peirano, P., Espinoza, J., Zunino, H., y Aguilera, M. 2004. "Evaluación de la cesión de nutrientes y metales pesados en perfiles de suelos y suelos adicionados con biosólidos". En: SIMPOSIO Residuos orgánicos y su uso en sistemas agroforestales: 5 y 6 de agosto de 2004. Temuco, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad de la Frontera. p 313-318.
8. CANET, R., Pomares, F., Tarazona, F., y Estela, M. "Sequential fractionation and plant availability of heavy metals as affected by sewage sludge applications to soil". 1998. *Commum Soil Sci Plant Anal.* 29:697-716.

9. COSTA, F., García, C., Hernández, T., y Polo, A. "Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización". 2º Edición. Murcia, España. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 1995. 173p.
10. ELLIES, A. 2004. "Efecto de la materia orgánica sobre la estructura del suelo". En: SIMPOSIO Residuos orgánicos y su uso en sistemas agroforestales: 5 y 6 de agosto de 2004. Temuco, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad de la Frontera. p 139-150.
11. FASSBENDER, H., y Bornemisza, E. "Química de Suelos con énfasis en América Latina". 2º Edición. San José, Costa Rica. Ed. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura. 1987. 420p.
12. FAÚNDEZ C, P. "Actividad microbiológica en suelos acondicionados con biosólidos cloacales frescos y compostados con residuos forestales". Tesis Ing. Agrónomo, mención Manejo de suelos y aguas. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. 2004. 64p.
13. GALLARDO, M. 2002. Guía Intercambio Catiónico. En: Curso Edafología Forestal. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 10p.
14. GARCÍA, A. "Actividad biológica global y mineralización neta del nitrógeno en tres suelos del valle de María Pinto acondicionados con material orgánico". Tesis Ing. Agrónomo. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. 1999. 70p.
15. GLYNN, J., y Heinke, G. "Ingeniería Ambiental". 2º Edición. México. Ed. Prentice Hall Hispanoamericana S.A. 1999. 800p.
16. INSTITUTO Nacional de Normalización. 2004. Lodos-Requisitos y condiciones para un plan de aplicación de suelos. Proyecto de Norma en consulta. Nch 2952.c2004.INN. Santiago, Chile. 25p.
17. JACKSON, L., Ramirez, L., y Murphee, R. "Effects of compost on soils and vegetable production". [en línea]. <[http://www.groups.ucanr.org/soilveg/Effects\\_of\\_compost\\_on\\_soils\\_and\\_vegetable\\_production/](http://www.groups.ucanr.org/soilveg/Effects_of_compost_on_soils_and_vegetable_production/)> [consulta: 07 marzo 2005].
18. KOURBOULEWSKY, N., Dupouyent, S., y Bonin, G. 2002. "Environmental risks of applying sewage sludge compost to vineyards: carbon, heavy metals, nitrogen and phosphorus accumulation". J. Environ. Qual. 31:1522-1527.
19. LASTRA, O., Peirano, p., Bown, H., y Rodríguez, M. 2002. "Evaluación de metales pesados en suelos forestales. En: IX CONGRESO NACIONAL DE LA CIENCIA DEL SUELO: 4 y 6 de noviembre de 2002. Talca, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad de Talca. p 419-422.

20. LASTRA, O., Corvalán, P., Hernández, P., y Rodríguez, M. 2004. "Evaluación nutricional de plantaciones de *Pinus Radiata D. Don* en la VI región". En: SIMPOSIO Residuos orgánicos y su uso en sistemas agroforestales: 5 y 6 de agosto de 2004. Temuco, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad de la Frontera. p 381-387
21. LINDEMANN, W.C., y Cardenas, M. 1984. "Nitrogen mineralization potencial and nitrogen transformations of sludge-amended soli". *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 48:1072-1077.
22. LÓPEZ, J., y Chueca, A. "Papel biológico de los nutrientes en la planta". En: Lachica, M., y González, C. (Eds). *Nutrición vegetal: Algunos aspectos químicos y biológicos*. Granada, España. Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. 1985. p 1-41.
23. McGRATH, S.P. 1996. "Persistent organic pollutants and metals from sewage sludge: their effects on soil, plants and the food chain". IACR-Rothamsted, Harpenden, Herts AL5 25Q. United King. p 75-91.
24. MENDOZA, J., Garrido, T., Castillo, G., y Ahumada, I. 2004. "Aplicación de biosólidos al suelo. Toxicidad y efecto sobre la movilidad y biodisponibilidad de metales pesados". En: SIMPOSIO Residuos orgánicos y su uso en sistemas agroforestales: 5 y 6 de agosto de 2004. Temuco, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad de la Frontera. p 15-25.
25. PARADA, H. "Distribución de metales pesados en suelos degradados tratados con un biosólido". Tesis Químico. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. 2004. 52p.
26. PEIRANO, P., Lastra, O., Espinoza, J., Borie, G., y Aguilera, M. 2002. "Caracterización del contenido de metales pesados en lodos para su uso suelos". En: IX CONGRESO NACIONAL DE LA CIENCIA DEL SUELO: 4 y 6 de noviembre de 2002. Talca, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad de Talca. p 256-258.
27. SANTANDER, G. "Efecto de la aplicación de residuos sólidos de alto impacto en la actividad biológica de suelos de uso forestal". Tesis Bioquímico. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. 2005. 53p.
28. SOLIS, N. "Formas químicas y movilidad de metales pesados en suelos alofánicos". Tesis Químico Farmacéutico. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. 1997. 50p.
29. VARNERO, MT. "Desarrollo de substratos orgánicos: compost y bioabono". En: EXPERIENCIAS Internacionales en la Rehabilitación de Espacios degradados. Proyecto FONDEF D9811036: 7 y 8 de septiembre de 2000. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 2001. 123p.

30. WITTER, E. 1996. "Limit values for heavy metals concentrations in sewage sludge and soil that protect soil microorganisms". Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences. 67-73p.
31. ZUNINO, H. "El suelo y la nutrición mineral de los vegetales". En: Lachica, M., y González, C. (Eds). Nutrición vegetal: Algunos aspectos químicos y biológicos. Granada, España. Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. 1985. p 197-211.

# **ANEXOS**

Tabla 1: Valores pH suelo Jaururo 2º Toma año 2004

Tratamiento	Parcela	Perfil / cm	pH
Lodo 800	3	0-10	5,65
	3	10--20	5,77
	3	20--30	6,35
	7	0-10	5,28
	7	10--20	5,58
	7	20--30	5,65
	9	0-10	5,93
	9	10--20	6,23
	Lodo 400	4	0-10
4		10--20	6,1
4		20--30	6,37
5		0-10	5,79
5		10--20	5,49
5		20--30	6,26

Tabla 2: Valores pH suelo San Pedro 2º Toma año 2004

Tratamiento	Bosque	Parcela	Perfil / cm	pH
Lodo 800	Juvenil	5	0-10	5,11
		5	10--20	5,24
		5	20--30	5,27
		9	0-10	5,1
		9	10--20	5,32
		9	20--30	5,31
		14	0-10	5,27
		14	10--20	5,72
	Adulto	14	20--30	5,72
		16	0-10	5,8
		16	10--20	5,35
		16	20--30	5,36
		23	0-10	5,04
		23	10--20	4,65
Lodo 400	Juvenil	23	20--30	4,93
		24	0-10	5,31
		24	10--20	5,44
		1	0-10	4,91
		1	10--20	5,21
		1	20--30	5,48
		3	0-10	5,33
		3	10--20	5,66
	Adulto	3	20--30	5,72
		12	0-10	5,11
		12	10--20	5,12
		12	20--30	5,22
		18	0-10	5,27
		18	10--20	5,89
Lodo 400	Adulto	18	20--30	5,91
		20	0-10	5,5
		20	10--20	5,49
		20	20--30	5,2
		22	0-10	5,38
		22	10--20	5,55
		22	20--30	5,51

**Tabla 3: Contenido de metales nutrientes y contaminantes experiencia en terreno suelos Jaururo 2004 2º toma**

Tratamiento	Parcela	Perfil / cm	Fe	Cu	Ni	Zn	Mn	Pb	Cd	K	Ca	Mg
<b>Lodo 800</b>	3	0-10	19000	48	18	48	1250	21	nd	64	5375	2250
	3	10--20	18625	38	20	40	1500	20	nd	59	5000	1500
	3	20--30	18250	43	15	43	1000	20	nd	49	4125	2000
	7	0-10	24500	55	18	55	2375	20	nd	66	5125	1625
	7	10--20	26125	43	15	50	2250	21	nd	69	4750	1625
	7	20--30	26625	40	18	50	2250	19	nd	54	3000	1750
	9	0-10	2500	10	5	41	1250	21	nd	73	3250	1750
	9	10--20	20250	35	15	38	1250	21	nd	51	4250	1850
<b>Lodo 400</b>	4	0-10	17875	45	18	45	1625	23	nd	56	5125	1750
	4	10--20	18625	45	20	45	1500	20	nd	51	4500	1750
	4	20--30	48125	75	50	113	2000	20	nd	134	5375	6000
	5	0-10	17250	40	18	40	1000	18	nd	56	4875	1750
	5	10--20	24375	40	33	43	2000	18	nd	51	4125	1375
	5	20--30	38250	65	30	85	2125	16	nd	79	3875	3875

nd: no detectado por encontrarse bajo los límites de detección de la técnica.

**Tabla 4: Contenido de metales nutrientes y contaminantes experiencia en terreno suelos San Pedro 2004 2º toma**

Tratamiento	Bosque	Parcela	Perfil / cm	pH	Fe	Cu	Ni	Zn	Mn	Pb	Cd	K	Ca	Mg
Lodo 800	Juvenil	5	0-10	5,11	87000	43	33	70	1500	73	5	836	2000	1000
		5	10--20	5,24	84750	45	33	67	1000	63	5	329	2000	1000
		5	20--30	5,27	82750	45	33	70	625	60	5	385	1750	1000
		9	0-10	5,1	71000	54	37	80	2000	53	5	128	2375	1000
		9	10--20	5,32	50250	53	37	80	2500	60	5	255	2000	1000
		9	20--30	5,31	45125	53	35	80	2375	63	5	204	1750	1000
		14	0-10	5,27	46375	45	35	70	1375	60	2,5	180	2000	1000
		14	10--20	5,72	45375	45	30	73	1125	63	2,5	272	1625	1000
		14	20--30	5,72	46625	45	35	67	1000	55	2,5	347	1625	1000
	Adulto	16	0-10	5,8	31625	47	23	83	2375	45	nd	268	2000	1000
		16	10--20	5,35	33125	50	27	85	2500	63	nd	270	1875	1000
		16	20--30	5,36	34500	50	30	85	2375	67	nd	272	1625	1000
		23	0-10	5,04	33375	55	27	75	2750	75	nd	271	2000	1000
		23	10--20	4,65	34250	58	25	78	2750	80	nd	272	1250	1000
		23	20--30	4,93	37375	55	35	80	3000	78	nd	272	1250	1000
		24	0-10	5,31	30375	45	27	75	4250	63	nd	272	4250	1000
24		10--20	5,44	34625	50	27	67	2625	75	nd	272	2625	1000	
Lodo 400	Juvenil	1	0-10	4,91	50875	50	37	70	1750	40	5	304	1875	1000
		1	10--20	5,21	55875	50	40	73	1500	40	5	324	1500	1000
		1	20--30	5,48	54375	50	40	78	1750	55	2,5	223	1625	1000
		3	0-10	5,33	49500	48	35	73	1875	57	5	200	3625	1250
		3	10--20	5,66	53750	45	35	65	1250	60	5	182	2500	1000
		3	20--30	5,72	53375	43	40	67	1250	60	5	170	2125	1000
		12	0-10	5,11	50500	50	37	80	1625	53	5	208	2500	1125
		12	10--20	5,12	51500	45	40	75	1125	60	2,5	260	1750	1000
		12	20--30	5,22	50875	50	40	73	1000	55	5	300	1625	1000
	Adulto	18	0-10	5,27	28500	43	27	63	1875	65	nd	155	2750	1000
		18	10--20	5,89	30375	40	30	65	1250	65	nd	161	2000	1000
		18	20--30	5,91	33000	40	30	65	1250	65	nd	142	1625	1000
		20	0-10	5,5	29375	43	23	65	3375	77	nd	270	2875	1250
		20	10--20	5,49	36125	45	27	65	2500	87	nd	273	1750	1000
		20	20--30	5,2	38250	43	30	60	1750	75	nd	160	1500	875
		22	0-10	5,38	33000	50	30	85	3875	80	2,5	270	2500	1250
22		10--20	5,55	32125	50	30	80	3500	73	nd	265	2000	1000	
22		20--30	5,51	32500	53	27	85	3500	70	nd	250	1750	1000	

**Tabla 5: Características generales incubaciones suelo-compost**

<b>Suelo</b>	<b>% Humedad</b>	<b>pH</b>	<b>%C</b>	<b>%N</b>	<b>C/N</b>	<b>P Total</b>	<b>P Disponible</b>
<b>Jaururo Testigo</b>	13.5	5.39	3.87	0.30	12.8	338	5,4
<b>Jaururo 400</b>	13.8	5.73	0.94	0.09	9.92	398	28
<b>Jaururo 800</b>	14.2	5.37	1.80	0.18	9.98	670	46
<b>Tanumé Adulto Testigo</b>	16.6	4.98	2.55	0.18	13.9	629	3
<b>Tanumé Adulto 400</b>	15.3	5.09	2.62	0.20	12.7	808	22
<b>Tanumé Adulto 800</b>	15.1	4.81	3.92	0.33	11.8	960	49
<b>Tanumé Juvenil Testigo</b>	13.7	4.66	1.60	0.16	9.8	503	0
<b>Tanumé Juvenil 400</b>	14.0	4.62	1.97	0.20	9.8	711	18
<b>Tanumé Juvenil 800</b>	13.7	4.63	2.19	0.23	9.5	891	48
<b>San Pedro Adulto Testigo</b>	24.1	5.18	3.35	0.20	16.7	716	11
<b>San Pedro Adulto 400</b>	21.1	5.30	3.48	0.21	16	604	11
<b>San Pedro Adulto 800</b>	23.1	5.32	4.30	0.26	16.5	572	24
<b>San Pedro Juvenil Testigo</b>	19.9	4.77	4.91	0.31	15.7	667	0
<b>San Pedro Juvenil 400</b>	21.4	4.73	5.15	0.26	19.5	750	3,8
<b>San Pedro Juvenil 800</b>	19.7	4.73	5.69	0.28	20.3	888	12

**Tabla 6: Características generales incubaciones suelo-lodo**

<b>Suelo</b>	<b>%Humedad</b>	<b>pH</b>	<b>%C</b>	<b>%N</b>	<b>C/N</b>	<b>P Total</b>	<b>P Disponible</b>
<b>Jaururo Testigo</b>	17.5	5.6	1.16	0.13	8.7	320	5,3
<b>Jaururo 400</b>	nd	4.9	1.30	0.30	4.2	522	56
<b>Jaururo 800</b>	nd	3.9	1.43	0.25	5.5	778	82
<b>Tanumé Adulto Testigo</b>	24.5	5.6	2.05	0.14	14.5	587	5,2
<b>Tanumé Adulto 400</b>	nd	5.0	2.22	0.21	10.2	618	11
<b>Tanumé Adulto 800</b>	nd	4.9	2.56	0.38	6.7	595	15
<b>Tanumé Juvenil Testigo</b>	20.2	4.7	1.60	0.15	10.3	473	5
<b>Tanumé Juvenil 400</b>	nd	4.7	1.73	0.18	9.1	446	10
<b>Tanumé Juvenil 800</b>	nd	4.8	1.55	0.18	8.4	547	18,6
<b>San Pedro Adulto Testigo</b>	28.0	5.8	2.93	0.18	16	618	0
<b>San Pedro Adulto 400</b>	nd	4.9	2.62	0.22	11.6	681	6,1
<b>San Pedro Adulto 800</b>	nd	4.6	2.55	0.39	6.5	728	13
<b>San Pedro Juvenil Testigo</b>	27.7	5.1	1.95	0.10	18.5	667	0
<b>San Pedro Juvenil 400</b>	nd	4.5	2.82	0.16	17.1	750	3,8
<b>San Pedro Juvenil 800</b>	nd	4.4	2.70	0.19	13.7	888	12

nd: no determinado

**Tabla 7: Contenido total de macro y micro elementos en suelos incubados (ppm)**

Incubación	Suelo	Bosque	Tratamiento	Fe	Cu	Ni	Zn	Mn	Pb	Cd	K	Ca	Mg
S-C	Jaururo	Adulto	Testigo	25395	29	15	38	1078	29	4,8	124584	3833	2395
S-C	Jaururo	Adulto	400	27073	31	18	38	1318	26	nd	92239	3833	2395
S-C	Jaururo	Adulto	800	27791	33	17	44	958	31	nd	128177	4192	2636
S-L	Jaururo	Adulto	Testigo	37561	40	16	48	1764	38	nd	126041	3781	2016
S-L	Jaururo	Adulto	400	33149	61	18	48	1386	35	nd	123521	4538	2143
S-L	Jaururo	Adulto	800	45123	68	18	70	2268	38	nd	123520	6302	2520
S-C	San Pedro	Juvenil	Testigo	56901	48	34	60	1432	31	nd	41666	1562	1041
S-C	San Pedro	Juvenil	400	57291	50	34	65	1302	28,7	nd	45573	1822	1041
S-C	San Pedro	Juvenil	800	58332	52	34	70	1172	34	nd	49479	1692	1041
S-L	San Pedro	Juvenil	Testigo	77338	52	40	69	1294	40	5,8	46000	1725	1150
S-L	San Pedro	Juvenil	400	79206	52	46	74	1294	40	5,8	54625	2012	1294
S-L	San Pedro	Juvenil	800	80500	58	50	80	1294	40	nd	54625	2012	1150
S-C	San Pedro	Adulto	Testigo	38617	50	20	80	3008	32	5,5	75052	1910	1228
S-C	San Pedro	Adulto	400	41756	47	21	90	3008	32	5,5	79146	2182	1091
S-C	San Pedro	Adulto	800	42438	55	21	90	2864	32	5,5	77781	2320	1091
S-L	San Pedro	Adulto	Testigo	45464	52,8	34	85	3766	34	nd	79635	2462	1158
S-L	San Pedro	Adulto	400	51401	50	38	104	3764	38	nd	85427	27501	1592
S-L	San Pedro	Adulto	800	50532	50	29	104	3766	40	nd	94114	27501	1592
S-C	Tanumé	Adulto	Testigo	40375	41	19	62	1250	30	nd	81250	2125	1624
S-C	Tanumé	Adulto	400	40876	37	19	67	1375	32	nd	67500	2501	1750
S-C	Tanumé	Adulto	800	43999	45	25	76	1500	34	nd	73750	2499	1750
S-L	Tanumé	Adulto	Testigo	44687	38	21	71	1375	36	nd	83875	2888	2062
S-L	Tanumé	Adulto	400	40425	33	21	86	1375	33	nd	92125	4125	2199
S-L	Tanumé	Adulto	800	41799	44	28	91	1375	33	nd	88000	5087	2612
S-C	Tanumé	Juvenil	Testigo	29482	29	15	38	1932	36	nd	80958	1208	725
S-C	Tanumé	Juvenil	400	31900	34	15	48	1934	31	nd	83375	2296	846
S-C	Tanumé	Juvenil	800	27550	42	15	56	1571	29	nd	88208	1450	966
S-L	Tanumé	Juvenil	Testigo	29818	26	14	34	1302	36	nd	98958	1954	651
S-L	Tanumé	Juvenil	400	29948	29	14	41	1301	36	nd	91146	2082	1172
S-L	Tanumé	Juvenil	800	28906	40	14	58	1562	38	nd	96354	2474	1692

nd: no detectado por encontrarse bajo los límites de detección de la técnica

**Tabla 8: Contenido de macro y micro elementos solubles en agua 1º Toma suelos incubados(ppm)**

Incubación	Suelo	Bosque	Tratamiento	Fe	Cu		Zn	Mn	Pb	Cd	K	Ca	Mg
S-C	Jaururo	Adulto	Testigo	2	nd	nd	nd	14	nd	nd	5750	115	43
S-C	Jaururo	Adulto	400	0,3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	13656	201	115
S-C	Jaururo	Adulto	800	0,3	nd	nd	nd	14	0,2	nd	12650	244	129
S-L	Jaururo	Adulto	Testigo	3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	7260	106	nd
S-L	Jaururo	Adulto	400	nd	nd	nd	0.3	1316	nd	nd	15730	288	91
S-L	Jaururo	Adulto	800	0,3	nd	nd	0.6	3766	0,6	nd	27830	696	272
S-C	San Pedro	Juvenil	Testigo	0,3	nd	0,3	nd	16	nd	nd	6250	94	16
S-C	San Pedro	Juvenil	400	nd	nd	0,3	nd	16	nd	nd	8281	109	16
S-C	San Pedro	Juvenil	800	nd	nd	nd	nd	nd	0,3	nd	9688	125	nd
S-L	San Pedro	Juvenil	Testigo	0,3	nd	nd	nd	17	nd	nd	5348	86	nd
S-L	San Pedro	Juvenil	400	0,3	nd	0,3	0.3	207	nd	nd	14145	207	69
S-L	San Pedro	Juvenil	800	0,3	nd	0,3	0.7	1535	0,3	nd	24150	414	172
S-C	San Pedro	Adulto	Testigo	0,3	nd	nd	nd	16	nd	nd	8678	114	16
S-C	San Pedro	Adulto	400	0,3	nd	nd	nd	16	nd	nd	12281	131	32
S-C	San Pedro	Adulto	800	nd	nd	nd	nd	16	nd	nd	15884	180	49
S-L	San Pedro	Adulto	Testigo	nd	nd	nd	nd	0	nd	nd	8340	139	34
S-L	San Pedro	Adulto	400	0,3	nd	nd	0.3	243	nd	nd	25368	660	278
S-L	San Pedro	Adulto	800	0,3	nd	0.3	0.7	1616	nd	nd	34229	1372	330
S-C	Tanumé	Adulto	Testigo	0,6	nd	nd	nd	0	nd	nd	10650	105	30
S-C	Tanumé	Adulto	400	0,9	nd	nd	0,3	15	0,3	nd	17250	210	90
S-C	Tanumé	Adulto	800	1,2	nd	nd	0,3	15	0,3	nd	20250	345	135
S-L	Tanumé	Adulto	Testigo	0,6	nd	nd	nd	16	0,3	nd	12375	148	33
S-L	Tanumé	Adulto	400	nd	nd	nd	0,3	561	0,3	nd	26235	561	248
S-L	Tanumé	Adulto	800	0,3	nd	nd	0,6	1502	0,6	nd	29535	776	314
S-C	Tanumé	Juvenil	Testigo	0,3	nd	nd	nd	29	nd	nd	5075	72,5	nd
S-C	Tanumé	Juvenil	400	0,3	nd	nd	0,3	44	nd	nd	12035	131	44
S-C	Tanumé	Juvenil	800	0,3	nd	nd	0,5	276	0,3	nd	17835	304	102
S-L	Tanumé	Juvenil	Testigo	0,3	nd	nd	nd	109	nd	nd	7500	94	31
S-L	Tanumé	Juvenil	400	nd	nd	nd	0,3	656	nd	nd	19844	203	109
S-L	Tanumé	Juvenil	800	nd	nd	nd	0,3	578	0,3	nd	19844	218	140

nd: no detectado por encontrarse bajo los límites de detección de la técnica

**Tabla 9: Contenido de macro y micro elementos solubles en agua 2º Toma suelos incubados (ppm)**

Incubación	Suelo	Bosque	Tratamiento	Fe	Cu	Ni	Zn	Mn	Pb	Cd	K	Ca	Mg
S-C	Jaururo	Adulto	Testigo	15	nd	nd	nd	0,3	0,6	nd	250	72	14
S-C	Jaururo	Adulto	400	2,3	nd	nd	nd	nd	0,3	nd	3580	86	14
S-C	Jaururo	Adulto	800	0,6	nd	0,3	nd	nd	0,6	nd	3580	115	28
S-L	Jaururo	Adulto	Testigo	5,4	nd	nd	nd	0,3	0,6	nd	2400	76	15
S-L	Jaururo	Adulto	400	nd	nd	nd	0,3	3,6	0,6	nd	1800	2,9	1,1
S-L	Jaururo	Adulto	800	nd	nd	0,3	0,9	0,9	1,2	nd	3200	6,5	2,4
S-C	San Pedro	Juvenil	Testigo	nd	nd	0,3	nd	nd	0,6	nd	6000	94	31
S-C	San Pedro	Juvenil	400	nd	nd	0,3	nd	0,3	0,6	nd	2000	140	62
S-C	San Pedro	Juvenil	800	nd	nd	0,3	nd	nd	0,3	nd	200	94	31
S-L	San Pedro	Juvenil	Testigo	nd	0,3	0,3	nd	0,3	0,7	nd	1000	86	17
S-L	San Pedro	Juvenil	400	nd	0,3	0	0,3	0,7	0,7	nd	2500	362	172
S-L	San Pedro	Juvenil	800	nd	nd	0,7	1,3	2,4	1,0	nd	900	656	328
S-C	San Pedro	Adulto	Testigo	nd	nd	0,3	nd	nd	0,7	nd	1200	98	33
S-C	San Pedro	Adulto	400	nd	nd	0,3	nd	nd	0,7	nd	1100	131	49
S-C	San Pedro	Adulto	800	nd	nd	0,3	nd	nd	0,3	nd	1200	213	98
S-L	San Pedro	Adulto	Testigo	0,3	nd	0,3	nd	nd	1,0	nd	4000	104	17
S-L	San Pedro	Adulto	400	nd	0,7	0,7	nd	3,8	1,0	nd	500	365	156
S-L	San Pedro	Adulto	800	0,3	nd	0,7	0,7	1,4	0,7	nd	5000	1199	521
S-C	Tanumé	Adulto	Testigo	7,2	nd	0,3	nd	nd	0,9	nd	1800	90	15
S-C	Tanumé	Adulto	400	nd	nd	0,3	nd	nd	nd	nd	3500	180	45
S-C	Tanumé	Adulto	800	nd	nd	nd	nd	1,5	0,3	nd	5500	315	90
S-L	Tanumé	Adulto	Testigo	18	0,6	0,3	nd	0,3	1,0	nd	5000	82,5	16,5
S-L	Tanumé	Adulto	400	nd	0,3	0,3	0,3	5,0	1,0	nd	7500	247,5	66
S-L	Tanumé	Adulto	800	nd	nd	0,3	0,6	17,5	1,7	nd	3500	379,5	99
S-C	Tanumé	Juvenil	Testigo	nd	nd	0,3	nd	1,2	0,6	nd	3500	73	14,5
S-C	Tanumé	Juvenil	400	nd	nd	0,3	0,6	7,3	0,3	nd	3000	189	72,5
S-C	Tanumé	Juvenil	800	nd	nd	nd	2,0	0,6	0,6	nd	2980	609	261
S-L	Tanumé	Juvenil	Testigo	nd	nd	nd	nd	0,3	0,94	nd	1000	141	78
S-L	Tanumé	Juvenil	400	nd	nd	0,3	0,6	0,9	0,94	nd	1000	203	110
S-L	Tanumé	Juvenil	800	nd	0,3	0,3	1,9	1,9	0,6	nd	1000	516	281

nd: no detectado por encontrarse bajo los límites de detección de la técnica

**Tabla 10: Contenido de macro y micro elementos solubles en agua 3º Toma suelos incubados (ppm)**

Incubación	Suelo	Bosque	Tratamiento	Fe	Cu	Ni	Zn	Mn	Pb	Cd	K	Ca	Mg
S-C	Jaururo	Adulto	Testigo	nd	nd	nd	nd	nd	0,3	nd	8,3	144	43
S-C	Jaururo	Adulto	400	3.7	nd	nd	nd	nd	0,3	nd	14	101	14
S-C	Jaururo	Adulto	800	nd	nd	nd	0,3	4,6	0,3	nd	47	331	115
S-L	Jaururo	Adulto	Testigo	nd	nd	nd	nd	2,7	0,3	nd	20	91	30
S-L	Jaururo	Adulto	400	nd	nd	nd	0,3	61	0,3	nd	38	106	61
S-L	Jaururo	Adulto	800	nd	nd	nd	0,3	76	0,3	nd	72	121	65
S-C	San Pedro	Juvenil	Testigo	nd	nd	nd	nd	3,4	0,3	nd	20	172	58
S-C	San Pedro	Juvenil	400	nd	nd	nd	0,3	4,4	0,3	nd	32	234	109
S-C	San Pedro	Juvenil	800	nd	nd	nd	0,3	16	0,3	nd	52	328	156
S-L	San Pedro	Juvenil	Testigo	nd	nd	nd	nd	1,7	0,7	nd	nd	104	17
S-L	San Pedro	Juvenil	400	nd	nd	nd	0,4	52	0,7	nd	36	190	69
S-L	San Pedro	Juvenil	800	nd	nd	nd	0,3	121	0,3	nd	64	293	121
S-C	San Pedro	Adulto	Testigo	nd	nd	nd	0,3	0,6	0,9	nd	34	180	65
S-C	San Pedro	Adulto	400	nd	nd	nd	0,3	0,6	0,6	nd	41	196	66
S-C	San Pedro	Adulto	800	nd	nd	nd	0,3	0,6	0,6	nd	34	196	66
S-L	San Pedro	Adulto	Testigo	nd	nd	nd	nd	1,4	0,7	nd	21	1617	695
S-L	San Pedro	Adulto	400	nd	nd	nd	0,3	17	0,3	nd	90	486	191
S-L	San Pedro	Adulto	800	nd	nd	nd	0,3	34	0,3	nd	90	399	139
S-C	Tanumé	Adulto	Testigo	nd	nd	nd	nd	3,3	1,5	nd	44	225	60
S-C	Tanumé	Adulto	400	nd	nd	nd	nd	1,8	0,6	nd	44	195	45
S-C	Tanumé	Adulto	800	nd	nd	nd	0,6	15	0,6	nd	106	675	195
S-L	Tanumé	Adulto	Testigo	nd	nd	nd	0,3	1,3	0,3	nd	34	148	33
S-L	Tanumé	Adulto	400	nd	nd	nd	0,3	16	0,3	nd	54	297	82
S-L	Tanumé	Adulto	800	nd	nd	nd	0,3	33	0,6	nd	61	363	99
S-C	Tanumé	Juvenil	Testigo	nd	nd	nd	0,3	44	0,3	nd	30	160	73
S-C	Tanumé	Juvenil	400	nd	nd	nd	1,2	131	0,3	nd	70	406	174
S-C	Tanumé	Juvenil	800	nd	nd	nd	2,3	102	0,5	nd	70	493	160
S-L	Tanumé	Juvenil	Testigo	nd	nd	nd	nd	15	0,4	nd	3	94	15
S-L	Tanumé	Juvenil	400	nd	nd	nd	nd	46	0,3	nd	32	109	31
S-L	Tanumé	Juvenil	800	nd	nd	nd	0,3	46	0,3	nd	45	125	46

nd: no detectado por encontrarse bajo los límites de detección de la técnica.

**Tabla 11: Contenido de macro y micro elementos solubles en CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub><sup>+</sup> suelos incubados (ppm)**

Incubación	Suelo	Bosque	Tratamiento	Fe	Cu	Ni	Zn	Mn	Pb	Cd	K	Ca	Mg
S-C	Jaururo	Adulto	Testigo	0,3	nd	0,6	0,3	0,3	0,3	nd	227	1195	363
S-C	Jaururo	Adulto	400	0,3	nd	0,3	0,3	0,3	nd	nd	227	1195	348
S-C	Jaururo	Adulto	800	0,3	nd	0,6	0,3	4,5	0,3	nd	287	1392	424
S-L	Jaururo	Adulto	Testigo	0,3	nd	0,6	0,3	30	nd	nd	287	983	303
S-L	Jaururo	Adulto	400	0,3	nd	0,6	0,6	318	0,3	nd	318	1165	363
S-L	Jaururo	Adulto	800	0,3	0,3	0,6	1,2	575	0,3	nd	348	1649	499
S-C	San Pedro	Juvenil	Testigo	0,3	nd	0,3	0,3	16	nd	nd	156	656	250
S-C	San Pedro	Juvenil	400	nd	nd	0,3	0,3	16	0,3	nd	156	781	234
S-C	San Pedro	Juvenil	800	0,3	nd	0,3	0,3	31	0,3	nd	219	625	313
S-L	San Pedro	Juvenil	Testigo	0,4	nd	0,7	nd	17	nd	nd	190	673	242
S-L	San Pedro	Juvenil	400	0,4	nd	0,7	nd	224	nd	nd	224	897	293
S-L	San Pedro	Juvenil	800	0,4	nd	0,7	0,7	345	0,4	nd	293	949	345
S-C	San Pedro	Adulto	Testigo	0,3	nd	0,3	nd	3,6	nd	nd	246	753	229
S-C	San Pedro	Adulto	400	0,3	nd	0,3	0,3	4,9	nd	nd	295	819	295
S-C	San Pedro	Adulto	800	0,3	nd	0,3	0,3	5	nd	nd	311	950	328
S-L	San Pedro	Adulto	Testigo	0,4	nd	0,7	0,4	8	0,7	nd	348	1164	348
S-L	San Pedro	Adulto	400	0,4	nd	0,7	0,4	34,8	0,7	nd	365	1251	348
S-L	San Pedro	Adulto	800	0,4	nd	0,7	0,7	226	0,4	nd	417	1529	452
S-C	Tanumé	Adulto	Testigo	0,3	nd	0,3	nd	15	nd	nd	255	885	225
S-C	Tanumé	Adulto	400	0,6	nd	0,3	0,3	15	0,3	nd	270	1080	270
S-C	Tanumé	Adulto	800	0,3	nd	0,3	0,9	75	0,3	nd	300	1380	312,5
S-L	Tanumé	Adulto	Testigo	0,3	nd	0,3	0,3	50	0,6	nd	363	1535	330
S-L	Tanumé	Adulto	400	0,3	nd	0,6	0,6	165	0,3	nd	380	1881	396
S-L	Tanumé	Adulto	800	0,3	nd	1	1	231	0,6	nd	380	1799	396
S-C	Tanumé	Juvenil	Testigo	0,3	nd	0,3	nd	29	nd	nd	174	276	116
S-C	Tanumé	Juvenil	400	0,6	nd	0,3	0,3	102	0,3	nd	203	493	160
S-C	Tanumé	Juvenil	800	0,6	nd	0,3	0,8	116	0,3	nd	218	667	189
S-L	Tanumé	Juvenil	Testigo	0,3	nd	0,6	nd	94	nd	nd	172	297	141
S-L	Tanumé	Juvenil	400	0,3	nd	0,3	0,3	219	0,3	nd	203	422	172
S-L	Tanumé	Juvenil	800	0,3	nd	0,6	0,6	78	0,3	nd	219	531	188

nd: no detectado por encontrarse bajo los límites de detección de la técnica.

**Tabla 12: Contenido de macro y micro elementos solubles en NaHCO<sub>3</sub> suelos incubados (ppm)**

Incubación	Suelo	Bosque	Tratamiento	Fe	Cu	Ni	Zn	Mn	Pb	Cd	K	Ca	Mg
S-C	Jaururo	Adulto	Testigo	0,6	0,3	nd	nd	nd	1,2	nd	431	72	144
S-C	Jaururo	Adulto	400	0,3	0,3	nd	nd	nd	1,2	nd	446	86	144
S-C	Jaururo	Adulto	800	1,2	0,3	0,3	nd	nd	0,8	nd	416	86	173
S-L	Jaururo	Adulto	Testigo	0,6	0,6	0,6	nd	0,3	1,2	0,3	318	76	151
S-L	Jaururo	Adulto	400	0,9	0,6	0,6	0,3	nd	1,2	nd	332	121	226
S-L	Jaururo	Adulto	800	0,6	0,9	0,6	nd	nd	1,2	nd	348	76	212
S-C	San Pedro	Juvenil	Testigo	0,3	0,3	nd	nd	nd	328	nd	328	78	78
S-C	San Pedro	Juvenil	400	0,3	0,3	nd	nd	nd	0,9	nd	438	94	94
S-C	San Pedro	Juvenil	800	0,3	0,3	nd	nd	nd	1,6	nd	453	78	109
S-L	San Pedro	Juvenil	Testigo	0,7	0	0,7	nd	nd	1,7	nd	207	104	86
S-L	San Pedro	Juvenil	400	0,3	0	0,7	nd	nd	1	nd	224	86	121
S-L	San Pedro	Juvenil	800	0,7	0,3	0,7	nd	nd	1,3	nd	207	69	155
S-C	San Pedro	Adulto	Testigo	0	0,3	0,6	nd	nd	1,3	nd	393	82	82
S-C	San Pedro	Adulto	400	0,3	0,3	0,6	nd	nd	0,9	nd	376	98	82
S-C	San Pedro	Adulto	800	0,3	0,3	0,6	nd	nd	1,3	nd	376	98	98
S-L	San Pedro	Adulto	Testigo	0,3	0,3	0,7	nd	nd	1	nd	261	104	122
S-L	San Pedro	Adulto	400	nd	0,3	0,7	nd	nd	1	nd	261	70	139
S-L	San Pedro	Adulto	800	0,3	0,3	0,7	nd	nd	1,4	nd	295	104	191
S-C	Tanumé	Adulto	Testigo	0,6	0,3	0,3	nd	nd	1,2	nd	315	75	75
S-C	Tanumé	Adulto	400	0,3	0,3	0,3	nd	nd	1,5	nd	330	105	90
S-C	Tanumé	Adulto	800	0,3	0,3	0,3	nd	nd	1,2	nd	375	105	90
S-L	Tanumé	Adulto	Testigo	0,6	0,3	1	nd	nd	1,3	nd	214	99	132
S-L	Tanumé	Adulto	400	1	0,3	1	nd	nd	1	nd	214	83	182
S-L	Tanumé	Adulto	800	1	0,3	1	nd	nd	1	nd	214	83	182
S-C	Tanumé	Juvenil	Testigo	0,3	0,3	nd	nd	nd	0,8	nd	392	72,5	44
S-C	Tanumé	Juvenil	400	0,3	0,3	nd	nd	0,3	1,2	nd	377	116	58
S-C	Tanumé	Juvenil	800	0,3	0,3	nd	nd	nd	1,4	nd	363	58	73
S-L	Tanumé	Juvenil	Testigo	0,3	0,3	0,9	nd	nd	1,5	nd	265	94	78
S-L	Tanumé	Juvenil	400	0,6	0,3	0,9	nd	0,3	1,3	nd	250	94	109
S-L	Tanumé	Juvenil	800	0,6	0,6	0,6	nd	nd	0,9	nd	266	78	94

nd: no detectado por encontrarse bajo los límites de detección de la técnica.