

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE AGRONOMIA
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ESTUDIO DE VIABILIDAD EN LA APLICACION
DE LODOS ACTIVADOS EN SUELO PARA LOS
CULTIVOS DE MAIZ (*Zea mays* L.) Y NOPAL
(*Opuntia ficus-indica*.)

POR

JOSE LUIS WOO REZA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO
DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS

MARIN N. L., MEXICO

DICIEMBRE DEL 2003

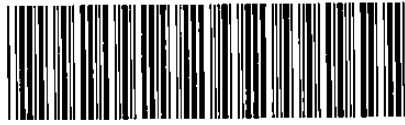
TD

Z5071

FA

2003

.W6



1020131314

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE AGRONOMIA
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ESTUDIO DE VIABILIDAD EN LA APLICACION
DE LODOS ACTIVADOS EN SUELO PARA LOS
CULTIVOS DE MAIZ (*Zea mays*) Y NOPAL
(*Opuntia ficus-indica*)

POR

JOSE LUIS WOO REZA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO
DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS

MARIN N. L., MEXICO

DICIEMBRE DEL 2003

979006

TD

Z 5071

FA

2003

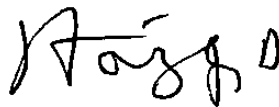
.W6



FONDO
TESIS

**ESTUDIO DE VIABILIDAD EN LA APLICACIÓN DE LODOS ACTIVADOS EN
SUELO PARA LOS CULTIVOS DE MAÍZ (*Zea mays* L.) Y NOPAL (*Opuntia
ficus-indica*.)**

Aprobación de la Tesis



**Ph.D. Rigoberto E. Vázquez Alvarado
Asesor Principal**



**Ph.D. Rigoberto González González
Co-Asesor**

**Ph.D. Emilio Olivares Sáenz
Co-Asesor**



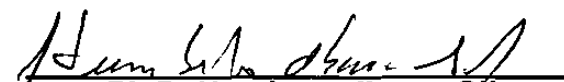
**Ph.D. Francisco Zavala García
Co-Asesor**



**Dr. Ricardo Valdez Cepeda
Co-Asesor Externo**



**Dr. Clemente Gallegos Vázquez
Co-Asesor Externo**



**Ph.D. Humberto Ibarra Gil
Subdirector de Estudios de Postgrado
De la Facultad de Agronomía**

"Todos los hombres son sabios; unos antes, los otros, después".

"Proverbio chino"

"Quien volviendo a hacer el camino viejo aprende el nuevo, puede considerarse un maestro".

Confucio (551-479 a. C.); filósofo chino.

"La paciencia es un árbol de raíz amarga pero de frutos muy dulces".

"Proverbio persa"

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de doctorado.

A La Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por la culminación académica que formo en mí y a todas aquellas personas que de alguna manera colaboraron en mi formación.

A José Ma. Hernández H., Jesús Pereyra G., José Luis Guzmán, José Luis Cantú, Mauro Rodríguez, Alfredo Silva, Isidro Cruz, Raymundo Silva, José Chacon, José Manuel Sepúlveda, Ma. Elena Contreras, Elías Treviño, José Bútron, Javier de J. Cortes B., Gabriel Alejandre., Adriana Diez, Juanita Aranda, Juanita Pineda, Rosa Ma. Gutiérrez, Juan Murguía, Luis Ibarra, Rosario Quezada, Rogelio Aldaco, José A. Montemayor, Manuel Fortis, José Cruz, y Jesús olague, gracias por haberme brindado su amistad y por todas las atenciones recibidas, por que recibí de ustedes valiosos consejos.

Al Dr. Gerardo de lira R., Dr. Humberto Ibarra G. y M.C. Eduardo García Z., gracias por su amistad y desinteresado apoyo para la culminación de mi doctorado.

A Juan Carlos Rodríguez O. y a su apreciable familia por haber cultivado una hermosa amistad.

A Doña Tere y Don Arturo, les agradezco su amistad y el apoyo brindado durante mi estancia en esta facultad.

A Graciela Ramírez y Alejandro Ayala, gracias por su amistad y el apoyo incondicional que siempre me brindaron para seguir adelante.

Para aquellos con quien conviví, que me apoyaron durante mis estudios y de los cuales mucho he aprendido, y agradecer a los que no he recordado mi gratitud a todos ellos.

DEDICATORIA

A Dios nuestro señor, quien me dio la fe, la voluntad y la fortaleza para llegar a la cúspide en una etapa más de mi vida, a pesar de las adversidades que se presentaron en el camino.

A mis Padres, **Sr. Francisco Woo Ontiveros y Sra. Carmen Reza de Woo**, quienes me dieron la vida y me brindaron todo su amor y confianza para seguir adelante, forjando en mi un hombre de bien y un ser de provecho, muchas gracias con todo mi corazón y que dios los bendiga.

A mis hermanos, **Carmen Amparo, Juan Francisco, Víctor Abel y Alfredo**, les agradezco con todo mi corazón, el apoyo que me brindaron en los momentos más difíciles de mi vida, y la confianza que depositaran en mi persona, gracias y que dios los bendiga.

A mis sobrinos, **Wendolyne, Víctor Antonio, Luis Francisco, Andrea Alejandra, Luis Ricardo, Jacqueline y Luis Alfredo**, con todo mi corazón, que dios los bendiga.

A mis tíos y primos, por su cariño y apoyo incondicional gracias y que dios los bendiga.

A la memoria de mis abuelitos, Manuel Reza López† y Carmen Flores† de Reza, por todo lo bueno que me heredaron.

A mi Ahijado, Jorge E. Gómez con todo mi corazón, que dios te bendiga.

A mis compadres, Jorge E. Gómez G. y Elizabet de Gómez. por la gran amistad que nos une y los gratos momentos que hemos compartido, muchas gracias.

A mis cuñadas, Julieta Alba y Araceli Galván, por la amistad demostrada.

A mis grandes amigos, Jesús Valenzuela G., Graciela de Valenzuela, Rolando Castañeda, y Ruth de Castañeda, Juanita Flores, Idalia Hernández, Manuelita Bolívar D. Beatriz Silva, Francisco Lazaga M., Jorge Riquelme D., Cesar Romero, Gilberto Silva, Lourdes de S., gracias por su amistad, confianza y el cariño que siempre me han brindado.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

JOSE LUIS WOO REZA

Candidato al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas con Especialidad en Agua-Suelo.

Tesis:

Estudio de Viabilidad en la Aplicación de Lodos Activados en Suelo para los Cultivos de Maíz (*Zea mays* L.) y Nopal (*Opuntia ficus-indica*.)

Áreas de estudios:

Fertilidad de Suelos, Nutrición Vegetal y Uso de Agroplásticos en la Agricultura.

Biografía

Datos personales:

Oriundo de Torreón, Coahuila México, Nacido el 5 de Octubre de 1966.

Formación Profesional:

Egresado de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro como Ingeniero Agrónomo con Especialidad de Suelos

Egresado de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro como Maestro en Ciencias con Especialidad en Fertilidad de Suelos, Junio del 1997.

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	xii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Hipótesis.....	3
Objetivos.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Lodos activados.....	4
2.2. Utilización de los lodos activados.....	9
2.2.1. Aplicación en la agricultura.....	9
2.2.2. El uso de los lodos activados como aporte de nutrimentos.....	12
2.3. Efectos indeseables de los lodos activados.....	18
2.3.1. Contaminación por metales pesados.....	18
2.3.2. Contaminación por patógenos.....	23
2.4. Trabajos de investigación con lodos.....	25
2.5. Cultivo del maíz.....	30
2.6. Cultivo del nopal.....	31
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
3.1. Experimento de Maíz.....	34
3.1.1. Localización geográfica.....	34
3.1.2. Clima.....	34
3.1.3. Suelo.....	35
3.1.4. Material vegetativo.....	35
3.1.5. Material utilizado.....	35
3.1.6. Diseño experimental.....	36
3.1.7. Modelo estadístico.....	36
3.2. Desarrollo del experimento de maíz.....	37

3.2.1. Preparación del terreno.....	37
3.2.2. Aplicación de los tratamientos.....	38
3.2.3. Manejo del cultivo.....	39
3.3. Variables evaluadas.....	40
3.4. Metodología de lectura del equipo de absorción atómica.....	42
3.5. Experimento de Nopal.....	43
3.5.1. Localización geográfica.....	43
3.5.2. Clima.....	43
3.5.3. Suelo.....	44
3.5.4. Material vegetativo.....	44
3.5.5. Tratamiento del material vegetativo.....	45
3.5.6. Material utilizado.....	45
3.5.7. Diseño experimental.....	46
3.5.8. Modelo estadístico.....	46
3.6. Desarrollo del experimento de nopal.....	47
3.6.1. Preparación del experimento.....	47
3.6.2. Manejo del cultivo.....	48
3.7. Variables evaluadas.....	48
3.8. Lecturas con el equipo portátil HORIBA Spectrum technologies, Inc.	50
3.8.1. Metodología de lectura del equipo de absorción atómica.....	51
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
4.1. Experimento de Maíz	52
4.1.1. Altura de planta.....	52
4.1.2. Número total de hojas.....	53
4.1.3. Diámetro de tallo.....	54
4.1.4. Número de ramificaciones de la espiga.....	56
4.1.5. Volumen de mazorca.....	56
4.1.6. Peso seco del grano.....	58
4.1.7. Peso seco total.....	59
4.1.8. Análisis químicos de metales pesados en las diferentes partes de la planta.....	61

4.1.9. Correlaciones de las variables de maíz.....	64
4.2. Experimento de Nopal.....	66
4.2.1. Componentes del cladodio madre.....	66
4.2.2. Componentes de la raíz del cladodio.....	68
4.2.3. Componentes del cladodio hijo.....	68
4.2.4. Análisis químico del cladodio madre.....	69
4.2.5. Análisis químico del cladodio hijo.....	70
4.2.6. Análisis químicos de metales pesados en las diferentes partes de la planta.....	71
4.2.7. Correlaciones de las variables de nopal.....	75
V. CONCLUSIONES.....	79
VI. LITERATURA CITADA.....	82
VII. APÉNDICE.....	94

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
2.1	Características principales de las plantas tratadoras de aguas residuales: Norte, Noreste y Dulces Nombres.....	6
2.2	Metales contenidos en el lodo de las plantas de tratamiento de agua residual, Norte, Noreste y Dulces Nombres, así como los rangos y diferentes tipos de efluentes reportados por la EPA (ppm de metal de lodo seco).....	8
2.3	Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.....	9
2.4	Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos.....	9
2.5	Límites contaminantes de EPA para suelos con aplicación de biosólidos regulación 503.....	21
3.1	Concentración de metales pesados en los lodos aplicados en ppm.....	36
3.2	Tratamientos evaluados en el experimento de maíz.....	36
3.3	Variables evaluadas en el experimento de maíz.....	42
3.4	Concentración de metales pesados en los lodos aplicados en ppm.....	45
3.5	Tratamientos evaluados del experimento de nopal.....	46
3.6	Variables evaluadas en el experimento de nopal.....	50
4.1	Comparación de medias para alturas de planta de maíz (cm).....	53
4.2	Comparación de medias para número de hojas totales.....	54
4.3	Comparación de medias para diámetro de tallo (cm).....	55
4.4	Comparación de medias del número de ramificaciones de la espiga....	56
4.5	Comparación de medias para volumen de mazorca.....	57
4.6	Comparación de medias para el peso seco de grano (g).....	59
4.7	Comparación de medias para peso seco total de la planta de maíz (g)	61
4.8	Comparación de medias y concentraciones de níquel, cadmio, plomo y zinc en la raíz, tallo y hoja de maíz.....	61
4.9	Correlaciones significativas y altamente significativas entre variables en el cultivo de maíz.....	65

4.10	Comparación de medias del cladodio madre peso húmedo final y seco final (g).....	66
4.11	Comparación de medias del cladodio madre largo, ancho y grosor (cm) por tratamientos.....	67
4.12	Comparación de medias por tratamiento de longitud (cm), peso húmedo y seco (g) de la raíz.....	68
4.13	Comparación de medias por tratamiento del peso húmedo, seco y número de cladodios hijos transformados.....	69
4.14	Comparación de medias de tratamientos en la concentración de potasio, nitratos, sodio (ppm), conductividad eléctrica (mmhos/cm) y pH en cladodio madre.....	70
4.15	Comparación de medias de tratamientos en la concentración de potasio, nitratos, sodio (ppm), conductividad eléctrica (mmhos/cm) y pH en cladodio hijo.....	71
4.16	Comparación de medias y concentraciones de níquel, cadmio, plomo y zinc en el suelo, raíz, cladodio madre e hijo.....	72
4.17	Correlaciones significativas y altamente significativas entre variables en el cultivo de nopal.....	75

RESUMEN

José Luis Woo Reza

Fecha de Graduación: Diciembre, 2003

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Agronomía

Título del Estudio: ESTUDIO DE VIABILIDAD EN LA APLICACIÓN DE LODOS ACTIVADOS EN SUELO PARA LOS CULTIVOS DE MAÍZ (*Zea mays* L.) Y NOPAL (*Opuntia ficus-indica*.)

Número de páginas: 100

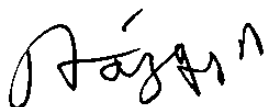
Candidato para el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas.

Área de Estudio: Fertilidad de Suelos, Nutrición Vegetal y Uso de Agroplásticos en la Agricultura

Propósito y Método del Estudio: Los lodos en la producción de cultivos pueden proporcionar los elementos esenciales para el desarrollo de las plantas, son ricos en materia orgánica. Añadiendo cantidades suficientes puede mejorar los requerimientos nutricionales de los cultivos pero una excesiva o mala aplicación de estos pueden ocasionar problemas con metales pesados. El propósito del presente estudio fue: evaluar la viabilidad en la aplicación de los lodos activados en los cultivos de maíz y nopal tanto en forma líquida como deshidratada y en diferentes dosis, y observar la concentración de cadmio, plomo, níquel y zinc en diferentes partes de la planta por lo que se establecieron dos experimentos, el primero en terrenos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Dulces Nombres de Agua y Drenaje de Monterrey, en el ciclo Otoño-Invierno 1998, el segundo en el campo experimental de la Facultad de Agronomía de la UANL, en el ciclo Invierno-Primavera 2000. Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar para ambos experimentos.

Contribuciones y Conclusiones: De la presente investigación, se deriva que la utilización de los lodos activados en cantidades no excesivas y controladas no presentan problemas con metales pesados como: cadmio, plomo, níquel y zinc, tanto en la planta como en el suelo. Esto disminuye el riesgo de contaminación y de daño a la salud del ser humano. Los componentes vegetativos presentaron una buena respuesta entre los tratamientos. En el caso de maíz la dosis de 8 t ha⁻¹ de lodo líquido y para nopal la de 4 t ha⁻¹ de lodo deshidratado, fueron las de mejor comportamiento. En las concentraciones de los metales pesados en diferentes órganos de la planta para maíz y nopal estas no rebasaron los límites permisibles de la EPA.

FIRMA DEL ASESOR: _____



SUMMARY

José Luis Woo Reza

Graduation Date: December, 2003

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Agronomía

Study Title: VIABILITY STUDY IN THE APPLICATION OF SEWAGE SLUDGE IN SOILS, FOR THE CULTIVATIONS OF CORN (*Zea mays* L.) And PRICKLY PEAR (*Opuntia ficus-indicates*.)

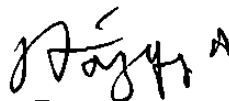
Number of pages: 100 **Candidate for Doctoral degree, in Agricultural Sciences.**

Area of Study: Soil Fertility, Plant Nutrition and Agroplastics in Agriculture

Goals and Method of Study: The sludge in the crop production can provide the essential elements for the development of plants; they are rich in organic matter. Adding enough quantities of sludge, can be improve the nutritional requirements of crops but an excessive or bad application can cause problems with heavy metals. The purpose of the present study was: to evaluate the viability in the application of sewage sludge in the corn and prickly pear crops. The applications were in the liquid and dehydrated forms and in different dose. It was quantified the concentration of cadmium, lead, nickel and zinc in different parts of the plant in two experiments. The corn experiment, it was established in the "Dulces Nombres" experimental station; belonging to the Monterrey Waters and Drainage Company and in the Autumn-winter 1998 cycle. The prickly pear experiment was established at the Facultad de Agronomía of the UANL experimental station; in the Winter-spring 2000 cycle. A random block design was use for both experiments.

Contributions and Conclusions: From the present research, can be concluded that the use of the sewage sludge in no excessive and controlled quantities, don't presents problems with heavy metals. Because the lower quantities of cadmium, lead, nickel and zinc, in the plant and soil, this diminishes the risk of contamination and damage to the human being health. The studied variables of vegetative components, they presented a good response among treatments. In the case of corn the dose of 8 t ha^{-1} of liquid sludge and in the case of prickly pear the dose of 4 t ha^{-1} of dehydrated sludge they had the best behavior. The concentrations of the heavy metals in different plant organs of corn and prickly pear did not surpass the permissible limit of the EPA.

SIGNATURE OF THE ADVISER: _____



I. INTRODUCCIÓN

La actividad humana y la cantidad de industrias en las grandes ciudades del mundo, generan una ingente cantidad de subproductos de muy diversas índoles. Entre los de la naturaleza orgánica cabe destacar, por su importancia, las basuras o residuos sólidos urbanos y los lodos de la depuración de las aguas residuales del alcantarillado.

En México se tiene registrado que se produce un volumen aproximado de 12' 614,400 de toneladas anuales de lodos residuales. Algunas ciudades del país, como Monterrey, cuentan con sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales municipales. Actualmente, la ciudad de Monterrey y su zona metropolitana cuentan con 21 plantas de tratamiento de aguas residuales, de las cuales 18 son de la iniciativa privada; en conjunto producen aproximadamente 3,368 litros por segundo (lps) de aguas residuales tratadas. Las otras tres plantas de tratamiento son de la paraestatal Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, (S.A.D.M.) con una producción aproximada de 8,000 lps de aguas residuales tratadas.

Cómo resultado de los procesos de separación del agua y de los sólidos sedimentables, se generan aproximadamente 120 toneladas diarias de lodos, los cuales actualmente son confinados en un relleno ubicado en la planta de tratamiento Dulces Nombres, Pesquería, N. L. Las sustancias contaminantes

que pueden estar contenidas en dichos lodos, provienen de una amplia gama de desechos domésticos, industriales y del comercio.

Una de las utilidades de los lodos es la aplicación al suelo en forma de fertilizantes o mejoradores de tierras agrícolas. El riesgo al utilizar dichos lodos cuando se tiene un mal manejo, es la cantidad de metales pesados y patógenos que en ellos se encuentran, pudiendo registrar problemas en la salud del ser humano y al medioambiente.

En esta evaluación se utilizaron los cultivos de maíz y nopal, por representar cultivos que son de arraigo en el pueblo mexicano y por sembrarse en grandes extensiones del país. En el caso del maíz, es el cultivo básico de mayor importancia, ya que su grano constituye la base fundamental del alimento de la mayor parte de la población. Ya que el maíz en el Estado de Nuevo León es uno de los cultivos más importantes y se siembra en condiciones de temporal como de riego. En el caso del nopal en México se cuenta con plantaciones especializadas en nopal para consumo humano. Así mismo, el nopal puede ser un cultivo alternativo para zonas que están teniendo problemas por bajos rendimientos debido al empobrecimiento paulatino de los suelos, o en lugares donde hay deficiencia de agua para los cultivos tradicionales, siendo este el caso del Estado de Nuevo León.

OBJETIVOS

1. Evaluación de diferentes dosis de lodos activados en el crecimiento y la fenología del maíz y nopal.
2. Cuantificar la concentración de metales pesados provenientes de los lodos activados en los cultivos de maíz y nopal.

HIPOTESIS

1. La cantidad de metales pesados de los lodos activados esta directamente vinculada a la dosis seleccionada, por lo tanto es importante evaluar el efecto de estas en el comportamiento fenológico de maíz y nopal.
2. La presencia de metales pesados en los lodos activados ha limitado su uso en la agricultura, por lo tanto es importante evaluarlos en los cultivos de maíz y nopal.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1. Lodos activados

Los lodos a ctivados son p roductos o rgánicos d el t ratamiento d e aguas residuales. Los biosólidos son ricos en nutrimentos esenciales para las plantas y materia orgánica (M. O.) y son reciclados como fertilizantes y mejoradores de suelo.

Hoy en día éste término describe el material sólido producido en diferentes etapas del tratamiento de aguas residuales. Lodo residual deberá ser utilizado conjuntamente con el proceso de tratamiento, el cual genera dicho material. Lodo primario es conocido como los sólidos del agua residual colectados en un tratamiento primario. Cuando el lodo primario es evaluado, tratado y procesado, el material puede reunir los estándares de biosólido, es un término más preciso, utilizado solamente para describir aquella porción de sólidos del flujo del agua residual que cumple las regulaciones federales y estatales para un beneficio en la aplicación.

El desarrollo del proceso en la producción de los lodos activados, ha marcado un progreso importante en el tratamiento secundario de las aguas residuales. Similarmente a los filtros goteadores, es este un proceso biológico de contacto, en el que los organismos vivos aerobios y los sólidos orgánicos de las aguas negras, se mezclan íntimamente en un medio favorable para la

descomposición de los sólidos (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, 1976).

Sorber (1994) comentó que el término biosólido se originó dentro de la industria del tratamiento de aguas residuales, tratando de definir la porción descontaminada y agrícolamente viable de los lodos generados por los sistemas de tratamiento de aguas residuales. **Sin embargo, el término de lodo difiere de biosólido, ya que estos últimos se refieren a un producto tratado, que es cuidadosamente verificado y periódicamente reutilizado a través de aplicaciones innovadoras.**

Outwater (1994) mencionó que la aplicación del lodo al suelo está siendo considerado como uno de los métodos más atractivos como fertilizantes o mejoradores de suelo, debido a su costo relativamente bajo y a su aportación de nutrientes esenciales para las plantas. Sin embargo, existe inseguridad acerca de las consecuencias ambientales de su aplicación; este método está limitado fuertemente por la presencia de tres componentes: metales pesados, contaminantes orgánicos y organismos patógenos. Por lo que el tratamiento y confinamiento de lodos se ha convertido en uno de los mayores retos para la conservación del medio ambiente.

En la actualidad uno de los métodos de disposición de lodo más empleado en E. U. A. y Canadá es la aplicación de lodos al terreno. La aplicación de lodos activados a terrenos agrícolas está muy extendida como

método de recuperación de terrenos marginales para usos productivos y aprovechamiento de los nutrientes contenidos en el lodo.

Torres y Zarate (1996) comentaron que los Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, (SADM), para el saneamiento de las aguas residuales del Área Metropolitana de Monterrey, cuenta con tres plantas de tratamiento (Norte, Noreste y Dulces Nombres) descargando dichas aguas en condiciones adecuadas dentro de las normas ecológicas en el Río Pesquería. En el Cuadro 2.1 se presentan las características principales de estas tres plantas tratadoras de aguas residuales.

Cuadro 2.1. Características principales de las plantas tratadoras de aguas residuales: Norte, Noreste y Dulces Nombres.

Planta	Ubicación Municipio	Área (ha)	Capacidad (lps)		Método de Tratamiento	Inicio de Operación	Población Beneficiada (Habitantes)
			Actual	Total			
Norte	Escobedo	48	2,500	6,000	Lodos activados, aeración por difusión a contra corriente. Disposición de lodos anaerobia. Deshidratación mediante filtros prensa de banda.	Julio, 1995	860,000
Noreste	Apodaca	18.36	500	4,000	Lodos activados, aeración extendida. Disposición de lodos aerobia. Deshidratación mediante filtros prensa de banda.	Mayo, 1995	240,000
Dulces Nombres	Pesquería	136	5,000	10,000	Lodos activados, aeración por difusión oxígeno puro. Disposición de lodos anaerobia. Deshidratación mediante filtros prensa de banda.	Febrero, 1996	1,800,000

Torres y Zarate (1996) discutieron los resultados obtenidos de los análisis químicos de los metales pesados en los lodos residuales de las tres plantas de tratamiento de Monterrey N. L., cuyos muestreos se realizaron el 24 de marzo y el 16 de mayo de 1997. Debido a que en México no existe reglamentación para la aplicación de lodos a los suelos, dichos resultados se compararon contra los límites permisibles según la reglamentación de la regla 503 de la Environmental Protection Agency, 1995 (EPA). En el Cuadro 2.2 se presentan los resultados promedio de los análisis de lodo para metales pesados de las tres plantas de tratamiento de aguas residuales de Monterrey N. L., y la comparación con los rangos, así como la diferencia de concentraciones de metales pesados en diferentes efluentes de aguas reportados por la EPA.

Por otra parte se comparan los resultados de los análisis con los diferentes tipos de aguas residuales. El lodo de la Planta Norte, debido a su contenido de cadmio (Cd^{+2}), plomo (Pb^{+2}) y zinc (Zn^{+2}), es característico de lodo de agua residual tipo industrial. Las concentraciones de cromo (Cr^{+2}) y cobre (Cu^{+2}) en el lodo de la planta Norte, se acercan más a la clasificación de lodo de agua tipo doméstico mezclado con industrial. Los lodos de la planta Noreste son característicos de lodos procedentes de agua residual tipo domestico mezclado con industrial debido a la concentración de Zn^{+2} . Los demás metales pesados contenidos en los lodos de esta planta presentan concentraciones que se acercan más a la clasificación de lodos provenientes de agua tipo domestico.

Los lodos de la planta Dulces Nombres, debido a su contenido de Zn^{+2} , son característicos de lodos provenientes de agua residual de tipo industrial. Las concentraciones de Cr^{+2} y Pb^{+2} en los lodos de esta planta se acercan más a la clasificación de lodos de agua residual tipo domestico mezclado con industrial.

Cuadro 2.2. Metales contenidos en el lodo de las plantas de tratamiento de agua residual, Norte, Noreste y Dulces Nombres, así como los rangos y diferentes tipos de efluentes reportados por la EPA (ppm de metal de lodo seco)¹.

Metal	Norte	Noreste	Dulces Nombres	Rangos de la EPA	Doméstica	Doméstica e Industrial	Industrial
Plata (Ag^{+1})	-	-	-	0 - 960	7 - 100	20 - 300	200 - 1,680
Arsénico (As^{+3})	5.9	2.7	8.55	10 - 50	-	-	-
Boro (B^{+3})	-	-	-	200 - 1,430	50 - 400	-	-
Barrio (Ba^{+2})	-	-	-	0 - 3,000	600 - 1,000	700 - 1,350	2,600 - 6,400
Berilio (Be^{+2})	-	-	-	-	<10 - <100	<10 - <100	<40 - <100
Cadmio (Cd^{+2})	43	4.8	7	0 - 1,100	<10 - <400	90 - 240	40 - 200
Cobalto (Co^{+2})	17.2	5.9	20.5	0 - 800	20 - <400	400 - 500	<40 - 500
Cromo (Cr^{+2})	1,765	153.5	1,200	22 - 30,000	50 - 200	260 - 2,650	1,240 - 2,700
Cobre (Cu^{+2})	1,135	175.5	748.5	45 - 16,030	95 - 700	960 - 2,300	1,640 - 4,700
Mercurio (Hg^{+2})	5.2	2.9	7.75	0 - 89	1 - 11.2	2.6 - 5.0	0.6 - 3
Manganeso (Mn^{+2})	-	-	-	100 - 8,800	100 - 300	500 - 6,100	640 - 6,100
Níquel (Ni^{+2})	241	25.5	311.5	0 - 2,800	110 - 400	0 - 900	440 - 2,800
Plomo (Pb^{+2})	3,580	228.5	2,030	80 - 26,000	<200 - <500	760 - 2,790	1,280 - 8,300
Estroncio (Sr^{+2})	-	-	-	0 - 2,230	100 - 200	100 - 1,600	80 - 2,100
Selenio (Se^{+1})	3.15	5.55	2.6	10 - 180	-	-	-
Vanadio (V^{+2})	-	-	-	0 - 2,100	<500 - 1,000	<200 - 500	1,000 - 2,000
Zinc (Zn^{+2})	9,315	1,975	7,770	51 - 28,360	1,000 - 1,800	800 - 4,600	3,200 - 14,000

¹ Promedio calculado de resultados de muestras de lodo tomadas el 24 de marzo de 1997 y el 16 de mayo de 1997.

Fuente: Adaptación de Burchardy, 1981.

En el Diario Oficial de la Federación (2001) establece la Norma Oficial (NOM - 052) en donde en el Artículo 47 se dan las especificaciones y se presentan los límites máximos permisibles para los metales pesados (Cuadro 2.3). También están las normas que determinaron la frecuencia de muestreo y el análisis para los lodos establecidos en función de su aprovechamiento y disposición final (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.3. Límites máximos permisibles de metales pesados para los lodos.

Contaminante (determinados en forma total)	Excelente ppm en base seca	Bueno ppm en base seca
As ⁺³	41	75
Cd ⁺²	39	85
Cr ⁺²	1 200	3 000
Cu ⁺²	1 500	4 300
Pb ⁺²	300	840
Hg ⁺²	17	57
Ni ⁺²	420	420
Zn ⁺²	2 800	7 500

Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993, referida en el punto 2 de esta Norma.

Cuadro 2.4. Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos

Aprovechamiento y disposición final	Frecuencia	Muestreo y análisis
Jardines y macetas de casas habitación, edificios públicos y privados, áreas verdes para recreación pública y privada con contacto directo humano, viveros y campos deportivos.	Semestral Bimestral	Metales pesados. Patógenos y parásitos.
Camellones urbanos y en vías de comunicación, panteones y bosques.		
Terrenos con fines agrícolas, restauración de suelos y de paisajes.	Semestral Trimestral	Metales pesados. Patógenos y parásitos.
Disposición final.	Trimestral	Patógenos y parásitos.

Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993, referida en el punto 2 de esta Norma.

2.2. Utilización de los lodos activados

2.2.1. Aplicación en la agricultura

Sorber (1994) mencionó que los lodos que contienen principalmente productos orgánicos con altos contenidos de nutrimentos esenciales para las plantas, pueden ser benéficamente reciclados como fertilizantes y mejoradores de suelo.

Torres y Zarate (1996) mencionaron que los lodos activados pueden ser reutilizados para su aplicación al suelo, con la ventaja de que mejoran la productividad del terreno por la adición de M. O. y de los nutrimentos a la tierra; así como también, como fertilizante puede incrementar la producción de los cultivos y al mismo tiempo, reducir los costos agrícolas por disminución del consumo de fertilizantes químicos. Sin embargo, también señalaron que el contenido orgánico del suelo mejorado con el uso de lodos activados, incrementa la retención del agua y mejora el drenaje, aligera los suelos densos y enriquece los suelos arenosos.

Marecos (1997) reporta que la reutilización de aguas residuales recuperadas o de biosólidos de Portugal representa un gran beneficio para la agricultura, ya que hacen disponible por lo menos 10 % de las necesidades de agua para irrigación y aportan M. O. y nutrimentos al suelo. El mismo autor comentó que las características químicas de los biosólidos de algunas plantas de tratamientos municipales portuguesas, son favorables en cuanto al contenido de metales pesados, permitiendo una segura reutilización para la agricultura.

Llagoster y López (1997) encontraron que el reciclaje de los lodos activados tiene un efecto benéfico para el suelo y para los vegetales, tanto como abono orgánico que supone el ahorro de los fertilizantes nitrogenados y fosfatados inorgánicos, además del enriquecimiento de M. O. al suelo. Ellos recomendaron varias dosis de abonado en diferentes cultivos como: trigo, cebada y avena con una dosis de 30 – 35 para maíz con dosis de 45 – 60 t ha⁻¹.

Cazurra (1997) señaló que la aplicación de lodos al suelo como fertilizante o corrector, era la opción más atractiva en las circunstancias específicas de Cataluña; las limitaciones más importantes para la aplicación al suelo de los lodos se refieren a la calidad del lodo, a la disponibilidad de terrenos aptos y a la complejidad de tareas de gestión, control y seguimiento.

Salgot (1997) estableció que deben llevarse a cabo análisis específicos para la aplicación agrícola de los lodos activados, principalmente análisis de los lodos y suelos antes de aplicarlos, así como después de la misma. La forma de aplicación de los lodos en el sistema suelo – planta, depende de las características del suelo, instalaciones y maquinaria disponible, así como la distancia de las estaciones depuradoras de aguas residuales, ya que las tierras donde los lodos son aplicados deberán ser controladas durante un periodo de tiempo razonable, comprobando si los lodos son fácilmente incorporados al suelo o si hay pérdidas por diversos motivos. Si el suelo, planta y lodos cumplen ampliamente los requisitos legales, los lodos deberán ser aplicados, siendo necesarias las directrices de trabajo o normas de aplicación para el agricultor.

Martin *et al.* (1997) comentaron que la depuración de aguas residuales, urbanas e industriales, producidas por la ciudad de Sevilla y su área de influencia (Dos Hermanas y Alcalá de Guadaíra), generan anualmente un volumen de unas 40,000 t de lodos activados, lo que supone una producción de unas 8,800 t de materia seca año⁻¹. Los resultados obtenidos del control de calidad, revelan una riqueza órgano-mineral interesante (C: 30%, N: 3.5%, P:

0.8%) y contenidos en metales pesados acordes con las normativas europeas y nacionales (CEE 278/86; RD 1310/90), lo que unido a la gran actividad agrícola de la zona, posibilita su reutilización en el sector. Los lodos tratados, son transformados en un producto (composta) de alto valor órgano-mineral (C: 25%, N: 2,5-3%), deshidratado (80-85% sequedad), higienizado, con granulometría semifina y de color y olor agradables, lo que permite su correcta reutilización.

2.2.2. El Uso de lodos activados como aporte de nutrimentos

Martínez (1995) encontró algunos aspectos que requieren atención especial en la utilización de residuos urbanos en la agricultura, entre ellos se consideran la mineralización y solubilización del nitrógeno (N), fósforo (P) y la tasa de solubilización del potasio (K) y de los metales en nuestras condiciones edafoclimáticas (efectos de la temperatura, el riego, la lluvia, labores, etc.) así como los efectos de los residuos urbanos sobre la producción agrícola, calidad de la cosecha y composición de los residuos de cosecha y calidad del suelo.

Cristóbal y Heros (1997) encontraron que el contenido de M. O. en los lodos es similar al de los estiércoles tradicionales, siendo ricos en N y P; por otra parte, se ha comprobado que el lodo se comporta como un fertilizante de liberación lenta, minimizándose con su uso la contaminación de aguas subterráneas por los nitratos (NO_3^-) de origen agrícola, fenómeno indeseable que ocurre con las prácticas de fertilización química intensiva.

Hani, *et al.* (1996) consideraron que el uso de lodos municipales pueden tener N, P y K nutrimentos importantes para las plantas y en el caso del N eventualmente puede causar problemas de succulencia, excesivo crecimiento vegetativo, retraso en la floración y la fructificación, bajo contenido de azúcares en los frutos y frutos insípidos; el Cu^{+2} , Ni^{+2} y Zn^{+2} son metales pesados, los cuales siempre están contenidos en los lodos bajo niveles permisibles; además, son absorbidos por las plantas y retenidos en la raíz, una pequeña fracción llega a los tallos, una cantidad menor a las hojas y aún menor a los frutos.

Papadopoulos y Stylianou (1988) comentaron que el N que se encuentra en las aguas negras es fuente excelente de fertilizante. El rendimiento de los cultivos, regados con aguas negras, fue mayor que el de los cultivos que se riegan con aguas normales.

Demuyneck *et al.* (1985) mencionaron que la dispersión del N del efluente tratado es más alta que la de los efluentes no tratados o los que han sido estabilizados usando otros métodos. El rendimiento de los cultivos que demandan altas cantidades de N, como el maíz, se incrementa por efecto del riego con aguas negras.

Metcalf y Eddy (1994) comentaron que los lodos residuales contienen todos los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas; el N y P son los más abundantes y estos contribuyen a la nutrición de la planta.

Metcalf y Eddy (1994) y Dean y Smith (1993) coincidieron en que, el lodo tratado contiene de 1 a 6 % de N en base a peso seco. Por otra parte, Lorenz y Maynard (1988) comentaron que el N en los fertilizantes comerciales tienen un rango de 11 a 82 %.

Broadbent (1973) mencionó que el lodo tratado contiene N orgánico e inorgánico disponible para la planta, la proporción es relativa dependiendo de los procesos, aeróbicos o anaeróbicos de los lodos. Sin embargo, Linden *et al.* (1983) comentaron que en la digestión anaeróbica del lodo líquido, la oxidación microbiana de los materiales orgánicos es incompleta, y el N amoniacal es esencialmente en células microbianas. En la digestión aerobia, la oxidación microbiana es mayor y hay menos N orgánico residual que en la digestión anaeróbica. El N amoniacal esta sobre el 10 % del N total en la digestión aeróbica en lodos y sobre un 30 % del N total en digestión anaeróbica. Del mismo modo, cuando la digestión anaerobia de los lodos es de agua residual, parte del N amoniacal se pierde con el agua.

Parker y Sommers (1983) opinaron que los lodos son usados como una fuente de N. El N aplicado por los lodos no excede a la aplicación agronómica como fertilizante, el N lixiviado a la zona radicular puede contaminar el terreno con el agua residual. Para determinar la cantidad de lodo necesario para el requerimiento de N para las cosechas, es importante saber la proporción relativa de N orgánico. La forma del N inorgánico como nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) son inmediatamente disponibles por el cultivo, las formas de N orgánico

no esta disponibles para el cultivo y primero deben ser mineralizados por microorganismos a formas inorgánicas. La mineralización depende de un número de factores incluyendo el tipo de lodo, la relación carbono:nitrógeno (C:N) del suelo y/o lodo, clima, tipo de suelo y contenido de agua. En general, los rangos de la mineralización del N orgánico en lodo compostado y lodo seco son menos que en los lodos líquidos.

Lorenz y Maynard (1988) mencionan que normalmente los fertilizantes comerciales contienen entre 8 y 24 % de P, sin embargo, Metcalf y Eddy (1994) y Dean y Smith, (1993) comentaron que normalmente el lodo contiene de 0.8 y 6.1 % de P y que los lodos están presentes en formas inorgánicas y orgánicas. La proporción de cada uno varia dependiendo de la fuente de las aguas residuales municipales y del tratamiento de los lodos. Las formas inorgánicas del P son completamente insolubles y el P tiende a concentrarse en las fases sólidas orgánicas e inorgánicas. Por ejemplo, un lodo contiene 1.5 % de P y considerando una aplicación de 10 t ha^{-1} , se suministrarían $150 \text{ kg de P ha}^{-1}$. En esta aplicación, la disponibilidad de P puede ser excesiva en muchas áreas, particularmente donde abunda el abono animal y donde los niveles de P están arriba de las necesidades máximas de cultivo en producción. Estos altos niveles incrementar significativamente el riesgo de contaminar los mantos acuíferos.

Linden *et al.* (1983) mencionaron que en adición a N y P, por los lodos contienen otros nutrimentos esenciales para el crecimiento de los cultivos, incluyendo Ca^{+2} , Fe^{+2} , Mg^{+2} , Mn^{+2} y Zn^{+2} .

Chaney (1990) opinó que los lodos tratados son aplicados al suelo según la proporción agronómica para N, pero contienen muchos nutrientes esenciales, con la posible excepción de K, usualmente presentes en cantidades adecuadas, cubriendo las necesidades del cultivo.

Chang *et al.* (1983) y Metzger y Yaron (1987) coincidieron que generalmente la aplicación de los lodos incrementa la capacidad de retención del agua en el suelo. El contenido del carbono orgánico de los lodos puede afectar la retención del agua, ya sea por efecto directo de las partículas orgánicas mismas o de un efecto indirecto en otras propiedades físicas (tales como la densidad de masa, la porosidad y distribución del tamaño de poros). Algunos investigadores han reportado un incremento en la capacidad de retención del agua de los suelos a capacidad de campo y punto de marchitez seguido de la aplicación de lodos

Los lodos activados biológicamente y estabilizados, contienen en promedio aproximadamente 50% de M. O. en base a peso seco. Después de su adicción al suelo, los lodos se descomponen en dióxido de carbono (CO₂), agua, ácidos orgánicos solubles de bajo peso molecular, M. O. residual y constituyentes inorgánicos (nutrimentos). Aunque la fracción orgánica de los lodos se convierte en CO₂ y agua, alguna parte se vuelve una capa estable de humus en el suelo (Boyd *et al.* 1980; Hernández *et al.*, 1994) y sirve para incrementar la carga neta negativa del suelo y su capacidad de intercambio de cationes (CIC) (National Research Council, 1994; Thompson *et al.*, 1989). Una

alta CIC es deseable por que previene la pérdida de nutrientes esenciales por percolación (Broadbent, 1973; National Research Council, 1977). Colectivamente, los constituyentes liberados de los lodos después de su descomposición y presentes en las aguas de desecho pueden entrar en 4 grupos:

- 1). Cationes, aniones y moléculas más solubles.
- 2). Elementos traza, productos de moderadas reacciones solubles.
- 3). Químicos inorgánicos potencialmente perjudiciales.
- 4). Orgánicos potencialmente perjudiciales.

Seoáñez (1999) mencionó que la distribución del Zn^{+2} en la corteza terrestre se encuentra en rocas de origen ígneo, como los basaltos y rocas sedimentarias por abundancia de esquistos y en los minerales de naturaleza arcillosa, las formas más comunes son el sulfuro de zinc, el carbonato de zinc y diversos silicatos. También el Zn^{+2} sustituye a los iones de Mg^{+2} y Fe^{+2} . Así, el Zn^{+2} es adsorbido en los lugares de cambio de los minerales arcillosos no ocupados por el aluminio (Al^{+3}) también es adsorbido por la M. O., mediante la formación de complejos de alta estabilidad con los ácidos húmicos y fúlvicos, así que el Zn^{+2} entre los metales pesados es uno de los más móviles, aunque también dependa del pH.

Haulin *et al.* (1999) comentaron que la concentración en la solución del suelo y la disponibilidad del Zn^{+2} en la planta, esta predominantemente controlada por el pH; el Zn^{+2} es adsorbido por las arcillas y superficies

orgánicas del suelo. La planta absorbe por la raíz el Zn^{+2} como divalente y este actúa como componente de complejos orgánicos naturales, así como en actividades enzimáticas, pero no saben si actúa como una función estructural o un cofactor de regulación. El Zn^{+2} es importante en la síntesis de triptofano, un componente de alguna proteína, producido por el crecimiento de hormonas (auxina) tal como el ácido indolacético. Se reduce el crecimiento hormonal con la deficiencia de Zn^{+2} en la planta. El Zn^{+2} en la solución del suelo es bajo en el rango de 2 a 70 ppm, más que en la solución del medio de Zn^{+2} en el complejo de la solución por M. O. Así mismo, comentaron que el Ni^{+2} , fue establecido como un nutriente esencial de las plantas superiores en 1987. El contenido de Ni^{+2} en los cultivos de las plantas normalmente esta en el rango de 0.1 a 1.0 ppm en peso seco y este es absorbido como Ni^{+2} .

2.3. Efectos indeseables de los lodos activados

2.3.1. Contaminación por metales pesados

Saña (1995) opinó que un abonado incorrecto puede serlo por exceso o por defecto. Si las aportaciones de abonados son insuficientes para las características del suelo y las necesidades del cultivo, las consecuencias suelen ser sólo las que se derivan de una muy probable mala cosecha. En cambio, con un abonado excesivo, existe el claro peligro de afectar negativamente la fertilidad del suelo y la calidad del cultivo, del agua o de la atmósfera, a corto, medio o largo plazo. Donde los efectos en el suelo suelen ser el desequilibrio

nutricional (con la secuela de toxicidades o antagonismos), la salinización o las alteraciones de pH. Por lo que las consecuencias sobre el cultivo son el consumo de lujo y la acumulación de compuestos (NO_3^- , elementos potencialmente tóxicos, etc.) que pueden alterar la salud de los animales consumidores, donde la contaminación de las aguas con NO_3^- o fosfatos es el efecto más notable de los abonados excesivos, los cuales también contribuyen a su salinización.

Felipó (1995) mencionó que en general un pH inferior a 6.5 favorece la solubilización de los metales pesados a excepción del molibdeno (Mo^{+6}) y Se^{-1} . Si la aireación es adecuada, algunos pasan a formas más oxidadas y menos solubles (Fe^{+2} y Mn^{+2}), algunos (As^{+3} , Cu^{+2} , Cr^{+2} , Ni^{+2} y Pb^{+2}) son poco móviles porque precipitan o se asocian a la M. O. y arcillas del suelo. Sin embargo, la absorción por las plantas está condicionada tanto por el elemento, su concentración y grado de disponibilidad, como por la especie vegetal y la interacción con macronutrientes.

Por otro lado, la biodisponibilidad de metales en el sistema suelo – planta por aporte de lodos, se ha estimado a partir de los coeficientes de transferencia, observándose que el Cd^{+2} y el Zn^{+2} poseen valores más elevados. En general, parece que la biodisponibilidad es superior para Cd^{+2} , Cu^{+2} , Ni^{+2} y Zn^{+2} , que para Pb^{+2} , Hg^{+2} y Cr^{+2} , pero incluso para los elementos más móviles, la cantidad de metal transferida al cultivo es inferior al 0.05% de la cantidad aplicada anualmente por aporte de lodos. Sin embargo, la acumulación en determinados

tejidos u órganos es variable, algunos como por ejemplo el Cr^{+2} y Pb^{+2} son bloqueados a nivel radicular, otros, como Cd^{+2} y Hg^{+2} son más zootóxicos y fitotóxicos; es decir, se pueden acumular en el tejido vegetal hasta concentraciones tóxicas para animales, sin efecto adverso para la planta. Por el contrario, la elevada fitotóxicidad del Cu^{+2} , Ni^{+2} y Zn^{+2} hacen que el vegetal actúe de barrera de protección frente a la cadena trófica. En general, las hortalizas tienden a asimilarlos con mayor facilidad que las gramíneas, siendo más sensibles a la toxicidad las primeras y más tolerantes las segundas.

Chang y Page (1990) mencionaron que a diferencia de las aguas residuales, el uso de los lodos activados incorporan al suelo una mayor cantidad de metales pesados; sin embargo, la mayoría de los lodos incorporados al suelo son asimilados a través de los ciclos bioquímicos. La habilidad de estos ciclos para incorporar metales es limitada, lo cual causa su acumulación en las capas de suelo. Estos elementos tienen una larga vida de degradación y son fuertemente adsorbidos por los suelos. Muchos compuestos químicos orgánicos, como el DDT y el bifenil policlorinado, son asimilados dentro del ciclo del carbono en una forma muy lenta, a tal grado que ello pudieran tomar de 40 a 70 años para que el 99% de estos compuestos agregados sean degradados.

Page y Chang (1981) mencionaron que en el suelo, los metales pesados son inmovilizados por adsorción, precipitación e intercambio catiónico. Por ello, al regar con aguas negras, hay una baja o nula asimilación de dichos

elementos. Así, las aguas negras tratadas, pueden ser utilizadas para el riego por varias décadas antes de que los elementos pesados se acumulen y alcancen niveles tóxicos para los cultivos.

Hue (1996) opinó que el contenido de metales pesados es el factor más importante para determinar el uso de lodos y previó que la EPA estaría de acuerdo con este enfoque, como lo muestra la regulación 503. En esta norma están regulados 10 metales los cuales son: As^{+2} , Cd^{+2} , Cr^{+2} , Cu^{+2} , Pb^{+2} , Hg^{+2} , Mo^{+6} , Ni^{+2} , Se^{+1} y Zn^{+2} . En el Cuadro 2.5 se observan los límites de concentración de los iones contaminantes aprobados por la EPA en los biosólidos si el suelo es de uso agrícola. Los biosólidos, cuyas concentraciones de metal, están entre esos dos límites pueden ser aplicados con algunas restricciones. En contraste, los biosólidos cuyos límites de concentraciones de metal están abajo de los límites de concentración pueden aplicarse al suelo como enmienda o como fertilizante con mínimas restricciones.

Cuadro 2.5. Límites contaminantes de EPA para suelos con aplicación de biosólidos regulación 503.

Contaminantes	Mínima y máxima concentración para biosólidos (ppm)
As^{+3}	41 – 75
Cd^{+2}	39 – 85
Cr^{+2}	1200 – 3000
Cu^{+2}	1500 – 4300
Pb^{+2}	300 – 840
Hg^{+2}	17 – 57
Mo^{+6}	18 – 75
Ni^{+2}	110 – 420
Se^{+1}	36 – 100
Zn^{+2}	2800 – 7500

El límite máximo de concentración para los 10 metales en la norma 503 de la EPA, fue señalado como parcial debido a que se argumentó que cuando los metales pesados en biosólidos son suficientemente altos, ellos pueden actuar como una cal del metal, y de este modo causar severa toxicidad para las plantas y animales.

En el caso de Zn^{+2} para mantener 1 ppm de Zn^{+2} disponible para la planta (1 ppm de Zn^{+2}) depende de la concentración del Zn^{+2} en el suelo y de su pH: a pH 7 se requiere tener 1200 ppm en el suelo a pH 6 se requiere tener 100 ppm en el suelo y a pH 5 se requiere solamente 40 ppm de Zn^{+2} en el suelo para mantener 1 ppm Zn en solución. Esto es porque es recomendado que el pH del suelo sea ajustado entre 6.5 y 7.0 cuando los biosólidos son aplicados y sean mantenidos a 6 o más mientras la tierra sea usada para producción de cultivos para consumo del hombre a animal.

Logan y Chaney (1983) comentaron que los metales pesados de los lodos pueden permanecer en suelos varios años después de la aplicación. Sin embargo, cuando los lodos se aplican a suelos en los niveles controlados por los niveles agronómicos, el transporte de metales pesados en el agua es muy bajo a menos que los lodos tengan niveles extraordinariamente altos de iones de metal.

Felipo (2001) comentó que la disponibilidad de los metales pesados en el suelo esta determinada principalmente por la especie química y las

características del suelo (pH potencial redox, contenido de M. O., contenido y naturaleza de las arcillas). Los metales pesados del suelo contenidos en la fracción biodisponible o bioasimilable, pueden ser absorbidos por las plantas, proceso que está condicionado por el elemento, su concentración y grado de disponibilidad, así como por la especie vegetal.

2.3.2. Contaminación por patógenos

Metcalf y Eddy (1994) establecieron que la desinfección del lodo está teniendo una importante consideración como un proceso adicional, debido a las estrictas reglamentaciones para la reutilización y aplicación de éstos sobre el suelo. Cuando el lodo es aplicado al terreno, se requiere del control (destrucción o inactivación) de microorganismos patógenos con el fin de minimizar daños a la salud pública.

Seoáñez (1996) mencionó que hay diversos organismos presentes en los lodos activados. Encontró fauna de los protozoarios; Ciliados de varios tipos (*Colpidium*, *Paramecium*, *Vorticella*), Rizópodos (*Amoeba*), Flagelados, los Metazoarios están los Rotíferos, así como Nematodos, los Anélidos. Por otra parte, las bacterias aerobias y anaerobias (*Pseudomonas*, *Vibro*, *Spirillum*, *Aeromonas*, *Acinetobacter*, *Xanthomonas*, *Enterobacteriae*, *Zoogleas*), algunas nitrificantes como *Bacillus*, también se encontró con diversos tipos de algas, hongos como *Geotrichum*, *Sporotrichum*. También comentó que los metales sufren diversos tipos de ataques por los organismos presentes en el suelo,

como en el caso del Mn que se presenta como Mn^{+2} o Mn^{+4} , si el pH del medio es bajo (inferior a 5.5) la tendencia es hacia el ion Mn^{+2} , o si el pH es elevado (superior a 8) aparece una oxidación a MnO_2 (es decir Mn^{+4}), donde la oxidación la realizan las bacterias unicelulares del tipo *Bacillus* (*Aerobacter*, *Flauobacterium*), bacterias ferruginosas (*Clonothrix*, *Cladothrix*, *Leptothrix*), *Pseudomonas* y ciertos hongos (*Cladosporium*, *Helminthosporium*)

Rieradevall (1995) comentó que el problema de los gérmenes patógenos es muy diferente en los residuos ganaderos y en los agroalimentarios. En los últimos tienen niveles casi inexistentes, ya que durante el proceso industrial agroalimentario, los residuos se han eliminado (temperatura superior a 60°C).

Los microorganismos de suelo incluyen bacterias, actinomicetes, hongos y algas; ellos son importantes en la descomposición de materia orgánica y en el ciclo de alimentos de la planta como N, P, y azufre (S). Las acumulaciones de metales pesados en suelos están asociados con las aplicaciones de lodos. A largo plazo, se ha mostrado que afecta la biomasa y la actividad microbiana, la fijación biológica de N, y micorrizas vesicular-arbuscular (Giller *et al.*, 1989; McGrath *et al.*, 1988; Smith, 1991) a la asociación simbiótica entre plantas y los hongos.

2.4. Trabajos de investigación con lodos aplicados

Bioxidera y Danés (1995) comentaron que los materiales orgánicos disponibles (purines, estiércoles, residuos de sólidos urbanos, lodos de depuradoras de agua, etc.) son muy variados y su número y cantidad crece continuamente. Partiendo de que deben ser considerados como fertilizantes, interesa conocer su composición en macronutrientes (N, P, K) su forma (en el caso del N: orgánico, amoniacal o nítrica) etc.; además hay que conocer otros aspectos como el contenido de M. O., salinidad y metales pesados.

Llagoster y López (1997) realizaron un análisis del suelo para determinar su aptitud para recibir lodos, donde evaluaron los parámetros como: pH, metales pesados (Cd^{+2} , Cu^{+2} , Ni^{+2} , Pb^{+2} , Zn^{+2} , Hg^{+2} , y Cr^{+2}), CE, carbonatos totales, carbón orgánico, M. O., N total, relación C:N, P, K, sodio (Na), Ca^{+2} , Mg^{+2} , suma de cationes, CIC, grado de saturación, granulometría, clase y familia textural. Así mismo el análisis del lodo y comprobación de su aptitud para su uso agrícola.

Acosta *et al.* (1995) mencionaron que en el estado de Falcón, en Venezuela, existen numerosas hectáreas de suelo con deficiencias de M. O., macro y microelementos, donde la aplicación de lodos residuales provenientes de la planta de tratamiento de aguas servidas de Maraven, Península de Paraguaná, como fertilizante órgano-mineral, cubre ciertas deficiencias características de estos suelos. Se evaluó a nivel de invernadero, la influencia

de la aplicación de estos lodos sobre la composición química del suelo. El lodo fue aplicado a 0 (control), 20, 40, 60, 80, 120 y 200 t ha⁻¹ efectuando un ensayo de incubación. La aplicación del lodo residual, incrementó significativamente el pH, Ca⁺² intercambiable, P disponible y la CIC, como también el contenido de algunos cationes disponibles.

Los incrementos más significativos fueron logrados a las tasas de 120 y 200 t ha⁻¹ de lodo. Los lodos suministraron cantidades suficientes de macro y micro nutrientes al suelo, sugiriendo que podrían ser usados como fertilizantes, sin que superen en ningún caso, los límites de toxicidad establecidos por las normas de aplicación de estos lodos. En vista de los resultados obtenidos con la aplicación de estos lodos al suelo, se podrá pensar que su uso en suelos arenosos, como el empleado bajos en M. O., contribuirán grandemente a aumentar la productividad de dichos suelos. Además, estos residuos generarían un ahorro en el uso de fertilizantes orgánicos comerciales, su uso sobre el suelo podría dar solución al problema ambiental de su disposición final.

Beker (1989) encontró que los lodos provenientes de aguas negras en el suelo, no pueden aumentar los metales pesados del suelo, debido al bajo nivel de elementos contaminantes que estos lodos contienen. Por el contrario, la aplicación de estos incrementa el pH del suelo, lo cual reduce la concentración de elementos pesados absorbidos por los cultivos.

Marks *et al.* (1981) realizaron experimentos de campo para probar los efectos de metales contaminantes (Zn^{+2} , Cu^{+2} y Ni^{+2}) con aguas negras sobre algunas hortalizas. Encontró que el betabel (*Beta vulgaris* L.), la lechuga (*Lactuca sativa* L.) y el apio (*Apium graveolens*) son muy sensibles al Ni^{+2} , el apio es muy tolerante a grandes cantidades de Cu^{+2} y hasta dos veces más en Zn^{+2} , igualmente el betabel y la lechuga. La evidencia de la toxicidad del metal depende del tipo de suelo. Los suelos arenosos con bajos contenidos de M. O., tienen una baja capacidad de intercambio de bases y los cultivos que crecen ahí presentan bajas tolerancias a la adición de metales.

Ríos y Aceves (1979) realizaron un estudio sobre los suelos y las aguas de riego del distrito de riego 03 ubicado en Tula, Hgo., con el fin de estimar el grado de contaminación de los suelos causado por elementos tóxicos transportados por aguas negras de la ciudad de México. De acuerdo con los resultados obtenidos, se observaron concentraciones altas de B^{+3} y Na. Con respecto a los suelos, en general resultaron ser suelos normales, sin problemas de sales solubles y de Na, notándose una mayor acumulación de B^{+3} en los suelos que tienen más tiempo de estarse regando con aguas negras, pero sin llegar aún a niveles alarmantes. Los cultivos que se desarrollan en la región han tenido buenos rendimientos, por lo que se concluye que han sido mayores los beneficios que los daños ocasionados por la utilización de las aguas negras para el riego agrícola.

Foroughi (1983) estudió el efecto de diferentes índices de Cu^{+2} , Zn^{+2} , Cd^{+2} , Ni^{+2} y Pb^{+2} en espinacas (*Spinacea oleracea*), tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) y lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en hidroponía y en sustrato sólido. En los experimentos en sustrato (arena y suelo limo-arenoso) se aplicaron diferentes cantidades de los elementos citados, en las diferentes especies. Tanto en hidroponía como en sustrato sólido, los niveles de Cr^{+2} se incrementaron en las raíces al aumentar las concentraciones del Cr^{+2} . El Pb^{+2} no aumento en las raíces al incrementar los niveles en que éste fue aplicado. Solo pequeñas cantidades de Cd^{+2} y Pb^{+2} fueron transportadas a la parte superior del suelo y los niveles de Cd^{+2} , Cu^{+2} , Ni^{+2} y Zn^{+2} aplicados en hidroponía incrementaron la acumulación de estos metales en las raíces en la parte superior del suelo. El aumento en los niveles de Zn^{+2} , Cu^{+2} y Cd^{+2} en el sustrato disminuyó el contenido de Mn^{+2} en las partes superiores del suelo.

Siebe *et al.* (1998) evaluaron la utilización de aguas residuales de la zona metropolitana del Valle de México sin un tratamiento previo para el riego agrícola en el Distrito de Riego 03 en el Estado de Hidalgo. Donde colectaron muestras compuestas de la capa arable de 50 parcelas y toda la planta superficial en el caso de forraje alfalfa (*Medicago sativa*), avena (*Avena sativa* L) y nabo (*Brassica rapa* L), los frutos calabacita (*Curcubita pepo* spp), Chile (*Capsicum annuum*), betabel (*Beta vulgaris* L.), maíz (*Zea mays* L.) granos y hojas así como quelites (*Amaranthus* spp.), malvas (*Malva*) y lengua de vaca (*Rumex crispum* L.). Encontraron que el contenido de metales en el suelo está entre 18 y 132 ppm para Pb^{+2} , 1.75 y 5 ppm para Cd^{+2} , 15 y 45 ppm para Ni^{+2} ,

15 y 75 ppm para Cu^{+2} , 50 y 330 ppm para Zn^{+2} y 1 y 5 ppm para Co^{+2} . En la mayoría de las parcelas los contenidos se encuentran dentro de intervalos considerados como normales, excediéndose sólo los de Pb^{+2} y Zn^{+2} en 3 parcelas. Los contenidos de metales en tejidos vegetales se encuentran entre 0.01 y 4.98 ppm para Pb^{+2} , 0.01 y 0.95 ppm para Cd^{+2} , 0.63 y 17.8 ppm para Cu^{+2} , 0.01 y 0.24 ppm para Co^{+2} , 0.01 y 6.7 ppm para Ni^{+2} y 13 y 72 ppm para Zn^{+2} . La calabacita absorbió la mayor cantidad de Cu^{+2} , Co^{+2} y Zn^{+2} ; los granos de maíz, la alfalfa y el chile mostraron los menores contenidos de estos elementos. La avena y la calabacita mostraron los contenidos más elevados de Ni^{+2} , mientras que el nabo, la avena y la alfalfa mostraron los mayores contenidos de Pb^{+2} . Los cultivos con los mayores contenidos de Cd^{+2} fueron el nabo, los quelites y la malva.

Canet *et al.* (1996) comentaron que existen marcadas diferencias entre los distintos órganos para acumular metales pesados, así como, el Cr^{+2} y Pb^{+2} suelen quedar bloqueados en la raíz de los vegetales, resultando difícil su acumulación en las partes aéreas, sin embargo el Cd^{+2} y el Hg^{+2} , se consideran más zootóxicos que fitotóxicos, debido a que pueden alcanzar niveles tóxicos para los animales antes de provocar efectos desfavorables en las plantas; otros metales como: Cu^{+2} , Ni^{+2} y Zn^{+2} , son de alta fitotoxicidad, pudiendo afectar a plantas y animales en su incorporación.

2.5. Cultivo del maíz

El maíz se originó, desde el punto de vista citogenético del maíz silvestre, y su origen geográfico se localiza en México y Centroamérica.

Robles (1979) estableció la siguiente clasificación taxonómica del maíz:

REINO	VEGETAL
División	Tracheophyta
Subdivisión	Pteropsidae
Clase	Angiospermae
Subclase	Monocotiledoneae
Grupo	Glumiflora
Orden	Graminales
Familia	Gramineae
Tribu	Maydeae
Género	Zea
Especie	Mays

El maíz tiene un hábito de crecimiento anual; su clasificación sexual es de una planta monoica, unisexual, incompleta, imperfecta (pistiliadas y estaminadas). La polinización es anemófila, principalmente y raramente entomófila. Para la fecundación se producen cuatro gramos de polen por cada óvulo en el proceso de la gametogénesis. Su sistema radicular lo compone una profusa cantidad de raíces fasciculadas o fibrosas y una serie de raíces adventicias que le proporcionan mayor estabilidad a la planta, sus flores son de dos tipos y colocadas en diferente lugar de la planta, las flores estaminadas o masculinas que se encuentran dispuestas en espiguillas; estas últimas se distribuyen en ramas de la inflorescencia conocida como “espiga” la cual es una panícula abierta, y las flores pistiladas o femeninas se distribuyen en una

inflorescencia con soporte central denominado "olote", cada flor se compone de un ovario, un estilo y gran cantidad de estigmas. Por último, su semilla o grano botánicamente es un fruto en cariósida (Reyes, 1990).

2.6. Cultivo del nopal

Las cactáceas son originarias del continente americano, donde se encuentran distribuidas principalmente en las regiones áridas y semiáridas. Las especies del género *Opuntia* son originarias del sur de los Estados Unidos, México, Ecuador y Perú, el centro de origen del nopal es México, por poseer gran diversidad de especies (Tiscornia, 1976).

En el ámbito mundial, el nopal (*Opuntia spp*), recibe diferentes nombres comunes. En España se le dio el nombre de "chumbo" y a sus frutos, "higos de las indias"; los árabes los llamaron "higos de los cristianos". En México se conoce con el nombre de nopal, el cual deriva del náhuatl "nopalli", y dentro de esta lengua, al fruto se le conoce como "nochtli" (Quintanar, 1964).

En la actualidad existen diversas variedades productoras de tuna con grandes variantes en color, tamaño, grosor de cáscara y otros elementos, incluso de la flor y por la presencia y posición de las espinas en los cladodios etc., de tal forma que no resulta fácil la identificación de las especies, ya que esta diversidad se acentúa debido a que las *opuntias* constantemente sufren un proceso de hibridación que da un sinnúmero de formas y tipos más o menos

diferenciados; no obstante, el nopal se encuentra ubicado en taxones básicos como a continuación se presenta (Britton y Rose, 1963);

REINO:	VEGETAL
División:	Angiospermae
Clase:	Dicotiledoneae
Orden:	Opuntiales
Familia:	Cactaceae
Subfamilia:	Opuntioideae
Tribu:	Opuntiae
Género:	Opuntia
Subgénero:	Platyopuntia
Especie:	Opuntia spp.

El nopalito se obtiene a partir de los brotes tiernos de la mayoría de las especies de nopal, cultivadas o silvestres, aunque existen especies y variedades que bajo cultivo ofrecen características que las hacen más deseables, tal es el caso de *Opuntia ficus indica*. Esta especie presenta muy pocas espinas y en algunos casos hay ausencia total de ellas, en las variedades mejoradas de esta especie se ha logrado reducir la acidez, mucílago (substancia viscosa de algunos vegetales, comúnmente llamada baba) y espinas, haciéndolo más aceptables en el mercado. Es un recurso vegetal de mucha importancia social para los pobladores de la mayor parte del territorio nacional, una fuente de alimentación mucho antes del desarrollo de las plantas cultivadas (Bock, 1984).

Bravo (1978) comentó que en México se le llama nopal a varias especies del género *Opuntia* de la familia *Cactaceae*. Para los nopales presenta dos géneros *Opuntia* y *Nopalea*. El género *Opuntia* en México presenta cinco subgéneros, 17 series y 104 especies. El género *Nopalea* presenta 10 especies

de las cuáles la "*Nopalea Cochenillifera*" se utiliza como Nopal Verdura. En resumen, de las 104 especies de *Opuntia* y 10 de *Nopalea* se utilizan para forraje 15 especies, cinco para fruta y tres para Verdura dos de *Opuntia* y una de *Nopalea*. Así mismo, describe al *Opuntia Ficus Indica*: como que "casi no tiene espinas". Es un vegetal arborescente de 3 a 5 m de alto, su tronco es leñoso y mide de entre 20 a 50 cm de diámetro. Forma artículos oblongos (Pencas o Cladodios) de 30 a 60 cm de largo x 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor. Sus ramas están formadas por pencas de color verde opaco con areolas que contienen espinas mas o menos numerosas, amarillas y produce flores de 7 a 10 cm de largo, su fruto es oval de 5 a 10 cm de largo x 4 a 8 cm de diámetro y su color puede ser amarillo, anaranjado, rojo o purpúreo con abundante pulpa carnososa y dulce.

Por otra parte, en terrenos apropiados con pH Neutro y sin problema de plagas el Nopal puede llegar a vivir hasta 80 años. Las plantaciones comerciales de explotaciones intensivas pueden durar tres años. Los cladodios (pencas) transforman la luz en energía química a través de la fotosíntesis, están recubiertos por una cutícula del tipo lipídica, interrumpida por la presencia de los estomas mismos que permanecen cerrados durante el día. Donde la cutícula del cladodio evita la deshidratación provocada por las altas temperaturas del verano. La hidratación normal del cladodio alcanza hasta un 95% de agua en peso, por lo que la acidez contenida en el Nopal se determina en función de la hora en que se coseche.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Experimento de Maíz

3.1.1. Localización geográfica

El área en estudio se localizó en los terrenos de la planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Dulces Nombres" de la empresa Agua y Drenaje de Monterrey, la cual esta situada a 25 Km al oriente de la zona centro de Monterrey y a 4 Km al noreste del pueblo de Dulces Nombres N. L., así como también a 3 Km al sureste del aeropuerto Mariano Escobedo. Sus coordenadas geográficas son 25° 44' latitud norte y a 100° 04' longitud oeste, con respecto al meridiano de Greenwich, con una altura sobre el nivel del mar de 350 m.

3.1.2. Clima

El clima de la región de acuerdo a la clasificación climática de Köppen modificado por García (1976) corresponde a un BS₁ (h''), es un clima semiseco y cálido con lluvia escasa todo el año. Se caracteriza por una lluvia invernal mayor de 18 %, su índice de lluvia media anual fluctúa entre 500 mm y 600 mm y con temperatura mayor a 22°C. En septiembre se registra la máxima precipitación mensual, con un rango de 110 a 120 mm, y en marzo se presenta la mínima que oscila entre 10 y 15 mm. En los meses de julio y agosto, la

temperatura media más alta varía entre 31 y 32°C; mientras que en enero se presentan las mínimas promedio que fluctúa entre 13 y 14°C.

3.1.3. Suelo

Los suelos que destacan en el área de estudio son los Vertisoles; son suelos con un alto contenido de arcilla (40 a 60 %) en todo el perfil. En épocas de sequía presentan grietas de 5 cm de ancho y 100 cm de profundidad (Garza y Araujo, 1984).

3.1.4. Material vegetativo

La variedad que se utilizó para el experimento fue el maíz sintético precoz 409 con un porcentaje de germinación del 80 %.

3.1.5. Material utilizado

El lodo que se utilizó fue extraído de la planta de Tratamiento de Aguas Residuales Noreste de la misma empresa de Agua y Drenaje de Monterrey, ya que los desechos son domésticos, por lo que se tiene una concentración baja de metales pesados; en el Cuadro 3.1 se presentan las concentraciones de los metales pesados encontrados en los lodos que se aplicaron, así como la comparación con los límites permisibles de la EPA.

Cuadro 3.1. Concentración de metales pesados en los lodos aplicados en ppm.

Metal	Lodo	EPA
Cd ⁺²	4.8	0 – 1,100
Ni ⁺²	25.5	0 – 2,800
Pb ⁺²	228.5	80 - 26,000
Zn ⁺²	1.975	51 - 28,360

Además se utilizó urea como fertilizante comercial (F. C.) para utilizarse como uno de los tratamientos.

3.1.6. Diseño experimental

Para este experimento se utilizó un diseño de bloques al azar con cinco tratamientos y cinco repeticiones, dando un total de 25 unidades experimentales. Los tratamientos en estudio se presentan en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Tratamientos evaluados en el experimento de maíz.

Tratamientos	Descripción
1	4 t ha ⁻¹ lodo deshidratado* (L. D.)
2	8 t ha ⁻¹ lodo líquido* (L. L.)
3	8 t ha ⁻¹ lodo deshidratado* (L. D.)
4	Testigo
5	Fertilizante comercial (120 – 00 – 00) (F. C.)

* Fuente del lodo de la Planta Tratadora de Aguas Residuales Noreste.

3.1.7. Modelo Estadístico

El modelo estadístico utilizado para el análisis de los datos fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + t_i + B_j + \Sigma_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Efecto del tratamiento i en la repetición j .

μ = Efecto de la media verdadera general.

t_i = Efecto del tratamiento i .

B_j = Efecto del bloque j .

Σ_{ij} = Error experimental del tratamiento i en el j – ésimo bloque.

La superficie que se utilizó por cada unidad experimental fue de 36.80 m² (1.84 x 20), obteniendo un área experimental de 920 m².

Los análisis de varianza fueron procesados mediante el paquete estadístico SAS, usando una diferencia significativa al 5 %, en la prueba de medias por Duncan. Además se realizaron correlaciones entre variables morfológicas y concentración de metales pesados por medio del procedimiento Pearson. Las variables discretas (número total de hojas y ramificaciones de la espiga) fueron transformadas a valores continuos a través del procedimiento de $\sqrt{1+x}$, con la finalidad de realizar el análisis de varianza bajo los supuestos de una distribución normal.

3.2. Desarrollo del experimento de maíz.

3.2.1. Preparación del terreno

Se realizó un recorrido los días 5 y 10 de agosto de 1998 en los terrenos de la planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Dulces Nombres” con la finalidad de establecer la localización del área experimental. Una vez elegida la

superficie, se procedió a la preparación del terreno con un desmonte, arado, nivelación y rastreo.

Se delimitó el área experimental para el establecimiento de los tratamientos. Antes de la aplicación de los tratamientos, se realizó un muestreo de suelos a una profundidad de 0 – 15 cm para realizar los análisis de metales pesados.

3.2.2. Aplicación de los tratamientos

Antes de la aplicación de los lodos al suelo, se separó una muestra de estos para realizar los análisis de los metales pesados (Cd^{+2} , Pb^{+2} , Ni^{+2} y Zn^{+2}) correspondientes.

Para la aplicación del lodo deshidratado, una vez localizada la unidad experimental, se utilizó una estercoleadora para realizar una distribución uniforme en la parcela, inmediatamente después, se dio un paso de rastra para su completa incorporación al suelo.

Para el caso del lodo líquido, la aplicación de los tratamientos se hizo utilizando un camión cisterna siguiendo el mismo procedimiento mencionado anteriormente para el lodo deshidratado.

La aplicación de los lodos se realizó los días 11 y 13 de agosto de 1998. Posteriormente, del 13 al 15 de agosto se realizó el trazo y la construcción de las camas y se instaló el sistema de riego por cintillas, enterrando la cintilla en medio de la cama a una profundidad de 5 cm.

3.2.3. Manejo del cultivo

La siembra del maíz se realizó del 17 al 19 de agosto aplicando una densidad de 20 kg ha⁻¹. Se realizó en seco, a doble hilera y utilizando el método de mateado, depositando una semilla por punto a una distancia de 15 cm y una profundidad de 6 cm. En el tratamiento del F. C. (urea), se aplicó el 50 % al momento de la siembra en forma de bandas laterales a lo largo de las hileras de maíz con base a la formulación de 120-0-0.

Se aplicaron los herbicidas Harnes y Gesaprin 9D realizando una combinación de un kilogramo de Gesaprin 9D más dos litros de Harnes en 200 litros de agua por hectárea.

A los seis días después de la siembra se presentó la emergencia del maíz. Se realizó una escarda con rodillo, se aplicó insecticida vertex (Clorpirfos etil) a una dosis de 1 L ha⁻¹ para el control de *Limothrips cerealium* (Trips) y *Rhopalosiphm maidis* (pulgón) los días 2 y 4 de septiembre de 1998.

El fertilizante restante se aplicó al momento del primer muestreo el 14 de septiembre. Los días 21 y 22 de septiembre se realizó un aporte al cultivo, en ese momento también se aplicó insecticida (Cypermctrina 200 piretroide) a una dosis de 250 cc ha⁻¹ para el control de gusano cogollero (*Spodoptera frugiptera*).

La segunda aplicación de insecticida se realizó el día 30 de septiembre de 1998 aplicando Ponce 4G (Piretroide granulado) a una dosis de 10 kg ha⁻¹.

Los riegos se hicieron a intervalos de 15 días después de la siembra. El 31 de octubre, se realizó la cosecha para los tratamientos de lodos deshidratado con 4 t ha⁻¹, lodo líquido 8 t ha⁻¹ y lodo deshidratado 8 t ha⁻¹. Para el tratamiento del F. C. (urea) y testigo fue el 7 de noviembre de 1998.

3.3. Variables evaluadas

Las variables de interés sobre las cuales se midió el efecto de los tratamientos se presentan a continuación:

Altura de planta: se midió desde la base del tallo hasta la última hoja (cm) la medición se realizó a los 69 días después de la siembra.

Peso seco de la planta: la planta se recolectó completa a los 61 días después de la siembra y se puso en la estufa a 65° C por 72 horas y se determinó su peso en gramos.

Peso seco de grano: se recolectó después de la cosecha a los 81 días después de la siembra, se puso en la estufa a 65° C por 72 horas y se determinó su peso en gramos.

Número total de hojas: se contaron a los 81 días después de la siembra.

Diámetro de tallo: se midió a los 81 días después de la siembra (cm) con un vernier.

Número de ramificaciones de la espiga: se realizó el conteo a los 56 días después de la siembra.

Volumen de la mazorca: se realizaron las mediciones de longitud y diámetro de mazorca para obtener el volumen de mazorca a los 81 días después de la siembra.

Metales pesados: se utilizó el equipo de absorción atómica para determinar las concentraciones en los principales órganos del cultivo.

En el Cuadro 3.3 se presenta en forma resumida las variables y las unidades de medición utilizadas en el experimento.

Cuadro 3.3. Variables evaluadas en el experimento de maíz

Identificación de la variable	Nombre de la variable	Unidades
X1	Altura de planta	cm
X2	Peso seco de la planta	g
X3	Peso seco del grano	g
X4	Número de hojas total	Nº
X5	Diámetro de tallo	cm
X6	Número de ramificaciones de la espiga	Nº
X7	Volumen de mazorca	cm
X8	Ni ⁺² en raíz de maíz	ppm
X9	Pb ⁺² en raíz de maíz	ppm
X10	Zn ⁺² en raíz de maíz	ppm
X11	Ni ⁺² en tallo de maíz	ppm
X12	Cd ⁺² en tallo de maíz	ppm
X13	Pb ⁺² en tallo de maíz	ppm
X14	Zn ⁺² en tallo de maíz	ppm
X15	Ni ⁺² en la hoja de maíz	ppm
X16	Cd ⁺² en la hoja de maíz	ppm
X17	Pb ⁺² en la hoja de maíz	ppm
X18	Zn ⁺² en la hoja de maíz	ppm

3.4. Metodología de lectura del equipo de absorción atómica.

Para medir la concentración de metales pesados se utilizaron las raíces, tallos y hojas por separado de cinco plantas (correspondientes a una planta por muestreo) y se secaron a 65°C. Las muestras se molieron en un molino inoxidable, las muestras se colocaron en bolsas de plástico y se llevaron al laboratorio. Cada una de las muestras se procesó de la siguiente forma: se tomo un gramo de la muestra y se colocó en una mufla (Felisa modelo Fe-360, serie 010512) para acenizar a 475°C por 4.5 horas; después de dejar enfriar la

muestra a temperatura ambiente, se agregaron 2 ml de HCL concentrado. Se colocó en una plancha (Corning modelo PC-600) hasta su evaporación total, posteriormente se agregaron 25 ml de solución HCL 1N. Se dejó reposar por 10 minutos para posteriormente hacer un filtrado con papel Whatman No. 41 en un matraz de 25 ml. Sé aforó con agua bidestilada 25 ml, posteriormente, la muestra se colocó en el espectrofotómetro de absorción atómica (modelo Unicam Solar 969MKII).

3.5. Experimento de Nopal

3.5.1. Localización geográfica

El área de estudio se encuentra situada en la Facultad de Agronomía de la UANL, localizada en el kilómetro 17.5 de la carretera Zuazua - Marín, encontrándose en las coordenadas geográficas a $25^{\circ} 54''$ de latitud norte y a $100^{\circ} 3''$ de longitud oeste, con respecto al meridiano de greenwich y con una altura sobre el nivel del mar de 367.5 m (Garza y Araujo, 1984).

3.5.2. Clima

El clima de la región se clasifica de acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificado por García (1976), como Bw wh, un clima de desierto estepario, donde la temperatura se eleva a más de 40° C en el verano y desciende a varios grados bajo cero durante el invierno. La temperatura media

anual es de 21° C y la precipitación pluvial durante los últimos 10 años arroja un promedio de 573 mm.

3.5.3. Suelo

La mayor parte de estos suelos pertenecen al grupo de los feozem, sin embargo, también se presentan suelos de los llamados litosoles (lomas y cerros); fluvisoles (causes de los arroyos) y regosol (partes bajas de los taludes de cerros y sierras). Las características texturales que predominan en el área de estudio pertenecen a suelos arcillosos, migajones y francos, donde la mayor área presenta suelos profundos mayores de 1 m (Garza y Araujo, 1984).

3.5.4. Material vegetativo

La variedad de nopal que se utilizó para el experimento fue COPENA F1 que es de triple propósito, pues se usa como nopal verdura, forrajero y tunero. Sus brotes forman cladodios delgados, sin espinas, con poco mucílago y no son muy ácidos, presenta buena succulencia, el nopalito es de excelente calidad. El material para la siembra debe de provenir de huertos sanos que se localicen lo más cerca posibles del lugar donde se establecerá la plantación. El manejo de los cladodios que se usaron como semilla para siembra, se realizó con cuidado para evitar daños mecánicos y pudriciones posteriores a la plantación, los cladodios se seleccionaron cumpliendo con las características de material para propagación, tomando en cuenta los siguientes factores: buen vigor, libre de

plagas y enfermedades, que no presentara malformaciones físicas, de seis meses a un año de edad, de 30 cm de largo, y efectuando el corte del cladodio en el cuello o sea la parte de unión con la planta madre, lo cual garantiza una mejor cicatrización de la herida.

3.5.5. Tratamiento del material vegetativo

Una vez que se cortó la semilla de nopal, se trató con caldo bórdeles (10 L de agua, 500 g de CuSO_4 y 1500 g de cal), se colocó a la sombra durante un período de 10 a 15 días para la cicatrización del corte.

3.5.6. Material utilizado

El lodo que se utilizó fue extraído de la planta de Tratamiento de Aguas Residuales Noreste de la empresa de Agua y Drenaje de Monterrey, la cual recibe desechos domésticos, lo que permite una concentración baja de metales pesados. En el Cuadro 3.4 se presentan las concentraciones de los metales pesados encontrados en los lodos que se utilizaron, así como la comparación con los límites permitidos de la (EPA).

Cuadro 3.4. Concentración de metales pesados en los lodos aplicados en ppm.

Metal	Lodo	EPA
Cd^{+2}	4.052	0 – 1,100
Ni^{+2}	57.884	0 – 2,800
Pb^{+2}	66.550	80 – 26,000
Zn^{+2}	33.696	51 – 28,360

Además se utilizó un tratamiento de fertilizante comercial con la dosis total de 120 –60 – 0 con las siguientes fuentes: fosfato monoamonico (11 – 52 – 0) y sulfato de amonio (21 – 0 – 0).

3.5.7. Diseño experimental

Los tratamientos fueron distribuidos en un diseño de bloques al azar con cinco tratamientos y cinco repeticiones, con un total de 25 unidades experimentales. Los tratamientos en estudio se presentan en el Cuadro 3.5.

Cuadro 3.5. Tratamientos evaluados del experimento de nopal.

Tratamientos	Descripción	
1	4 t ha ⁻¹ lodo deshidratado*	(L. D.)
2	8 t ha ⁻¹ lodo líquido*	(L. L.)
3	8 t ha ⁻¹ lodo deshidratado*	(L. D.)
4	Testigo	
5	Fertilizante comercial (120 – 60 – 00)	(F. C.)

* Fuente del lodo de la Planta Tratadora de Aguas Residuales Noreste.

3.5.8. Modelo estadístico

El modelo estadístico utilizado para el análisis de los datos fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + t_i + B_j + \Sigma_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Efecto del tratamiento i en la repetición j

μ = Efecto de la media verdadera general

t_i = Efecto del tratamiento i

B_j = Efecto del bloque j

Σ_{ij} = Error experimental del tratamiento i en el j – ésimo bloque

La unidad experimental consistió de una maceta con un área de 706.86 cm² y una profundidad de 35 cm, utilizando 25 macetas.

Los análisis de varianza fueron procesados mediante el paquete estadístico SAS, usando una diferencia significativa al 5 %, y la prueba de medias por Duncan. Además se realizaron correlaciones entre variables morfológicas y concentración de metales pesados por medio del procedimiento Pearson. La variable discreta (número de cladodios hijos) fue transformada a valores continuos a través del procedimiento de $\sqrt{1+x}$, con la finalidad de realizar el análisis de varianza bajo los supuestos de una distribución normal.

3.6. Desarrollo del experimento de nopal

3.6.1. Preparación del experimento

El 9 de febrero del 2000 se seleccionó del banco de germoplasma de nopal de la Facultad de Agronomía, el cultivar COPENA F1. Se colectó suelo de la misma zona, para el llenado de macetas, tomándose una muestra de suelo para su posterior análisis. El 22 de febrero del 2000 se colectaron los lodos líquidos y deshidratados de la Planta Tratadora de Aguas Residuales Noreste; tomando también una muestra para su análisis.

3.6.2. Manejo del cultivo

El día 24 de febrero del 2000, se aplicaron las dosis de los lodos líquidos y deshidratados con las cantidades de 1883.45 g y 56.56 g, correspondiente al tratamiento de 8 t ha⁻¹. Para el tratamiento de 4 t ha⁻¹ de lodo deshidratado se aplicó la cantidad de 28.28 g. Aplicando 0.818 g de fosfato monoamónico y 3.76 g de sulfato de amonio para cubrir la dosis del fertilizante.

El 1 de marzo del 2000 se sembraron los cladodios y el día 26 de marzo se presentaron los primeros brotes. El día 8 de mayo se midieron los datos de largo, ancho y grosor. El experimento se terminó el día 6 de julio del 2000.

3.7. Variables evaluadas

Las variables de interés sobre las cuales se midió el efecto de los tratamientos se presentan a continuación:

Largo, ancho y grosor: el día 8 de mayo del 2000 se midieron con una regla y un vernier (cm). Para el largo se tomo la distancia de la base a la cresta del brote, para el ancho se midió la máxima amplitud en la parte media del cladodio y el grosor también se tomo en esta misma parte.

Peso húmedo y seco del cladodio madre: se determino el día 6 de julio del 2000, pesándolo en una bascula granataria, posteriormente se colocó en la estufa a 65° C por 72 horas y se determino su peso en gramos.

Longitud, peso húmedo y seco de raíz: el día 6 de julio 2000 se midió con una regla (cm), posteriormente se pesaron los cladodios, se pusieron en la estufa a 65° C por 72 horas y se determino su peso en gramos.

Número de cladodios hijos, peso húmedo y seco: el día 6 de julio del 2000 se determino el número, posteriormente se pesaron los cladodios, se pusieron en la estufa a 65° C por 72 horas y se determino su peso en gramos.

Potasio, nitratos, sodio, conductividad eléctrica y pH se utilizó el equipo portátil marca HORIBA Spectrum technologies, Inc. Para determinar las lecturas en los cladodios madre e hijo, los días 15 y 16 de julio del 2000.

Metales pesados: se utilizó el equipo de absorción atómica para determinar las concentraciones en los principales órganos del cultivo.

En el Cuadro 3.6 se presenta en forma resumida las variables y las unidades de medición utilizadas en el experimento.

Cuadro 3.6. Variables evaluadas en el experimento de nopal.

Identificación de la variable	Nombre de la variable	Unidades
X1	Longitud máxima de la raíz del cladodio madre	cm
X2	Peso húmedo del cladodio madre después de la siembra	g
X3	Largo del cladodio madre	cm
X4	Ancho del cladodio madre	cm
X5	Grosor del cladodio madre	cm
X6	K del cladodio madre	ppm
X7	NO ₃ ⁻ del cladodio madre	ppm
X8	Na del cladodio madre	ppm
X9	Conductividad eléctrica del cladodio madre	mmhos/cm
X10	pH en cladodio madre	pH
X11	K del cladodio hijo	ppm
X12	NO ₃ ⁻ del cladodio hijo	ppm
X13	Na del cladodio hijo	ppm
X14	Conductividad eléctrica del cladodio hijo	mmhos/cm
X15	pH en cladodio hijo	pH
X16	Peso húmedo de los cladodios hijos	g
X17	Peso seco de los cladodios hijos	g
X18	Número de cladodios hijos	Nº
X19	Peso seco del cladodio madre después de la siembra	g
X20	Peso húmedo de la raíz del cladodio madre	g
X21	Peso seco de la raíz del cladodio madre	g
X22	Ni ⁺² en la raíz del cladodio	ppm
X23	Cd ⁺² en la raíz del cladodio	ppm
X24	Pb ⁺² en la raíz del cladodio	ppm
X25	Zn ⁺² en de la raíz del cladodio	ppm
X26	Ni ⁺² en el cladodio madre	ppm
X27	Pb ⁺² en el cladodio madre	ppm
X28	Zn ⁺² en el cladodio madre	ppm
X29	Ni ⁺² en el cladodio hijo	ppm
X30	Cd ⁺² en el cladodio hijo	ppm
X31	Zn ⁺² en el cladodio hijo	ppm
X32	Ni ⁺² total en suelo	ppm
X33	Cd ⁺² total en suelo	ppm
X34	Pb ⁺² total en suelo	ppm
X35	Zn ⁺² total en suelo	ppm

3.8. Lecturas con el equipo portátil HORIBA Spectrum technologies, Inc.

Los análisis del cladodio madre y el cladodio hijo para potasio (K), Nitratos (NO₃⁻), sodio (Na), conductividad eléctrica (C. E.) y pH, se realizaron mediante una prueba rápida: para K (CARDY compact ion meter C-131), NO₃⁻

(CARDY compact ion meter C-141), Na (CARDY compact ion meter C-122), C. E (twin cond meter B-173), pH (twinpH meter B-213).

Para determinar las lecturas se realizó un corte en el cladodio, se exprimó y se colocó una gota en cada uno de los equipos para determinar su lectura.

3.8.1. Metodología de lectura del equipo de absorción atómica.

En la concentración de metales pesados, en los diferentes órganos de la planta de nopal se utilizó la misma metodología que en el experimento de maíz.

La concentración de metales pesados para suelo, se efectuó obteniendo análisis totales de metales en Cd^{+2} , Pb^{+2} , Ni^{+2} y Zn^{+2} . Se pesaron 5 g de suelo el cual se había previamente secado al aire y posteriormente tamizado, en un crisol de porcelana de 40 ml se agregaron 25 ml de solución de $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HNO}_3$ 1:1 V/V, se dejó reposar por una hora y se agitó cada 15 minutos, para filtrar la solución y aforar a 25 ml con agua bidestilada. Para los metales pesados intercambiables el procedimiento se realizó de la misma manera sin embargo, en este procedimiento se aplicaron 25 ml de acetato de amonio 1 M, se agitó y se dejó reposar por 15 minutos, después se filtró y se aforó a 25 ml con agua bidestilada, posteriormente se prepararon las muestras para ser leídas en el espectrofotómetro de absorción atómica.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Experimento de Maíz

La presentación de los resultados y la discusión, se hará relacionando las variables con las diferentes etapas del desarrollo, debido a que los lodos, además del enriquecimiento al suelo por la M. O., tienen una liberación de nutrientes lenta, lo que permite estar disponibles por más tiempo y con un efecto positivo en las características formadas en las diferentes etapas.

Variables comprendidas en la primera etapa de crecimiento.

Eastin *et al.* (1999) mencionaron que esta etapa esta comprendida entre la siembra y la diferenciación floral. Esta etapa es llamada la etapa vegetativa, y en ella se diferencia el número de hojas, consecuentemente el número de entrenudos, así como la altura potencial y el desarrollo del tallo.

4.1.1. Altura de planta

El análisis de varianza realizado para altura de planta a los 61 días después de la siembra, resultó con diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro A1).

En el Cuadro 4.1 se observa la comparación de medias por la prueba de Duncan al 5 % de significancia. Los tratamientos T_1 , T_2 y T_3 resultaron estadísticamente iguales y superiores con respecto al testigo (T_4) y al F. C. (T_5). El de mayor altura fue el T_1 con 222.6 cm y el T_5 presentó la media más baja con 186.6 cm. Esta variable se vio influenciada por la aplicación del lodo, ya que este actúa como un fertilizante de liberación lenta como lo comentan Cristóbal y Heras (1997), y que además de contribuir con el N, P y K, al igual que el F. C., favorece el desarrollo del cultivo debido a los contenidos de Ca^{+2} , Fe^{+2} , Mg^{+2} , Mn^{+2} y Zn^{+2} que contienen (Metcalf y Eddy, 1994).

Cuadro 4.1. Comparación de medias para alturas de planta de maíz (cm).

Tratamiento	Altura de planta (61 dds)
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	222.60 a
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	212.80 ab
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	213.60 ab
4. Testigo	196.20 bc
5. F. C.	186.50 c
Media	206.34
C. V.	7.28
Significancia	*

* = significativo.

4.1.2. Número total de hojas

El análisis de varianza para esta variable presentó diferencias altamente significativas entre los tratamientos (Cuadro A2). Al realizar la comparación de medias con la prueba de Duncan al 5 % de significancia (Cuadro 4.2). Los resultados mostraron como superior al tratamiento T_2 con 3.66; los tratamientos T_4 y T_5 fueron estadísticamente iguales seguidos por el T_2 con un valor de 3.54.

Debido a que el número de hojas es sumamente susceptible a los contenidos de humedad, la superioridad del tratamiento T₂, con la aplicación de 8 t ha⁻¹ de lodo líquido, pudo deberse a que en esta forma, el lodo proporcionó una forma más eficiente de los nutrientes deseados principalmente por la humedad contenida.

El testigo y el F. C. resultaron ser estadísticamente iguales pero con los valores más bajos, lo que corrobora la importancia de los microelementos contenidos en los lodos, sobre la expresión de estas variables.

Cuadro 4.2. Comparación de medias para número de hojas totales.

Tratamiento	Número de hojas totales DT
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	3.54 b
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	3.66 a
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	3.54 b
4. Testigo	3.42 c
5. F. C.	3.40 c
Media	3.51
C. V.	1.58
Significancia	**

** = altamente significativo. D. T. datos transformados $\sqrt{1+x}$

4.1.3. Diámetro de tallo

El análisis de varianza realizado para esta variable presentó diferencias altamente significativas entre los tratamientos (Cuadro A3). Al realizar la comparación de medias con la prueba de Duncan al 5 % de significancia (Cuadro 4.3). Los resultados mostraron a T₁ como el mejor tratamiento con 2.39

cm le siguieron los tratamientos T₂ y T₃ (lodos), y el más bajo fue el T₄ (testigo) con 1.73 cm de diámetro.

Al igual que en las otras variables, los lodos en forma general favorecieron la expresión de esta variable. Las superioridad de los lodos en todas estas variables vegetativas, demuestran la importancia que tienen no solamente por el N, P y K que pusieron sino también por toda la M. O. y micronutrientes como Ca⁺², Fe⁺², Mg⁺², Mn⁺² y Zn⁺² que poseen (Linden *et al.*, 1983).

Cuadro 4.3. Comparación de medias para diámetro de tallo (cm).

Tratamiento	Diámetro de tallo
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	2.39 a
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	2.08 bc
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	2.11 b
4. Testigo	1.73 cd
5. F. C.	1.89 d
Media	2.05
C. V.	7.51
Significancia	**

** = altamente significativo.

VARIABLES DE LA ETAPA DE CRECIMIENTO DOS QUE COMPRENDE DE LA DIFERENCIACIÓN FLORAL HASTA FLORACIÓN.

Eastin *et al.* (1999) llaman a esta etapa como la formación de órganos florales, en ella se desarrollo la espiga y al mazorca.

4.1.4. Número de ramificaciones de la espiga

Esta variable (datos transformados) presentó diferencia altamente significativa entre los tratamientos (Cuadro A4). La comparación de medias y indicó que, los tratamientos T_1 , T_2 y T_3 resultaron estadísticamente iguales, y superiores al T_4 y T_5 . El que obtuvo el menor número de ramificación de la espiga fue el T_4 con 3.14, tal como se observa en el Cuadro 4.4.

Cuadro 4.4. Comparación de medias del número de ramificaciones de la espiga.

Tratamiento	Número de ramificaciones de la espiga DT
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	3.63 a
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	3.51 ab
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	3.50 ab
4. Testigo	3.14 c
5. F. C.	3.32 bc
Media	3.42
C. V.	5.66
Significancia	**

** = altamente significativo. D. T. datos transformados $\sqrt{1+x}$.

4.1.5. Volumen de mazorca

El análisis de varianza para la variable volumen de mazorca mostró diferencia altamente significativa entre los tratamientos (Cuadro A5). Se realizó la comparación de medias, mostró que los tratamientos T_2 y T_3 resultaron superiores y estadísticamente iguales, con un volumen de 293.67 y 268.85 con la aplicación de 8 t ha⁻¹ tanto lodo líquido como deshidratado, respectivamente. Le siguió en valor el T_1 con 4 t ha⁻¹ del lodo, los más bajos el T_4 con 204.50 cm³ y el T_5 con 223.12. (Cuadro 4.5).

La superioridad de los lodos con 8 t ha^{-1} en esta variable, demostró la importancia que tiene en el desarrollo de la planta. Este órgano representa casi el 50 % de la materia seca total de la planta al momento de la cosecha (Eastin *et al.*, 1999) debido a esto, los requerimientos nutricionales son altos y que en este experimento fueron el T_2 y T_3 lo que representaron mayor adición de elementos menores, así como de N, K y P y la materia seca contenida en los lodos.

La superioridad de los lodos en estas dos variables comprendidas en esta etapa de crecimiento, comparadas con el testigo y el F. C., demostraron la ventaja de estos y su efectividad más duradera, ya que a pesar de haberse cubierto más de las dos terceras partes del desarrollo de la planta, los lodos continúan mostrando sus ventajas al liberar más lentamente sus nutrimentos y dejarlos más tiempo disponible para la planta (Linden *et al.*, 1983)

Cuadro 4.5. Comparación de medias para volumen de mazorca.

Tratamiento	Volumen de mazorca
1. 4 t ha^{-1} L. D.	263.54 b
2. 8 t ha^{-1} L. L.	293.67 a
3. 8 t ha^{-1} L. D.	268.85 ab
4. Testigo	204.50 c
5. F. C.	223.12 c
Media	250.93
C. V.	7.23
Significancia	**

** = altamente significativo.

Variables de la etapa de crecimiento tres de la floración a la madures fisiológica.

4.1.6. Peso seco del grano

El análisis de varianza para peso seco del grano no presentó diferencia significativa entre los tratamientos, (Cuadro A6).

Contrario a las variables definidas hasta antes de la floración, el peso de grano no se vio influenciado por la aplicación de los lodos. Esto posiblemente fue debido a que el 75 % del peso seco del grano es material producido durante el periodo de crecimiento del grano y solo el 25 % es material producido antes de la floración (Porter *et al.*, 1987), y aunque el material vegetativo producido bajo los tratamientos donde se aplicaron los lodos fue mayor, esto no fue suficiente para marcar cambios significativos en el peso de grano.

Si los lodos marcaron una diferencia en las variables previas a floración debido a su capacidad lenta de liberación de los nutrimentos, su efecto ya no fue determinante para rendimiento, por lo que se desprende la necesidad de contar, no solo con un material fotosintético grande, sino también con un abastecimiento constante de N y otros elementos minerales durante la formación de grano que no pudo ser cubierto por ninguno de los tratamientos (Below, 1997).

Aunque hubo una tendencia en el lodo líquido de 8 t ha^{-1} ha ser superior, posiblemente las necesidades nutrimentales y ventajas de la concentración de la M. O. y otros elementos minerales pudieron haber sido cubiertas con dosis mayores a las evaluadas en la presente investigación (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Comparación de medias para el peso seco de grano (g).

Tratamiento	Grano
1. 4 t ha^{-1} L. D.	19.09
2. 8 t ha^{-1} L. L.	23.98
3. 8 t ha^{-1} L. D.	20.77
4. Testigo	22.75
5. F. C.	20.91
Media	21.50
C. V.	14.33
Significancia	n. s.

n. s. = no significativo.

4.1.7. Peso seco total

El análisis de varianza para peso seco, a los 61 días después de la siembra mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos (Cuadro A7).

Las comparaciones de medias se presentan en el Cuadro 4.7 donde se observa que los tratamientos T_1 , T_2 y T_3 fueron estadísticamente iguales, con valores de 170.69, 162.37 y 170.73 g, respectivamente. Los tratamientos de más baja producción de materia seca fueron los tratamientos T_4 y T_5 con 92.80 g y 83.69 g, respectivamente.

En base a los resultados de las variables presentadas con anterioridad, esto era de esperarse, ya que si el peso seco total es la suma del material vegetativo (hoja, tallo, espiga) y del material reproductivo (grano), los lodos manifestaron valores superiores en las primeras, más sin embargo no tuvieron efectos en el segundo.

El incremento en la obtención de materia seca de los lodos coincide con Cristóbal y Heras (1997) quienes mencionan que el contenido de los lodos es similar al de los estiércoles tradicionales y que contienen además una gran cantidad de nutrimentos esenciales para los cultivos entre ellos destaca el N, quien tiene las funciones de estimular el crecimiento vegetativo y consecuentemente mayor producción de materia seca.

Estas afirmaciones concuerdan con Llagoster y López (1991) y Medcalf y Eddy (1994) quienes mencionaron que los lodos residuales contienen elementos esenciales para el crecimiento de las plantas y vegetales, y que el N y P son de los más abundantes contribuyendo a la nutrición de la planta.

Eastin *et al.* (1999) comentaron que en la primera etapa de crecimiento es donde se acumula el mayor crecimiento de la planta y es por eso que al final presenta una gran cantidad de materia seca.

Cuadro 4.7. Comparación de medias para peso seco de la planta de maíz (g).

Tratamiento	Peso seco (61 dds)
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	170.69 a
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	162.37 a
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	170.73 a
4. Testigo	92.80 b
5. F. C.	83.69 b
Media	136.05
C. V.	32.44
Significancia	**

** = altamente significativo.

4.1.8. Análisis químicos de metales pesados en las diferentes partes de la planta.

Para la concentración de Ni⁺² no se encontraron diferencias significativas en la raíz y el tallo de maíz (Cuadros A8 y A11), mientras que en las hojas se mostraron diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro A15). En base a lo anterior, se realizó la comparación de medias con la prueba de Duncan al 5 % (Cuadro 4.8), la cual manifestó una superioridad para el tratamiento T₃ (8 t ha⁻¹ L. D.).

Cuadro 4.8. Comparación de medias y concentraciones de níquel, cadmio, plomo y zinc en la raíz, tallo y hoja de maíz.

Tratamiento	Níquel			Cadmio			Plomo			Zinc		
	Raíz	Tallo	Hoja	Raíz	Tallo	Hoja	Raíz	Tallo	Hoja	Raíz	Tallo	Hoja
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	0.553	0.664	0.598 b	N. D.	0.924	0.223	0.081	0.107	0.209	5.094	26.763 b	33.477
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	0.741	0.412	0.672 b	N. D.	0.527	N. D.	0.158	0.167	0.171	4.872	25.756 b	34.392
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	0.954	0.775	2.276 a	N. D.	0.454	N. D.	0.073	0.903	0.182	5.078	26.714 b	33.958
4. Testigo	0.516	0.360	0.398 b	N. D.	0.802	0.292	0.006	N. D.	0.022	4.659	38.677 a	35.827
5. F. C.	1.472	0.191	0.920 b	N. D.	0.282	0.002	0.133	0.01	0.068	5.366	37.923 a	34.183
Media	0.848	0.480	0.972		0.597	0.103	0.090	0.237	0.130	5.013	31.165	34.368
Significancia	n. s.	n. s.	*		n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	**	n. s.

* = significativo. ** = altamente significativo. n. s. = no significativo. N. D. = no detectado.

En el Cuadro 4.8 se puede observar que las concentraciones de Ni^{+2} en los tres órganos analizados hubo tendencia a ser superior en los tratamientos con lodos comparados con el testigo, lo que hace suponer una contribución de Ni^{+2} , por estos, tal como lo estableció Felipó (1995).

Hani *et al.* (1996) comentaron que el Cu^{+2} y Ni^{+2} son metales pesados, por lo general están contenidos en los lodos bajo niveles permisibles, además, son absorbidos por los diferentes órganos de la planta, como se observa en este experimento donde presentan concentraciones bajas en los diferentes órganos de la planta de maíz. Haulin *et al.* (1999) comentaron que el Ni^{+2} es un nutrimento esencial de las plantas superiores, donde el contenido de Ni^{+2} normalmente esta en un rango de 0.1 a 1.0 ppm en peso seco y este es absorbido como Ni^{+2} , a pesar que en este experimento con la aplicación de 8 t ha^{-1} el T₃ mostró la mayor concentración este elemento no rebaso los límites permisibles por la EPA.

Por otra parte Alloway y Jackson (1991) comentan que el Ni^{+2} es un metal con mayor potencial contaminante para los suelos tratados con lodos, debido a su elevada movilidad y a su asimilabilidad para las plantas, el contenido de M. O. y el pH del suelo tienen un importante efecto sobre la movilización y la absorción de este metal por la planta.

En los análisis de varianza realizados para las concentraciones de Cd^{+2} y Pb^{+2} en raíz, tallo y hojas de maíz respectivamente no mostraron diferencias

significativas entre los tratamientos (Cuadros A12, A16, A9, A13 y A17), en el Cuadro 4.8 se presentan las concentraciones obtenidas en los diferentes órganos evaluados.

En el caso del Cd^{+2} en raíz no se detectó lectura alguna, pero la mayor concentración se presentó en el tallo y en la hoja decreció. Para el Pb^{+2} las concentraciones menores las presento la raíz y las mayores fueron para las hojas como se muestran en el Cuadro 4.8.

Al realizar los análisis de varianza con respecto a la concentración de Zn^{+2} en raíz, tallo y hoja de maíz, se encontró que existe diferencia altamente significativa en el tallo únicamente (Cuadros A10, A14 y A18).

Al comparar este elemento entre los órganos, la raíz presentó la menor concentración. El tallo y hojas presentaron una mayor concentración de Zn^{+2} , existiendo un gradiente creciente hacia la hoja, lo que demuestra la gran movilidad dentro de la planta. Este nutrimento es absorbido por la planta como cation divalente o como quelato por vía radicular. La adición de Zn^{+2} en los lodos al suelo se ve contrastada por la propia M. O. proveniente de ellos, ya que el Zn^{+2} se fija y no puede ser absorbido por la planta en cantidades altas, tal como lo comentan Torrez y Zarate (1996) y Marecos (1997), razón que explica los valores muy bajos en los tratamientos con lodos y en el testigo y el F. C. fueron altas, ya que las concentraciones de Zn^{+2} es diferente entre los tejidos

de las plantas, en este experimento se observa que la absorción es mayor en las hojas seguido por el tallo y la raíz, como se observa en el Cuadro 4.8.

Alloway y Jackson (1991) comentaron que el Zn^{+2} es un metal con una alta movilidad y asimilación por la planta, pero el contenido de M. O. y el pH del suelo tienen un efecto importante, además de que es un metal con un mayor potencial contaminante por los suelos tratados con lodos. Sin embargo, como se comentó, pudo ser por el efecto de la M. O. que no permitió una buena absorción de este elemento, las concentraciones no rebasaron los límites permitidos por la EPA., estando estas en un rango bajo de entre 20 y 100 ppm de peso seco (Navarro y Navarro, 2000).

4.1.9. Correlaciones entre variables de maíz

Se puede apreciar que en el Cuadro 4.9 de las correlaciones que se obtuvieron en con el Zn^{+2} en el tallo fueron negativas con respecto a la altura de planta, peso seco de la planta, número total de hojas, diámetro de tallo, número de ramificaciones de la espiga volumen de la mazorca, observando que el Zn^{+2} no afectó a estas variables, a mayor concentración una mejor respuesta de la planta en sus diferentes órganos, como se presenta en este experimento.

Cuadro 4.9. Correlaciones significativas y altamente significativas entre variables en el cultivo de maíz.

	Altura de planta	Peso seco de la Planta	Peso seco de grano	Número total de hojas	Diámetro de tallo	Número de ramificaciones de la espiga	Volumen de la mazorca
Ni ⁺² en raíz	-0.32	-0.31	-0.19	-0.19	-0.18	-0.06	-0.12
Pb ⁺² en raíz	0.20	0.16	0.13	0.12	0.08	0.12	0.19
Zn ⁺² en raíz	0.18	0.03	-0.12	-0.14	0.08	0.02	-0.03
Ni ⁺² en tallo	0.18	0.29	0.14	0.20	0.16	0.16	0.13
Cd ⁺² en tallo	0.10	0.11	-0.01	-0.02	0.27	0.14	-0.02
Pb ⁺² en tallo	0.002	0.02	0.13	0.18	0.21	0.27	0.31
Zn ⁺² en tallo	-0.48*	-0.63**	0.07	-0.72**	-0.63**	-0.67**	-0.82**
Ni ⁺² en hoja	0.92	0.27	0.10	0.13	0.08	0.08	0.17
Cd ⁺² en hoja	0.12	0.17	0.04	-0.36	0.12	-0.12	-0.26
Pb ⁺² en hoja	0.25	0.45*	-0.39	0.22	0.34	0.30	0.30
Zn ⁺² en hoja	0.06	0.39	0.13	0.26	-0.05	0.11	0.16

* Significativas al 0.05 y ** altamente significativas al 0.01.

Debido a que el Zn⁺² en el tallo fue prácticamente la única variable que mostró las diferencias altamente significativas entre los tratamientos, fue la única variable que pudo manifestar valores de correlación significativo.

Lo que demuestra los efectos perjudiciales de altas concentraciones de este metal sobre la expresión de las características morfológicas analizadas, posiblemente debido a los efectos de toxicidad de este elemento (Cuadro 4.9).

4.2. Experimento de Nopal

4.2.1. Componentes del cladodio madre

Los Cuadros A19 y A20 del apéndice muestran los análisis de varianza, para peso húmedo y seco del cladodio madre al final del ciclo, en donde se observa que no existen diferencias significativas para el peso seco entre tratamientos. El peso húmedo final, mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos, realizándose la comparación de medias con la prueba de Duncan al 5 % (ver Cuadro 4.10), los resultados mostraron que los tratamientos T₁ y T₄ fueron estadísticamente iguales con 1535 y 1397.50 g de peso húmedo final respectivamente por cladodio madre, donde el tratamiento más bajo fue el T₂ con 992.50 g. Por lo general, los tratamientos que presentaron los mejores pesos secos, fueron donde se aplicaron lodos líquidos y deshidratados, comparados con los tratamientos del fertilizante químico y el testigo.

Cuadro 4.10. Comparación de medias del cladodio madre peso húmedo final y seco final (g).

Tratamiento	Peso húmedo final	Peso seco final
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	1535.00 a	134.08
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	992.50 b	95.33
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	1086.00 b	115.22
4. Testigo	1397.50 a	121.45
5. F. C.	1045.00 b	100.68
Media	1205.23	113.43
C. V.	10.003	17.496
Significancia	**	n. s.

** = altamente significativo. n. s. = no significativo.

Para evaluar la respuesta del cladodio madre a la aplicación de lodos activados se midió su largo, ancho y grosor al final del ciclo, donde los análisis de varianza mostraron que para largo y grosor no hay diferencia significativa entre los tratamientos (Cuadros A21 y A23), sin embargo; en la variable ancho de cladodio si se detectaron diferencia altamente significativa entre los tratamientos (Cuadro A22), por lo tanto se realizó una comparación de medias, usando la prueba de Duncan al 5 % de significancia (ver Cuadro 4.11). En esta comparación de medias los resultados indican que los tratamientos T₁, T₃ y T₄ fueron estadísticamente iguales y el tratamiento T₅ presentó el valor más bajo con 15.57 cm por lo que, el tratamiento testigo (T₄) con 18.05 cm de ancho de cladodio fue el que se comportó mejor, comparado con los lodos líquidos y deshidratados, así como el F. C. Esto pudo deberse que los lodos aportaron los nutrimentos necesarios para su desarrollo como lo menciona Martínez (1995) en forma lenta favoreciendo todo el ciclo.

Cuadro 4.11. Comparación de medias del cladodio madre largo, ancho y grosor (cm) por tratamientos.

Tratamiento	Largo	Ancho	Grosor
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	45.95	17.70 ab	2.35
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	42.52	16.65 bc	1.72
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	44.28	17.78 ab	2.02
4. Testigo	47.05	18.05 a	2.10
5. F. C.	42.80	15.57 c	2.00
Media	44.50	17.18	2.03
C. V.	8.12	4.94	15.07
Significancia	n. s.	**	n. s.

** = altamente significativo. n. s. = no significativo.

4.2.2. Componentes de la raíz del cladodio

Los Cuadros A24, A25 y A26 del apéndice, presentan los análisis de varianza correspondientes a la longitud, peso húmedo y seco de la raíz, donde se observa que no hay diferencias significativas entre los tratamientos. A pesar de no observar diferencias entre los tratamientos, la tendencia que se detectó en cuanto al comportamiento de la longitud fue mayor en el testigo y esto pudo ser por que no tener los nutrimentos tan cerca a su disposición, creciendo más en la búsqueda de sus alimentos, comparado con la aplicación de lodos y fertilizante. En el Cuadro 4.12 se presentan las medias de las variables evaluadas.

Cuadro 4.12. Comparación de medias por tratamiento de longitud (cm), peso húmedo y seco (g) de la raíz.

Tratamiento	Longitud	Peso húmedo	Peso seco
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	31.75	40.85	11.87
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	39.20	19.42	6.04
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	41.60	27.38	8.62
4. Testigo	51.75	32.77	9.32
5. F. C.	48.75	20.98	6.24
Media	42.409	27.539	8.23
C. V.	23.287	40.906	38.706
Significancia	n. s.	n. s.	n. s.

n. s. = no significativo.

4.2.3. Componentes del cladodio hijo

Los Cuadros A27, A28 y A29 del apéndice, muestran los análisis de varianza correspondientes al peso fresco o húmedo, peso seco y número de cladodios hijos, donde no se detectaron diferencias significativas entre los

tratamientos. En el Cuadro 4.13 se presentan las medias de los tratamientos de las variables ya descritas. La tendencia del tratamiento que presentó el mayor peso húmedo y seco fue el F. C., y en cuanto al número de cladodios hijos la dosis de 4 t ha⁻¹ de lodo deshidratado obtuvo la respuesta más alta.

Cuadro 4.13. Comparación de medias por tratamiento del peso húmedo, seco y número de cladodios hijos transformados.

Tratamiento	Húmedo (g)	Seco (g)	Nº Cladodios DT
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	10245	6852	2.68
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	10618	5609	1.72
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	9542	6546	2.28
4. Testigo	12435	7167	2.38
5. F. C.	15675	8967	2.64
Media	11792.87	7048.29	2.35
C. V.	65.92	56.89	20.53
Significancia	n. s.	n. s.	n. s.

n. s. = no significativo. D. T. datos transformados $\sqrt{1+x}$.

4.2.4. Análisis químico del cladodio madre

Los análisis de varianza realizados para detectar la diferencia entre los tratamientos de acuerdo a los análisis químicos, de potasio (K), nitratos (NO₃⁻) y conductividad eléctrica (C. E), no presentaron diferencias significativas entre estos (ver Cuadros A30, A31 y A33). En cuanto al sodio (Na), éste si presentó diferencias altamente significativas, y el pH resultó con diferencias significativas entre los tratamientos (ver los Cuadros A32 y A34 del apéndice). Se realizó la comparación de medias para estas variables, usando la prueba de Duncan al 5 %. En el Cuadro 4.14 se observa la comparación de medias para los niveles de Na, el valor más alto fue para el T₁ con una concentración de 51.25 ppm en el cladodio madre y todos los demás tratamientos fueron estadísticamente iguales.

Para pH los tratamientos T₁ y T₂ fueron estadísticamente iguales y con el valor más alto de 4.52 para ambos tratamientos, el resto de los tratamientos, fueron estadísticamente iguales.

Cuadro 4.14. Comparación de medias de tratamientos, en la concentración de potasio, nitratos, sodio (ppm), conductividad eléctrica (mmhos/cm) y pH en cladodio madre.

Tratamiento	K	NO ₃ ⁻	Na	C. E.	pH
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	1300.0	4325	51.25 a	10.57	4.52 a
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	1300.0	750	28.00 b	9.47	4.52 a
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	1340.0	3140	36.00 b	10.88	4.34 b
4. Testigo	1175.0	2375	26.00 b	9.72	4.35 b
5. F. C.	1257.5	2823	28.00 b	10.37	4.30 b
Media	1277	2704	33.95	10.24	4.40
C. V.	13.82	73.57	20.01	8.14	2.28
Significancia	n. s.	n. s.	**	n. s.	*

* = significativo. ** = altamente significativo. n. s. = no significativo.

4.2.5. Análisis químicos del cladodio hijo

Los Cuadros A35, A36, A37 y A39 del apéndice muestran que los análisis de varianza realizados para las variables de K, NO₃⁻, Na y pH del cladodio hijo, no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. En cuanto a la C. E. este si mostró diferencia significativa entre tratamientos (Cuadro A38), resultando estadísticamente iguales los tratamientos T₁, T₃, T₄ y T₅ respectivamente, y el más bajo fue el T₂ con 10.48 mmhos/cm. (Cuadro 4.15).

Cuadro 4.15. Comparación de medias de tratamientos en la concentración de potasio, nitratos, sodio (ppm), conductividad eléctrica (mmhos/cm) y pH en cladodio hijo.

Tratamiento	K	NO ₃ ⁻	Na	C. E.	pH
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	742	1694.0	34.20	12.82 a	4.82
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	3114	644.0	53.60	10.48 b	4.74
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	1613	837.5	18.75	12.47 a	4.97
4. Testigo	1986	1454.0	37.40	12.50 a	4.94
5. F. C.	3182	1726.0	20.40	11.66 ab	4.62
Media	2148.75	1289.16	33.45	11.96	4.81
C. V.	139.45	74.63	70.65	8.02	4.96
Significancia	n. s	n. s.	n. s	*	n. s.

* = significativo. ** = altamente significativo. n. s. = no significativo.

4.2.6. Análisis químicos de metales pesados en las diferentes partes de la planta.

Los análisis de varianza realizados para la concentración de Ni⁺² en el suelo, raíz y el cladodio madre e hijo, no detectaron diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadros A48, A40, A43 Y A45),

En el Cuadro 4.16 se observan las concentraciones de Ni⁺² tanto en el suelo como en la raíz y el cladodio madre e hijo, donde se puede apreciar que la mayor concentración se presenta en la raíz, coincidiendo con lo comentado por Hani *et al.* (1996) con respecto a que este elemento es retenido en mayor parte por la raíz y después le siguen tallos, hojas y después los frutos, como se observa en este experimento, ya que el Ni⁺² es un nutrimento esencial para las plantas comentado por Haulin *et al.* (1999). Los niveles de Ni⁺² detectados en los lodos que se aplicaron al suelo en este experimento, no sobrepasaron los límites permitidos por la EPA.

Cuadro 4.16. Comparación de medias y concentraciones de níquel, cadmio, plomo y zinc en la raíz, tallo y hoja de maíz.

Tratamiento	Ni ²⁺			Cd ²⁺			Pb ²⁺			Zn ²⁺		
	suelo	Raíz	C. M.	C. H.	suelo	Raíz	C. M.	C. H.	Suelo	Raíz	C. M.	C. H.
1. 4 t ha ⁻¹ L. D.	0.512	2.10	0.348	0.603	0.024	N. D.	N. D.	0.07	7.854	0.99	N. D.	N. D.
2. 8 t ha ⁻¹ L. L.	0.704	1.86	0.160	0.262	1.730	N. D.	N. D.	10.00	7.226	1.10	N. D.	N. D.
3. 8 t ha ⁻¹ L. D.	0.484	1.48	0.142	0.400	1.304	N. D.	N. D.	20.87	7.324	1.07	N. D.	N. D.
4. Testigo	0.416	3.05	0.135	0.595	0.047	N. D.	N. D.	N. D.	7.826	0.64	N. D.	N. D.
5. F. C.	0.704	2.24	0.227	0.523	0.060	N. D.	N. D.	N. D.	6.602	1.59	N. D.	N. D.
Media	0.564	2.11	0.219	0.458	0.727		5.156		7.366	1.12		
Significancia	50.33	47.86	86.08	42.18	297.87		154.88		13.64	80.50		
	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.		n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
										*		**
												n. s.

* = significativo. ** = altamente significativo. n. s. = no significativo. N. D. = no detectado. C. M. cladodio madre. C. H. cladodio hijo.

Los análisis de varianza realizados para las concentraciones de Cd^{+2} y Pb^{+2} en el suelo, raíz y cladodio madre e hijo respectivamente no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos (ver Cuadros A49, A46, A50, A41 del apéndice)

El caso del Cd^{+2} en la raíz y en el cladodio madre no se detectó lectura alguna, sin embargo en el suelo se detectaron lecturas mínimas, pero la mayor concentración se presentó en el cladodio hijo, pero fue únicamente en los tratamientos donde se aplicaron los lodos. Para el Pb^{+2} las concentraciones menores las presentó la raíz y las mayores se observaron en el suelo, y para el cladodio madre e hijo no se detectó lectura alguna como se muestran en el Cuadro 4.16.

Al realizar los análisis de varianza con respecto a la concentración de Zn^{+2} en el suelo y cladodio hijo no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadros A51, A47), sin embargo, en raíz existe diferencia significativa y en el cladodio madre altamente significativa (Cuadros A42, A44).

En el Cuadro 4.16 se observa que el Zn^{+2} en la raíz presentó una concentración alta, lo que demuestra la movilidad de este elemento hallándose preferentemente acumulado en los tejidos de la raíz como lo comentan Navarro y Navarro (2000), lo mismo sucedió en este experimento con las concentraciones en la raíz, por otra parte los contenidos de Zn^{+2} en el peso seco oscila entre 20 y 100 ppm, estos valores están en función de sus

requerimientos, pero pueden variar dentro de los límites citados según la especie, variedad y condiciones de crecimiento. Hue *et al.* (1988) encontraron que el Zn^{+2} tiene un fuerte efecto inhibitorio sobre la adsorción del Cd^{+2} en el suelo debido a la semejanza química de estos. Sin embargo, Kabata-Pendias *et al.* (1992) dicen que el incremento de las cantidades de Zn^{+2} en el suelo, tienen efectos inhibitorios sobre la adsorción de Cd^{+2} y viceversa, por otra parte se observa que la relación depende de la concentración de ambos elementos y de la especie vegetal, en este experimento no se pudo detectar concentraciones de Cd^{+2} en el cladodio madre, por el contrario si se detectaron diferentes niveles de Zn^{+2} en el cladodio madre. Torrez y Zarate (1996) comentan que los lodos de la planta Noreste los cuales se utilizaron como tratamientos en este experimento son característicos de lodos procedentes de agua residual tipo domestico y mezclados con industrial debido a la concentración de Zn^{+2} , razón que explica los valores obtenidos de los tratamientos con lodos. Alloway y Jackson (1991) comentaron que el Zn^{+2} , es un metal con una alta movilidad y asimilación por la planta, pero el contenido de M. O. y el pH del suelo tienen un efecto importante, además de que es un metal con un mayor potencial contaminante para los suelos tratados con lodos.

La comparación de las medias de los tratamientos con respecto al cladodio hijo, mostraron que el valor más alto se dio con la aplicación de la dosis de 4 t ha^{-1} L. D. Por otra parte coincide con lo que comentan Navarro y Navarro (2000) donde las plantas jóvenes presentan siempre concentraciones más altas que las plantas adultas, observando que en este experimento las

concentraciones bajas las presento el cladodio madre y las altas el cladodio hijo. Sin embargo, las concentraciones no rebasaron los límites permitidos por la EPA, (Cuadro 4.16).

4.2.7. Correlaciones entre las variables de nopal

Las correlaciones tipo Pearson que se corrieron para caracterizar la relación entre las variables evaluadas se observan en el Cuadro 4.17, donde se presentan los resultados, discutiendo solo las significativas y altamente significativas.

Cuadro. 4.17. Correlaciones significativas y altamente significativas entre variables en el cultivo de nopal.

	Cd ⁺² en raíz del cladodio	Cd ⁺² en cladodio hijo	Cd ⁺² total en suelo	Zn ⁺² en cladodio madre	Zn ⁺² total en suelo	Ni ⁺² en cladodio madre	Ni ⁺² total en suelo	Pb ⁺² en cladodio madre
Na en cladodio madre	-0.92**							
Na en cladodio hijo	0.94*							
K en cladodio hijo								0.97**
pH en cladodio hijo		0.77*						
Ni ⁺² en raíz Cladodio hijo	0.88*			0.93*		0.72*		
Total en suelo		-0.73*						
Zn ⁺² en cladodio hijo		-0.94**	-0.94**		0.70**		0.71**	
Total en suelo		-0.94**						
Cd ⁺² Total en suelo		0.99**						

* Significativas al 0.05 y ** altamente significativas al 0.01

El Na del cladodio madre presentó una correlación negativa con la variable Cd^{+2} en raíz con $r = -0.91$, esto sugiere que al disminuir el Cd^{+2} en la raíz se presenta una concentración mayor de Na en el cladodio madre, esto es de acuerdo a los datos obtenidos.

La variable Na en el cladodio hijo presentó una alta correlación con la variable de Cd^{+2} en raíz con una correlación de $r = 0.93$, donde se puede asumir que el aumento de Na en cladodio hijo, puede deberse al incremento en el nivel de Cd^{+2} en la raíz de nopal.

El K en cladodio hijo presentó una alta correlación, con un valor de $r = 0.96$ con la variable de Pb^{+2} en cladodio madre, donde se puede especular que el nivel de K en el cladodio hijo, fue estimulado por el nivel de Pb^{+2} en el cladodio madre.

El pH en el cladodio hijo tiene una correlación de $r = 0.76$ con el Cd^{+2} en cladodio hijo. Lo anterior sugiere que la concentración de Cd^{+2} en cladodio hijo, esta directamente relacionado con el valor del pH en este mismo cladodio, lo anterior es observando el comportamiento de los datos de este experimento, donde los tratamientos pudieron aportar fracciones que marcaron estas diferencias (ver Cuadro 4.17).

La variable de Ni^{+2} en raíz y Cd^{+2} en raíz obtuvieron una correlación de $r = 0.88$, indicando que el Ni^{+2} y Cd^{+2} pudieran actuar de una forma sinérgica en

la raíz del nopal. Con respecto al Ni^{+2} en cladodio hijo, éste presentó una alta correlación con el Zn^{+2} en cladodio madre con $r = 0.92$, el Ni^{+2} en cladodio madre con una $r = 0.71$ y el Pb^{+2} en cladodio madre con $r = 0.71$. Por la información que se genera entre estas tres correlaciones, indican que a mayor acumulación de Zn^{+2} , Ni^{+2} y Pb^{+2} en cladodio madre, se afecta la concentración de Ni^{+2} en cladodio hijo (ver Cuadro 4.17).

La concentración de Ni^{+2} total en suelo presentó una correlación negativa con el Cd^{+2} en cladodio hijo con una $r = -0.73$, sin embargo el Zn^{+2} en el cladodio hijo presentó una correlación positiva con una $r = 0.71$, lo que sugiere que a mayor contenido de Ni^{+2} en suelo, se podrá tener una mejor absorción de Zn^{+2} por parte de la planta y lograr que este pueda traslocarse a el cladodio hijo.

El Zn^{+2} en cladodio hijo presenta dos correlaciones negativas, con el Cd^{+2} en cladodio hijo con $r = -0.94$, y el Cd^{+2} total en suelo con una $r = -0.94$, por otra parte con el Zn^{+2} total en suelo se correlacionó en forma positiva con $r = 0.70$, indicando que el incremento de Zn^{+2} en el suelo provoca un incremento de Zn^{+2} en el cladodio hijo, con respecto al Ni^{+2} total en suelo se correlaciono con una $r = 0.71$, mostrando un aspecto similar, o sea que a mayor concentración de Ni^{+2} en el suelo se observa una mayor concentración de Zn^{+2} en el cladodio hijo.

La concentración de Zn^{+2} total en suelo presentó una correlación negativa con $r = -0.94$ con el Cd^{+2} en cladodio hijo, lo que nos indica, que a

mayor concentración de Zn^{+2} en el suelo la planta lo absorbe y lo trasloca hacia el cladodio hijo.

El Cd^{+2} total en suelo presentó una alta correlación de $r = 0.99$ con el Cd^{+2} en cladodio hijo, donde se observa claramente que a una mayor concentración de Cd^{+2} del suelo, puede incrementar una mayor concentración de Cd^{+2} en cladodio hijo.

El efecto de la adición de los lodos al suelo presentó el mejor comportamiento en las etapas de desarrollo de la planta de maíz, presentando mejores cosechas que el testigo.

Las concentraciones de Ni^{+2} , Cd^{+2} y Pb^{+2} se presentaron altas en los diferentes tipos de lodos, pero en los tratamientos donde se adicionaron lodos con Zn^{+2} diferentes dosis, el Zn^{+2} en la raíz el fertilizante mostró la mayor concentración en la raíz, en las demás lecturas las presentó el testigo.

Experimento de maíz

Componentes nutritivos

La adición de un lodo se observó que afectaron significativamente los componentes nutritivos de la dosis de 4 l ha⁻¹ de L. D. Sin embargo, las

V. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos y los objetivos e hipótesis planteados en la aplicación de los lodos activados para los cultivos de maíz y nopal, se presentan las siguientes conclusiones.

Experimento de Maíz

El efecto de la adición de los lodos al suelo presentó el mejor comportamiento en las etapas de desarrollo de la planta de maíz, presentando un efecto por encima del fertilizante.

Las concentraciones de Ni^{+2} , Cd^{+2} y Pb^{+2} se presentaron altas en los diferentes órganos de la planta con los tratamientos donde se adicionaron lodos en sus diferentes dosis; sin embargo, el Zn^{+2} en la raíz el fertilizante mostró la mayor lectura, y en tallos y hojas las mayores lecturas las presentó el testigo.

Experimento de Nopal.

Componentes morfológicos.

La adición de los lodos se observó que afectaron significativamente los componentes morfológicos con la dosis de 4 t ha^{-1} de L. D. Sin embargo, las

variables de peso húmedo y seco del cladodio hijo se comportaron mejor con el F. C., para largo y ancho del cladodio madre, así como la longitud de raíz el testigo mostró la mejor respuesta.

Cladodio madre

Con respecto al efecto de los lodos en el cladodio madre los valores de pH y C. E, así como los elementos de K, NO_3^- , Na, Ni^{+2} y Zn^{+2} presentaron concentraciones altas comparadas con el testigo y F. C. En el caso del Cd^{+2} y Pb^{+2} no se detectaron estos elementos de acuerdo a la metodología utilizada.

Cladodio hijo.

En el caso del cladodio hijo el F. C. fue el que presentó el mayor nivel de K y Na sin embargo, los lodos mostraron niveles mayores en NO_3^- , C. E. y pH. Las concentraciones de Ni^{+2} , Cd^{+2} y Zn^{+2} presentaron lecturas similares independientemente de los tratamientos. El Pb^{+2} no se detectó en el cladodio hijo.

Raíz.

Las concentraciones de Ni^{+2} y Pb^{+2} en la raíz, presentaron lecturas mínimas independientemente de las dosis utilizadas, en el caso del Zn^{+2} se

observaron concentraciones altas vinculadas a las dosis de los lodos. El Cd^{+2} no fue detectado, en ningún tratamiento.

Suelo.

Los lodos no modificaron las concentraciones de Ni^{+2} Cd^{+2} Pb^{+2} Zn^{+2} que se encontraban en el suelo, lo cual incluye al tratamiento del F. C.

En general al cuantificar la concentración de metales pesados en el suelo en los órganos de maíz y nopal, estas no sobrepasaron los límites permitidos por la EPA. Esto pudo ser por que se utilizó lodo de procedencia domestica, el cual contiene menor concentración de metales pesados. La aplicación de los lodos tanto líquidos como deshidratados, presentaron una mejor respuesta, que la dosis del F. C. utilizada.

De acuerdo a la primera hipótesis planteada, se concluye que las dosis utilizadas en el presente experimento, no afectaron el crecimiento fenológico del maíz y del nopal, por lo tanto, no se rechaza esta hipótesis, con respecto a la segunda hipótesis, esta se acepta, por que los metales pesados evaluados, no rebasaron las concentraciones permitidas por la EPA.

VI LITERATURA CITADA

- Acosta, G; E. Gutiérrez. y E. Ramírez. 1995. Poder fertilizante de los lodos residuales provenientes del tratamiento de aguas servidas. Facultad de Agronomía Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Coro Venezuela.
- Alloway B.J. Jackson A.P. 1991. The behaviour of heavy metals in sewage sludge-amended soils. *Sci. Total Environ.*, 100, 151-176.
- Beker, D. 1989. Environmental aspects of landfilling sludge. *Selected Water Resources Abstracts*. Vol. 24, No. 11.
- Below, F. E. 1997. Growth and productivity of maize under nitrogen stress. *In* G.O. Edmeades, M. Bänziger, H.R. Mickelson C.B. Peña-Valdivia, eds. *Developing Drought and Low-Nitrogen Tolerant Maize. Proc. Symp.*, CIMMYT, El Batán, México, 25-29 Mar. 1996. México, DF, CIMMYT.
- Bioxadera, J. y R. Danés. 1995. Realidad y futuro de la aplicación de residuos orgánicos en la agricultura. Servicio de Agricultura. (DARP), Departamento del Medio Ambiente Generalitat de Cataluña.

- Bock, S. 1984. Usos y comercialización de los productos de la nopalera (*Opuntia spp*) en el municipio de Salinas, San Luis Potosí. UACH. Departamento de Economía Agrícola. Chapingo, México..
- Boyd, S. A.; L. E. Sommers and D. W. Nelson. 1980. Changes in the humic acid fraction of soil resulting from sludge application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1179-1186.
- Bravo, H. H. 1978. Las cactáceas de México. 2ª Edición. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Britton, N. L. and J. N. Rose. 1963. The ceteceans, descriptions and illustration of plants of the catus family. New York, U.S.A.
- Broadbent, F. E. 1973. Organics in recycling municipal sludges and effluents on land. Pp 97-101 National Association of State Universities and Land-Grant Colleges, Washington. D. C.
- Burchardy. A. J. 1981. Sludge and its ultimate disposal. Ann Arbor Sciencie.
- Canet, R., F. Pomares, M. Estela., F. Tarazona. 1996. Efecto de los lodos de depuradora en la producción de hortalizas y las propiedades químicas del suelo. *Invest. Agr.: Prof. Veg.* Vol. 11(1), pp. 83-99.

- Cazurra, P. T. 1997. Programa de tratamientos de fangos de las depuradoras de aguas residuales urbanas. Junta de Saneamiento del Departamento del Medio Ambiente, Cataluña España.
- Chaney, R. L. 1990. Twenty years of land application research. Biocycle. September: 54-59.
- Chang, A. C. y A. L. Page. 1990. Long term environmental effects associated with land applications of municipal sludges : A review. Selected Water Resources Abstracts. Vol. 24, No. 4.
- Chang, A. C; A. L. Page y J. E. Warneke. 1983. Soil conditioning effects of municipal sludge compost. J. Environ. Engineering 109: 574-583.
- Cristóbal, S., F. y J. A. Heros. 1997. Valorización de los biosólidos producidos por las estaciones regeneradoras de aguas residuales del ayuntamiento de Madrid. Departamento de aguas y saneamiento, Ayuntamiento de Madrid, España.
- Dean, R. B; y E. Smith, Jr. 1993. The properties of sludges. In recycling of municipal sludges and effluents in land. Proceeding of July 9-13 Conference. National Association of State Universities and Land-Grant Colleges. Washington, D. C.

Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. 1976. Manual de tratamiento de aguas. Editorial Limusa, S. A. México.

Demuyneck, M; E. J. Nyns y H. Navavau. 1985. Use of digested effluents in agriculture. Selected Water Resources Abstracts. 24 (10).

Eastin, J. D. C. L. Petasen, F. Zavala-García, A. Dhopte, P. K. Verma, V. B. Ogunlea, M. W. UIT, V. González Hernández, M. Livera Muñoz, T. J. Gerik, G. I. Gandoul, M. R. A. Hovney and L. Mendoza Onofre. 1999. Potential Heterosis and Associated With Developmental and Metabolic Processes in Sorghum and Maize. The Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops. In Chapter 19. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, U.S.A. pp 205-220

EPA. 1995. A guide to the biosolids risk assessments for the EPA part 503 rule. United States Environmental Protection Agency. U. S. A.

Felipó, O., M T. 1995. Reutilización de residuos urbanos y posible contaminación. Laboratorio de Edafología. Facultad de Farmacia, Universidad de Barcelona, España.

Felipó, O., M T. 2001. Los elementos potencialmente tóxicos (EPT) como criterio en la aplicación de residuos orgánicos al suelo. En: Aplicación agrícola de los residuos orgánicos 5º Curso de Ingeniería Ambiental. Ed. Boixadera J., Teira M. R. Universitat de Lleida. 159-174.

Foroughi, M. 1983. Effect of some heavy metal on vegetable crops comparison of results. Water culture and solid substrate experiments. Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft. 39 : 426-433.

García, E. 1976. Modificación al sistema de clasificación climática de koppen 2º Ed. U.N.A.M. México, D.F.

Garza, R. J. L. y J. M. Araujo, H. 1984. Estudio agrológico detallado del campo experimental de la F.A.U.N.L., Marín, N. L. México, Tesis de licenciatura.

Giller, K. E., S. P. McGrath and P. R. Hirsch. 1989. Absence of nitrogen fixation in clover, grown on soil subject to long-term contamination with heavy metals, is due to survival of only ineffective Rhizobium. Soil Biol. Biochem. 21: 841-848.

Hani, H; A. Siegenthaler and T Candinas. 1996. Soil effects due to sewage sludge application in agriculture. Fertilizer Research, 43: 149-156.

Haulin, L. J; J. D. Beaton; S. L. Tisdale and W. L. Nelson. 1999. Soil Fertility and Fertilizers An Introduction to Nutrient Management Sixth Edition.

Hernandez, M. T; J. I. Moreno; F. Costa; F. J. Gonzales-Vila and R. Frund. 1990. Structural features of humic acidlike substances from sewage sludge. *Soil Sci.* 149: 63-68.

Hue, N. V. 1996. Land application of biosolids Professor of Environmental Soil Chemistry sludz.

Hue, N. V. Silva, J. A.; Arifin, R. 1988. Sewage sludge-soil interactions as measured by plant and soil chemical composition. *J. Environ. Qual.*, 17, 384-390.

Kabata – Pendias, A. Pendias, H. 1992. Trace elements in soils and plants. 2nd Ed. CRC Press, Boca Raton. FL.

Linden, D. R., C. E. Clapp, y R. H. Dowdy. 1983. Hydrologic management: nutrientes. In Proceeding of the Workshop on Utilization of Municipal Wastewater and Sludge on Land. Riverside: University of California. Pp. 79-103

Llagoster, F.R. y A. López, P. 1997. Sociedad de explotación de aguas residuales, S.A. (SEARSA) 2º Edición Barcelona, España.

- Logan, T. J; and Chaney, R. L. 1983. Utilization of municipal wastewater and sludges on Land-Metals. In proceedings of the workshop on utilization of municipal wastewater and sludge on land. A. L. Page, T. L. Gleason III, J. E. Smith, Jr., I. K. Iskandar, and L. E. Sommers, Eds. Riverside: University of California. Pp. 235-326
- Lorenz, O. A. and Maynard. 1988. Knott's handbook for vegetable growers. Third Edition. New York: John Wiley and Sons.
- Marecos, M, M. H. 1997. Reutilización beneficiosa de biosólidos y efluentes en Portugal: Práctica y potencial. Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil. Lisboa Codex Portugal.
- Marks, M. J; J. H. Williams and C. G. Chumbley. 1981. Field experiments testing the effects of metal contaminated sewage sludges on some vegetable crops. Hort Science Vol. 51, No. 12.
- Martínez, F. F. X. 1995 Posible uso de los residuos urbanos en agricultura; abono, enmienda orgánica y sustrato de cultivo. Departamento de agronomía. Escuela Superior de Agricultura de Barcelona, España.

- Martín, M. A; A. Basanta; A. y J. M. Laó, S. 1997 Gestión de biosólidos procedente de la depuración de aguas residuales de Sevilla (ESPAÑA) y su entorno: un caso de reutilización y respeto al medio ambiente. Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla, S.A. (EMASESA), ESPAÑA.
- McGrath, S. P; P. C. Brookes and K. E. Giller. 1988. Effects of potentially toxic metals in soil derived from past applications of sewage sludge on nitrogen fixation by *Trifolium repens* L. *Soil Biol. Biochem.* 20: 415-424.
- Metcalf, E. I. and Eddy. 1994 Wastewater engineering treatment and disposal reuse, Third Edition Mc Graw Hill.
- Metzger, L; and B. Yaron. 1987. Influence of sludge organic matter on soil physical properties. *Adv. Soil Sci.* 7: 141-163.
- National Research Council. 1977. Multimediu management of municipal sludge. Washington, D. C.: National Academy Press.
- National Research Council. 1994. Ground water recharge using waters of impaired quality. Washington, D. C.: National Academy Press.
- Navarro G. G. Y Navarro B. S. 2000. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Ed Mundi Prensa.

Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993. Establece las características de los residuos peligrosos, y listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente

Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-004-ECOL-2001, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Outwater, B. A. 1994. Reuse of sludge and minor wastewater residuals, Editorial Lewis.

Papadopoulus, I. and Y. Stylianou. 1988. Ongoing research on the use of treated sewage effluent for irrigating industrial and fodder crops. Selected Water Resources Abstracts. Vol. 22, No. 6.

Page, A. L. and A. C. Chang. 1981. Trace metals in soils and plants receiving municipal wastewater irrigation. Selected Water Resources Abstracts. Vol. 21, No. 21.

Parker, C. F. and L. E. Sommers. 1983. Mineralitation of nitrogen in sewage sludges. J. Environ. Qual. 12: 150-156.

Porter, G.A., Knievel, D.P. Shannon, J.C. 1987. Assimilate unloading from maize (*Zea mays* L.) pedicel tissues. I. Evidence for regulation of unloading by cell turgor. *Plant Physiol.*, 83: 131-136.

Quintanar, A. F. 1964. Productos agrícolas mexicanos en la alimentación mundial; Ensayo etnobotánico. Impresora y Editorial Mayo. México, D. F.

Reyes, C. P. 1990. El maíz y su cultivo. Editorial A. G. T. México DF. 1ª Ed.

Rieradevall, J. 1995. Impacto ambiental de la actividad ganadera. Reutilización agronómica de los purines de cerdo antes y después de su tratamiento anaeróbico. Servicio de medio ambiente. Diputación de Barcelona.

Ríos, A. R. y N. Aceves E. 1979. Efectos del boro y del sodio sobre el tratamiento de los cultivos en el distrito de riego 03. Tula, Hgo. Chapingo. 9 (2).

Robles, S. R. 1979. Producción de granos y forrajes. Editorial Limusa, S. A. 1ª Ed.

Salgot, M. 1997. Guía para la aplicación de biosólidos en terrenos privados. Departamento de productos naturales, biología vegetal sanitaria y edafologica. Facultad y Farmacia, Universidad de Barcelona, España.

Saña, V. J. 1995. La gestión de la fertilidad de los suelos: el análisis de suelos, base de la gestión de la fertilidad. Riegos y Drenajes XXI 1 pp. 41 – 45.

Seoáñez, C. M. 1996. Ingeniería del medio ambiente aplicada al medio natural continental Ed Mundi Prensa.

Seoáñez, C. M. 1999 Ingeniería del medio ambiente contaminación del suelo: Estudios, Tratamiento y gestión. Continental Ed Mundi-Prensa.

Siebe, Ch; E. G. Santos; E. Cifuentes y I. S. Ugarte. 1998. Coeficientes de transferencia de metales pesados del suelo a diferentes cultivos en un área regada con agua residual. 1^{er} Simposio Nacional sobre Nutrición de Cultivos. Querétaro, México. P. 28.

Smith, S. R. 1991. Effects of sewage sludge application on soil microbial processes and soil fertility. In Advances in Soil Science. Volume 16 B. A. Stewart, ed. New York: Springer-Verlag. Pp. 191-212

Sorber, E. Ch. 1994. Bisolids, a blue print for public acceptance. Water Environment and Technology. Water Environment Federation. 6:5:6:1.

Thompson M. L; H. Zhang; M. Kazemi and J. A. Sandor. 1989. Contributions of organic matter to cation exchange capacity and specific area of fractionated soil materials. Soil Sci. 148: 250-257.

Tiscornia, J. 1976. Cactus y otras plantas de ornamento. Ed. Albatros, Buenos Aires Argentina.

Torres, G. G. y V. Zarate, R. 1996 Estudio técnico sobre la factibilidad de tratamiento, manejo y disposición de los lodos residuales de la planta de tratamiento, Monterrey, N. L. México.

VII APÉNDICE

Análisis de varianza para el experimento de maíz.

Cuadro. A1. Análisis de varianza para altura de maíz (cm) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	4276.36	1069.09	4.73	0.0103	*
Rep	4	714.06	178.51	0.79	0.5484	
Error	16	3614.94	225.93			
Total	24	8605.36				
C. V.	7.284 %					

Cuadro. A2. Análisis de varianza para número total de hojas ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	0.213	0.053	16.92	0.0001	**
Rep	4	0.019	0.005	1.56	0.2341	
Error	16	0.050	0.003			
Total	24	0.283				
C. V.	1.595 %					

Cuadro. A3. Análisis de varianza para diámetro de tallo (cm) ciclo O-I 1998

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	1.208	0.302	12.81	0.0001	**
Rep	4	0.041	0.010	0.44	0.7756	
Error	16	0.377	0.023			
Total	24	1.628				
C. V.	7.507 %					

Cuadro. A4. Análisis de varianza para número de ramificaciones de la espiga ciclo O-I 1998

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	0.729	0.182	4.84	0.0094	*
Rep	4	0.247	0.006	0.16	0.9533	
Error	16	0.602	0.037			
Total	24	1.358				
C. V.	5.663 %					

Cuadro. A5. Análisis de varianza para volumen de mazorca (cm³) ciclo O-I 1998

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	26363.6	6590.9	20.00	0.0001	**
Rep	4	1323.6	330.9	1.00	0.4343	
Error	16	5273.8	329.6			
Total	24	32961.1				
C. V.	7.235 %					

Cuadro. A6. Análisis de varianza para peso seco de grano (g) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	71.801	17.950	1.89	0.1612	NS
Rep	4	86.323	21.580	2.27	0.1065	
Error	16	151.864	9.491			
Total	24	309.989				
C. V.	14.327 %					

Cuadro. A7. Análisis de varianza para peso seco total de maíz (g) ciclo O-I 1998

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	38541.696	9635.424	4.95	0.0087	**
Rep	4	9413.706	2353.426	1.21	0.3458	
Error	16	31159.662	1947.478			
Total	24	79115.065				
C. V.	32.435 %					

Cuadro. A8. Análisis de varianza para níquel de la raíz de maíz (ppm) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	3.0322	0.7580	2.19	0.1165	N. S.
Rep	4	1.9203	0.4800	1.39	0.2829	
Error	16	5.5398	0.3462			
Total	24	10.4924				
C. V.	69.389 %					

Cuadro. A9. Análisis de varianza para plomo de la raíz de maíz (ppm) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	0.06868	0.01717	0.78	0.5547	N. S.
Rep	4	0.08708	0.02177	0.99	0.4419	
Error	16	0.35244	0.02202			
Total	24	0.50820				
C. V.	164.907 %					

Cuadro. A10. Análisis de varianza para zinc de la raíz de maíz (ppm) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	1.41493	0.35373	0.35	0.8435	N.S.
Rep	4	7.18605	1.79651	1.75	0.1878	
Error	16	16.39758	1.02484			
Total	24	24.99857				
C. V.		20.192 %				

Cuadro. A11. Análisis de varianza para níquel del tallo de maíz (ppm) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	1.1171	0.2792	1.22	0.3430	N.S.
Rep	4	4.0376	1.0094	4.39	0.0138	
Error	16	3.6773	0.2298			
Total	24	8.8321				
C. V.		99.711 %				

Cuadro. A12. Análisis de varianza para cadmio del tallo de maíz (ppm) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	1.3722	0.3430	1.12	0.3825	N.S.
Rep	4	1.2372	0.3093	1.01	0.4324	
Error	16	4.9101	0.3068			
Total	24	7.5196				
C. V.		92.698 %				

Cuadro. A13. Análisis de varianza para plomo del tallo de maíz (ppm) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	2.85922	0.71480	2.47	0.0867	N. S.
Rep	4	1.34810	0.33702	1.16	0.3634	
Error	16	4.63377	0.28961			
Total	24	8.84110				
C. V.		226.87 %				

Cuadro. A14. Análisis de varianza para zinc del tallo de maíz (ppm) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	853.0296	213.2574	11.03	0.0002	**
Rep	4	30.4496	7.6124	0.39	0.8100	
Error	16	309.2424	19.3276			
Total	24	1192.7216				
C. V.		14.1106 %				

Cuadro. A15. Análisis de varianza para níquel de la hoja de maíz (ppm) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	11.2862	2.8215	4.42	0.0135	*
Rep	4	3.7522	0.9380	1.47	0.2577	
Error	16	10.2128	0.6383			
Total	24	25.2514				
C. V.		82.161 %				

Cuadro. A16. Análisis de varianza para cadmio de la hoja de maíz (ppm) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	0.40889	0.10222	1.31	0.3086	N. S.
Rep	4	0.14757	0.03689	0.47	0.7553	
Error	16	1.24930	0.07808			
Total	24	1.80577				
C. V.		269.7207 %				

Cuadro. A17. Análisis de varianza para plomo de la hoja de maíz (ppm) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	0.12948	0.03237	0.81	0.5348	N. S.
Rep	4	0.10188	0.02547	0.64	0.6415	
Error	16	0.63664	0.03979			
Total	24	0.86800				
C. V.		153.4418 %				

Cuadro. A18. Análisis de varianza para zinc de la hoja de maíz (ppm) ciclo O-I 1998.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	15.6133	3.90334	0.07	0.9891	N. S.
Rep	4	364.9235	91.23089	1.73	0.1924	
Error	16	843.3047	52.70654			
Total	24	1223.8417				
C. V.		21.123 %				

Análisis de varianza para el experimento de nopal.

Cuadro. A19. Análisis de varianza para peso húmedo del cladodio madre (g) al final del ciclo.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	937653.80	234413.45	16.13	0.0001	**
Rep	4	483242.14	120810.53	8.31	0.0019	
Error	12	174427.85	14535.65			
Total	20	1595323.80				
C. V.	10.003 %					

Cuadro. A20. Análisis de varianza para peso seco del cladodio madre (g) al final del ciclo.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	3940.08	985.02	2.50	0.0981	N. S.
Rep	4	3170.21	792.55	2.01	0.1568	
Error	12	4727.20	393.93			
Total	20	11837.50				
C. V.	17.496 %					

Cuadro. A21. Análisis de varianza para largo del cladodio madre (cm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	61.82	15.45	1.18	0.3671	N. S.
Rep	4	68.44	17.11	1.31	0.3113	
Error	12	156.81	13.08			
Total	20	287.07				
C. V.	8.1217 %					

Cuadro. A22. Análisis de varianza para ancho del cladodio madre (cm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	17.33	4.33	6.01	0.0068	**
Rep	4	7.32	1.83	2.54	0.0945	
Error	12	8.64	0.72			
Total	20	33.31				
C. V.	4.941 %					

Cuadro. A23. Análisis de varianza para grosor del cladodio madre (cm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	0.80	0.20	2.13	0.1397	N. S.
Rep	4	1.11	0.27	2.95	0.0654	
Error	12	1.13	0.09			
Total	20	3.04				
C. V.	15.074 %					

Cuadro. A24. Análisis de varianza para longitud máxima de la raíz del cladodio madre (cm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	1019.06	254.76	2.61	0.0842	N. S.
Rep	4	746.31	186.57	1.91	0.1682	
Error	13	1267.93	97.53			
Total	21	3033.31				
C. V.	23.287 %					

Cuadro. A25. Análisis de varianza para peso húmedo de raíz del cladodio madre (g).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	1363.21	340.80	2.69	0.0750	N.S.
Rep	4	1574.63	393.65	3.10	0.0505	
Error	14	1776.68	126.90			
Total	22	4714.53				
C. V.	40.906 %					

Cuadro. A26. Análisis de varianza para peso seco de raíz del cladodio madre (g).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	102.48	25.62	2.52	0.0879	N.S.
Rep	4	122.44	30.61	3.02	0.0547	
Error	12	142.08	10.14			
Total	20	367.00				
C. V.	38.706 %					

Cuadro. A27. Análisis de varianza para peso húmedo total del cladodio hijo (g).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	116589181.06	29147295.26	0.48	0.7485	N. S.
Rep	4	211340856.63	52835214.15	0.87	0.5022	
Error	15	906601186.68	60440079.11			
Total	23	1234531224.37				
C. V.	65.923 %					

Cuadro. A28. Análisis de varianza para peso seco total del cladodio hijo (g).

F.V	GL	SC	CM	FC	Pr > F	
Trat	4	30033971.62	7508492.90	0.47	0.7592	N.S.
Rep	4	64457305.33	16114326.33	1.00	0.4371	
Error	15	241244341.12	16082956.07			
Total	23	335735618.08				
C. V.		56.898 %				

Cuadro. A29. Análisis de varianza para número de cladodios hijos.

F.V	GL	SC	CM	FC	Pr > F	
Trat	4	2.62	0.65	2.81	0.0610	N. S.
Rep	4	0.94	0.23	1.00	0.4352	
Error	16	3.73	0.23			
Total	24	7.28				
C. V.		20.53 %				

Cuadro. A30. Análisis de varianza del cladodio madre en potasio (ppm).

F.V	GL	SC	CM	FC	Pr > F	
Trat	4	67205.95	16801.48	0.54	0.7105	N. S.
Rep	4	454794.28	113698.57	3.64	0.0364	
Error	12	374380.71	31198.39			
Total	20	896380.95				
C. V.		13.824 %				

Cuadro. A31. Análisis de varianza de nitratos en el cladodio madre (ppm).

F.V	GL	SC	CM	FC	Pr > F	
Trat	4	27222639.28	6805659.82	1.72	0.2103	N. S.
Rep	4	20117254.28	5029313.57	1.27	0.3347	
Error	12	47505020.71	3958751.72			
Total	20	948449914.28				
C. V.		73.574 %				

Cuadro. A32. Análisis de varianza de sodio en el cladodio madre (ppm).

F.V	GL	SC	CM	FC	Pr > F	
Trat	4	1754.20	438.55	9.50	0.0011	**
Rep	4	298.65	74.66	1.62	0.2334	
Error	12	554.09	46.17			
Total	20	2606.95				
C. V.		20.013 %				

Cuadro. A33. Análisis de varianza de conductividad eléctrica en el cladodio madre (mmhos/cm).

F.V	GL	SC	CM	FC	Pr > F	
Trat	4	5.97	1.49	2.15	0.1370	N. S.
Rep	4	3.98	0.99	1.43	0.2822	
Error	12	8.33	0.69			
Total	20	18.28				
C. V.		8.140 %				

Cuadro. A34. Análisis de varianza de pH en el cladodio madre.

F.V	GL	SC	CM	FC	Pr > F	
Trat	4	0.19	0.04	4.75	0.0157	*
Rep	4	0.19	0.04	4.83	0.0149	
Error	12	0.12	0.01			
Total	20	0.50				
C. V.		2.284 %				

Cuadro. A35. Análisis de varianza de potasio en el cladodio hijo (ppm).

F.V	GL	SC	CM	FC	Pr > F	
Trat	4	21173987.50	5293496.87	0.59	0.6753	N.S.
Rep	4	18585787.50	4646446.87	0.52	0.7242	
Error	15	134681687.50	8978779.16			
Total	23	174441462.50				
C. V.		139.451 %				

Cuadro. A36. Análisis de varianza de nitratos en el cladodio hijo (ppm).

F.V	GL	SC	CM	FC	Pr > F	
Trat	4	4806628.33	1201657.08	1.30	0.3151	N. S.
Rep	4	8561068.33	2140267.08	2.31	0.1052	
Error	15	3884886.66	925659.11			
Total	23	27252583.33				
C. V.		74.630 %				

Cuadro. A37. Análisis de varianza de sodio en el cladodio hijo (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	3828.80	956.70	1.71	0.1996	N. S.
Rep	4	4750.80	1187.70	2.13	0.1280	
Error	15	8382.34	558.82			
Total	23	16959.95				
C. V.	70.653 %					

Cuadro. A38. Análisis de varianza de conductividad eléctrica del cladodio hijo (mmhos/cm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	17.61	4.40	4.78	0.0110	*
Rep	4	8.58	2.14	2.33	0.1035	
Error	15	13.82	0.92			
Total	23	40.03				
C. V.	8.023 %					

Cuadro. A39. Análisis de varianza de pH del cladodio hijo.

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	0.39	0.09	1.75	0.1925	N. S.
Rep	4	0.75	0.18	3.29	0.0402	
Error	15	0.85	0.05			
Total	23	2.00				
C. V.	4.966 %					

Cuadro. A40. Análisis de varianza para níquel en la raíz del cladodio madre (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	5.91	1.47	1.45	0.2690	N.S.
Rep	4	2.54	0.63	0.62	0.6534	
Error	14	14.26	1.01			
Total	22	22.71				
C. V.	47.863 %					

Cuadro. A41. Análisis de varianza para plomo en la raíz del cladodio madre (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	1.91	0.47	0.59	0.6790	N.S.
Rep	4	1.19	0.29	0.36	0.8296	
Error	13	10.63	0.81			
Total	21	13.74				
C. V.	80.500 %					

Cuadro. A42. Análisis de varianza para zinc en la raíz del cladodio madre (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	293.74	73.43	3.58	0.0329	*
Rep	4	137.93	34.48	1.68	0.2105	
Error	14	287.55	20.53			
Total	22	719.23				
C. V.	28.062 %					

Cuadro. A43. Análisis de varianza para níquel en el cladodio madre (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	0.13	0.03	0.94	0.4834	N.S.
Rep	4	0.18	0.04	1.32	0.3326	
Error	9	0.32	0.03			
Total	17	0.64				
C. V.	88.084 %					

Cuadro. A44. Análisis de varianza para zinc en el cladodio madre (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	11.15	2.78	99999.99	0.0001	**
Rep	4	11.31	2.82	99999.99	0.0001	
Error	4	0.00	0.00			
Total	12	18.81				
C. V.	0 %					

Cuadro. A45. Análisis de varianza para níquel en el cladodio hijo (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	0.27	0.06	1.83	0.2615	N.S.
Rep	4	0.16	0.04	1.09	0.4504	
Error	5	0.18	0.03			
Total	13	0.62				
C. V.	42.181 %					

Cuadro. A46. Análisis de varianza para cadmio en el cladodio hijo (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	422.89	211.44	3.32	0.3620	N.S.
Rep	4	133.83	33.45	0.52	0.7605	
Error	1	63.77	63.77			
Total	7	620.50				
C. V.		154.882 %				

Cuadro. A47. Análisis de varianza para zinc en el cladodio hijo (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	82.35	20.58	0.62	0.6536	N.S.
Rep	4	72.33	18.08	0.55	0.7042	
Error	15	496.20	33.08			
Total	23	650.89				
C. V.		37.070 %				

Cuadro. A48. Análisis de varianza para níquel en el suelo totales (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	0.35	0.08	1.09	0.3950	N. S.
Rep	4	0.04	0.01	0.15	0.9582	
Error	16	1.28	0.08			
Total	24	1.69				
C. V.		50.328 %				

Cuadro. A49. Análisis de varianza para cadmio en suelo totales (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	10.43	2.60	0.56	0.6997	N.S.
Rep	4	19.58	4.89	1.04	0.4325	
Error	12	46.94	4.69			
Total	20	76.96				
C. V.		297.870 %				

Cuadro. A50. Análisis de varianza para plomo en suelo totales (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	5.27	1.31	1.31	0.3094	N. S.
Rep	4	10.86	2.71	2.69	0.0687	
Error	16	16.14	1.00			
Total	24	32.28				
C. V.		13.635 %				

Cuadro. A51. Análisis de varianza para zinc de suelo totales (ppm).

F.V	GL	SC	CM	F C	Pr > F	
Trat	4	90.92	22.73	2.03	0.1382	N. S.
Rep	4	6.48	1.62	0.14	0.9626	
Error	16	179.02	11.18			
Total	24	276.43				
C. V.		37.590 %				

