

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



USO DE LODOS RESIDUALES PROCEDENTES DE
LA CIUDAD DE DURANGO Y SU EFECTO EN LA
PRODUCTIVIDAD Y CONCENTRACION DE
METALES EN SORGO FORRAJERO
(*Sorghum vulgare Pers.*)

POR:

JOSE MARIA HERNANDEZ HERRERA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO
DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS
CON ORIENTACION EN AGUA - SUELO

MARIN, N. L., MEXICO

ABRIL DE 2004

TD

Z5071

FA

2004

.H4



1020145852

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



USO DE LODOS RESIDUALES PROCEDENTES DE
LA CIUDAD DE DURANGO Y SU EFECTO EN LA
PRODUCTIVIDAD Y CONCENTRACION DE
METALES EN SORGO FORRAJERO
(*Sorghum vulgare Pers.*)

POR:

JOSE MARIA HERNANDEZ HERRERA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO
DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS
CON ORIENTACION EN AGUA - SUELO

MARIN, N. L., MEXICO

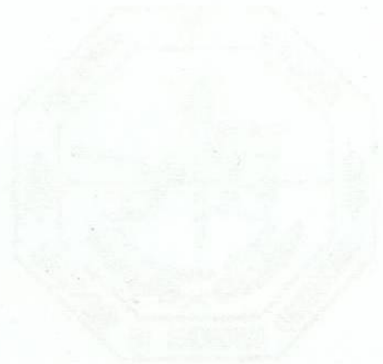
ABRIL DE 2004



979118

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE QUÍMICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

TD
Z5071
FA
2004
.H4



USO DE MÉTODOS RESIDUALES PROCEDENTES DE
LA CIUDAD DE DURANGO Y SU EFECTO EN LA
PRODUCTIVIDAD Y CONCENTRACION DE
METALES EN SORO FERROUSO
(último valor para)

FOR

JOSE MARIA HERRERA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO
DE DOCTOR EN QUÍMICA
CON ESPECIALIDAD EN QUÍMICA ANALÍTICA



FONDO
TESIS

AGOSTO DE 2004

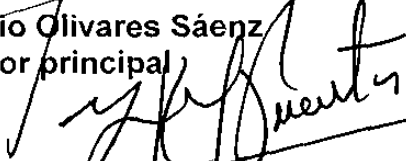
MARIA M. HERRERA

USO DE LODOS RESIDUALES PROCEDENTES DE LA CIUDAD
DE DURANGO Y SU EFECTO EN LA PRODUCTIVIDAD Y
CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN SORGO
FORRAJERO (*Sorghum vulgare Pers.*)

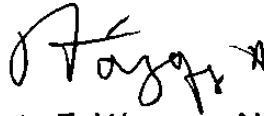
Aprobación de la Tesis



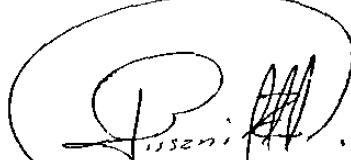
Ph. D. Emilio Olivares Sáenz
Asesor principal



Dr. Humberto Rodríguez Fuentes
Co-asesor

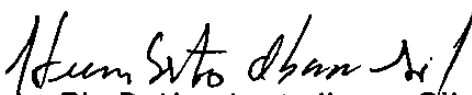


Ph. D. Rigoberto E. Vázquez Alvarado
Co-asesor



Dr. Juan Francisco Pissani Zúñiga
Co-asesor

Ignacio Villanueva Fierro
Ph. D. Ignacio Villanueva Fierro
Asesor Externo



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

Marín, N. L., México

Abril de 2004

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria
(DGETA)

Al Consejo Nacional de Educación Tecnológica.
(CoSNET)

Al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango
(COCYTED)

Al Gobierno del Estado de Durango.

Al Instituto Tecnológico Agropecuario No. 1 de Durango.

A todos ellos por brindarme el apoyo para realizar los estudios de doctorado

En forma especial agradezco al Ph. D. Emilio Olivares Sáenz, asesor principal,
por su valioso conocimiento e invaluable tiempo que me dedicó en la
culminación de ésta tesis y sobre todo el amigo que siempre lo demostró

Al Dr. Humberto Rodríguez Fuentes, por sus enseñanzas, asesoría y aportes
en la revisión de ésta tesis, además por la amistad que me brindó

Al Ph. D. Rigoberto E. Alvarado Vázquez, por su confianza y apoyo en la
realización de ésta investigación

Al Dr. Juan Francisco Pissani Zúñiga, por el gran apoyo que me demostró en la
culminación de este trabajo

Al Ph. D. Ignacio Villanueva Fierro, por sus consejos y asesoría en la revisión
de este documento sin menoscabar la incondicional amistad que nos une

A mis amigos, Jesús García Pereyra, José Luis Woo Reza, Ph. D. Hiram
Medrano Roldán, Ph. D. Rubén González Laredo, Ofelia Gutiérrez, Graciela
Ramírez, Juana Elvira Pineda, Myrna Hernández, Darío Cisneros A. Ismael
Mata E.

A mis compañeros de trabajo del Instituto Tecnológico Agropecuario de
Durango.

DEDICATORIA

A mis Padres:

José Hernández Carrasco (qpd)

María Herrera de Hernández (qpd)

Quienes me brindaron todo su cariño y confianza para seguir adelante y ser un hombre de provecho.

A mi esposa:

Carmen Jáquez de Hernández.

Que con su comprensión y amor me apoyó en el logro de éste objetivo.

A mis hijos:

José Irving, Ingrid Lindsay, José Isziel, Italia del Carmen

Que comprendieron el tiempo que no compartimos y sin reclamación siempre confiaron en mi y que la presente les estimule para una superación en el futuro

A mis hermanos:

Ma. De Jesús, Ma. Ines, Esperanza, Ma. Engracia, José Trinidad,

Guillermina, Ma. Francisca, Armando, Pedro Jesús, Rosalina.

Quienes me brindaron todo su apoyo y confianza en mi formación académica

A todos mis cuñados y compadres:

A todos mis sobrinos:

Que con su juvenil entusiasmo me apoyaron para proseguir en mi superación

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

JOSÉ MARÍA HERNÁNDEZ HERRERA.

Candidato al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas con Especialidad en Agua-Suelo, de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Tesis:

Uso de lodos residuales procedentes de la ciudad de Durango y su efecto en la productividad y concentración de metales pesados en sorgo forrajero (*Sorghum vulgare Pers.*)

Áreas de estudios:

Fertilidad de suelos, Nutrición vegetal y Uso de biosólidos en agricultura.

Biografía

Datos personales:

Nacido en Nuevo Ideal, Dgo. el día 13 de Diciembre de 1954.

Formación Profesional:

Egresado de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Chihuahua como Ingeniero Agrónomo con Especialidad en Fitotecnia. Septiembre 1979.

Egresado del Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10 del Centro de Investigación y Graduados Agropecuarios de Torreón Coah. en Ciencias en Suelos. Agosto 1994.

CONTENIDO

	Página
INDICE DE CUADROS	X
RESUMEN	Xvi
SUMMARY	xviii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	5
1.2. Hipótesis	6
II. REVISION DE LITERATURA	8
2.1. Generalidades sobre lodos residuales.....	8
2.2. Tipos de lodos	9
2.2.1. Lodo primario	9
2.2.2. Lodo secundario.....	10
2.2.3. Lodo terciario	10
2.2.4. Características del lodo residual	10
2.3. Aplicación de abonos orgánicos en suelos agrícolas	12
2.4. Aplicación de lodos residuales en suelos agrícolas.....	15
2.5. Otros usos de los lodos residuales.....	24
2.6. Aspectos legales sobre la aplicación de lodos residuales.....	24
2.7. Limitaciones del uso de lodos residuales.....	26
2.7.1. Olores desagradables	26
2.7.2. Patógenos	27
2.7.3. Metales pesados	28
2.8. Absorción de los metales pesados por las plantas	32
2.9. Análisis del tejido vegetal para la determinación de metales pesados	36
3.0. Análisis secuencial para la determinación de metales pesados en el suelo	37
III. MATERIALES Y MÉTODOS	39
3.1. Ubicación geográfica del estado de Durango	39
3.2 Orografía	39

3.3. Geografía	40
3.4. Suelos dominantes	41
3.5. Hidrología	42
3.6. Origen de las descargas de la ciudad de Durango	43
3.7. Localización del área	45
3.8. Experimento 1	46
3.8.1. Primera localidad y primer ciclo agrícola	46
3.8.2. Objetivos	46
3.8.3. Tratamientos y diseño experimental.....	46
3.8.4. Desarrollo del experimento	47
3.8.5. Variables evaluadas y análisis estadístico	48
3.9. Experimento 2	50
3.9.1. Segunda localidad y primer ciclo agrícola	50
3.9.2. Objetivos	51
3.9.3. Tratamientos y diseño experimental.....	51
3.9.4. Variables evaluadas	52
3.9.5. Desarrollo del experimento	52
3.10. Experimento 3	54
3.10.1. Primera localidad y segundo ciclo agrícola.....	54
3.10.2. Objetivos	54
3.10.3. Diseño experimental.....	54
3.10.4. Tratamientos evaluados.....	55
3.10.5. Variables evaluadas.....	56
3.10.6. Desarrollo del experimento.....	56
3.11. Experimento 4	58
3.11.1. Segunda localidad y Segundo ciclo agrícola.....	58
3.11.2. Objetivos	58
3.11.3. Diseño experimental	59
3.11.4. Tratamientos evaluados	59
3.11.5. Variables evaluadas	59
3.11.6. Desarrollo del experimento	60

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
4.1. Experimento 1	62
4.2. Experimento 2	70
4.3. Experimento 3	74
4.4. Experimento 4	76
V. CONCLUSIONES	93
5.1. Experimento 1	93
5.2. Experimento 2	94
5.3. Experimento 3	94
5.4. Experimento 4	95
5.5. Conclusiones del análisis secuencial	96
VI. BIBLIGRAFÍA	97
APÉNDICE	107

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.	Rangos de concentración de nutrimentos y algunos metales en tejidos de sorgo y maíz	22
2.	Contenido promedio de elementos traza en los cultivos	23
3.	Concentraciones promedio de metales pesados en un suelo mineral.	23
4.	Máximas concentraciones de metales pesados permitidas en diferentes tipos de lodos residuales y cantidad máxima permitida de metales pesados que se puede aplicar por año	30
5.	Limites máximos permisibles para metales pesados en lodos residuales de diferente calidad, establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002).....	30
6.	Limites máximos permisibles para patógenos y parásitos que pueden contener los lodos residuales, establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002).....	31
7.	Suelos dominantes en el estado de Durango, y el porcentaje de la superficie.....	41
8.	Tratamientos evaluados en el experimento 1	47
9.	Tratamientos evaluados en el experimento 2	51
10.	Características físicas y químicas del suelo utilizado en los cuatro experimentos, procedentes del área experimental del Instituto Tecnológico Agropecuario de Durango, Dgo.....	63
11.	Características físicas y químicas del lodo residual al momento de la toma de muestras.....	64
12.	Concentraciones adecuadas y limitantes de metales pesados según la Norma US-EPA, parte 503 (1996), limite de concentración de metales pesados permisibles en los lodos residuales de buena calidad, de acuerdo a la norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT(2002) y concentración de metales pesados contenida en los lodos utilizados en esta investigación	66

13.	Comparación de medias entre los tratamientos, ajustados por el método de vecindad cercana del experimento 1.....	69
14.	Concentraciones promedio de los metales pesados en la parte aérea del cultivo de sorgo forrajero expresado en mg kg^{-1} en base seca.....	71
15.	Contenido promedio de metales pesados en la raíz en el sorgo forrajero expresado en mg kg^{-1}	72
16.	Comparación de medias por el método de Tukey, expresados en gramos por planta (experimento 2).....	73
17.	Comparación de medias ajustadas por vecindad cercana para la primera localidad y segundo ciclo agrícola 2002 (experimento 3).....	74
18.	Características físicas y químicas del suelo de cada tratamiento al final de la investigación, en el cuarto experimento en el invernadero del CIIDIR-IPN, Dgo. realizado en el laboratorio de suelos del Instituto Tecnológico Agropecuario de Durango.....	78
19.	Análisis secuencial del suelo del tratamiento 1= testigo sin aplicación, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL (2003) se expresa en mg kg^{-1}	79
20.	Análisis secuencial en el suelo del tratamiento 1= testigo, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL (2003) se expresa en porcentaje.....	80
21.	Análisis secuencial del suelo del tratamiento 2=4 Mg ha^{-1} de lodo residual, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL (2003) se expresa en mg kg^{-1}	81
22.	Análisis secuencial en el suelo del tratamiento 2 = 4 Mg ha^{-1} de lodo residual, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL (2003) se expresa en porcentaje.....	81

23.	Análisis secuencial del suelo del tratamiento 3 = 8 Mg ha ⁻¹ de lodo residual, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL (2003) se expresa en mg kg ⁻¹	83
24.	Análisis secuencial en el suelo del tratamiento 3 = 8 Mg ha ⁻¹ de lodo residual, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL (2003) se expresa en porcentaje.....	83
25.	Análisis secuencial del suelo del tratamiento 4 = 4 Mg ha ⁻¹ de estiércol bovino, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL (2003) se expresa en mg kg ⁻¹	84
26.	Análisis secuencial del suelo del tratamiento 4 = 4 Mg ha ⁻¹ de estiércol bovino, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL (2003) se expresa en porcentaje.....	85
27.	Análisis secuencial del suelo del tratamiento 5= fertilizante químico (120-60-00)perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL (2003) se expresa en mg kg ⁻¹	86
28.	Análisis secuencial del suelo del tratamiento 5= fertilizante químico (120-60-00)perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL (2003) se expresa en porcentaje.....	86
29.	Concentraciones promedio de metales pesados en la parte aérea en del cultivo de sorgo forrajero expresados en mg kg ⁻¹ en base seca, pertenecientes al cuarto experimento y a cada uno de los tratamientos, analizados en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL por medio del espectrofotómetro de absorción atómica.....	88

30.	Concentraciones promedio de metales pesados en la raíz del cultivo de sorgo forrajero expresados en mg kg^{-1} en base seca, pertenecientes al cuarto experimento y a cada uno de los tratamientos, analizados en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL por medio del espectrofotómetro de absorción atómica.....	90
31.	Comparación de medias de materia seca por planta para la segunda localidad y segundo ciclo agrícola 2002 (experimento 4).....	91
32.	Niveles de contaminación por metales pesados en algunos países, en los que se considera como suelo contaminado (expresados en mg kg^{-1} total en el suelo). Adaptado de Chen, Tsai y Tsui(1999).....	92

APÉNDICE

Cuadro		Página
A 1.	Agentes infecciosos que pueden estar presentes en el lodo residual (Metcalf y Eddy, 1996).....	107
A 2.	Organismos que han sido propuestos como indicadores de la contaminación humana (Metcalf y Eddy, 1996).....	108
A 3.	Aprovechamiento de los lodos residuales según su tipo y clase, hasta con un contenido de humedad de 85% (NOM-004-SEMARNAT-2002).....	109
A 4.	Frecuencia de muestreos y análisis para lodos y biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002)	109
A 5.	Preservación y tiempo máximo para el análisis de cada uno de los parámetros según la NOM-004-SEMARNAT (2002).....	110
A 6.	Relación de longitud y ancho de banda para los elementos analizados por flama según la NOM-004-SEMARNAT (2002).....	110
A 7.	Relación de concentración para calibración del instrumento utilizado por flama (NOM-004-SEMARNAT-2002)	111
A 8.	Relación de longitud y ancho de banda para los elementos analizados por generador de hidrocarburos (NOM-004-SEMARNAT-2002)	111
A 9.	Relación de concentración para calibración del instrumento utilizando generador de hidruros (NOM-004-SEMARNAT-2002)	111
A 10.	Efecto de los procesos de los tratamientos del lodo residual sobre las prácticas de aplicación (US-EPA 1996)	112
A 11.	Plantas de tratamiento, capacidad instalada y volumen tratado de agua residual por municipio y tipo de servicio.....	114
A 12.	Usuarios de la red de drenaje y el desecho que producen.....	116
A 13.	Eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales de acuerdo con los parámetros unidad, influente, efluente y remoción de acuerdo con los reportes del laboratorio.....	116
A14.	Dimensiones y capacidad de almacenamiento de las lagunas.....	117

A15.	Dimensiones y distribución de las lagunas de oxidación de la ciudad de Durango.....	117
A16.	Análisis de varianza por contrastes ortogonales, para la primera localidad y primer ciclo agrícola 2001 (experimento 1).....	117
A 17.	Distribución de los coeficientes y tratamientos por medio del arreglo por contrastes ortogonales, de la primera localidad y para el primer y segundo ciclo agrícola (experimentos 1 y 3).....	118
A 18.	Análisis de varianza para la producción de sorgo forrajero de la segunda localidad y primer ciclo agrícola 2001 (experimento 2).....	118
A 19.	Análisis de varianza para el rendimiento de sorgo forrajero en base seca de la primera localidad y segundo ciclo agrícola 2002 (experimento 3).....	118
A20.	Análisis de varianza de contrastes ortogonales para el rendimiento de forraje en base seca de la primera localidad y segundo ciclo agrícola 2002 (experimento 3).....	119
A21.	Análisis de varianza por bloques completos al azar, para la producción de sorgo forrajero base seca segunda localidad y segundo ciclo agrícola 2002 (experimento 4).....	119

RESUMEN

José María Hernández Herrera

Fecha de Graduación: Abril de 2004

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Agronomía

Título del Estudio: USO DE LODOS RESIDUALES PROCEDENTES DE LA CIUDAD DE DURANGO Y SU EFECTO EN LA PRODUCTIVIDAD Y CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN SORGO FORRAJERO (*Sorghum vulgare* Pers).

Número de páginas: 119

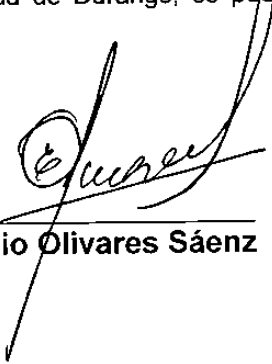
**Candidato para el grado de Doctor
en Ciencias Agrícolas con orientación
en Agua-Suelo**

Area de Estudio: Fertilidad de suelos, nutrición vegetal y uso de biosólidos en agricultura.

Propósito y Método del Estudio: Los lodos residuales pueden aplicarse al suelo con el propósito de producir cultivos destinados a la alimentación de animales domésticos. Su adición mejora las características físicas y químicas del suelo y en algunos suelos se puede incrementar los niveles de metales pesados, por lo que el propósito del presente estudio es evaluar diferentes dosis de biosólidos y comparar su efecto con fertilizante químico y estiércol bovino en cuanto al rendimiento de materia seca de sorgo forrajero y contenido de metales pesados en hojas y raíces. La investigación se efectuó en dos ciclos agrícolas y en dos localidades, dando un total de cuatro experimentos; el suelo que se utilizó fue el mismo para toda la investigación. En el primer experimento se sembró directamente al terreno del área experimental del Instituto Tecnológico Agropecuario de Durango. En el segundo experimento se sembró en contenedores de polietileno en el área de invernadero del Centro Interdisciplinario e Investigación para el Desarrollo Integral de la Región – IPN, Unidad Durango. En el tercer experimento se sembró directamente al terreno y en la misma parcela donde se sembró el primer experimento. En el cuarto experimento se sembró en los mismos contenedores de polietileno utilizados en el segundo experimento. La finalidad de ésta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación al suelo de cinco tratamientos los cuales constaron de dos dosis de lodos residuales de 4 y 8 Mg ha⁻¹, respectivamente; estiércol bovino con 4 Mg ha⁻¹; fertilizante químico con la fórmula 120-60-00 y un testigo sin aplicación de fertilizante y el cultivo indicador fue sorgo forrajero. El objetivo fue la producción de forraje en base seca y la evaluación de la concentración de metales pesados en el suelo y en el cultivo. En los experimentos 3 y 4 no se aplicó abonos orgánicos ni inorgánicos, ya que la investigación estaba enfocada a estudiar la residualidad. En los experimentos 1 y 3, el diseño experimental utilizado fue el de bloques al azar con 5 tratamientos y 5 repeticiones con un análisis de varianza ajustado por vecindad cercana y la medias fueron comparadas por contrastes ortogonales; en los experimentos 2 y 4, el diseño experimental fue el de bloques completos al azar con 5 tratamientos y 5 repeticiones y la comparación de medias por el método de Tukey

Contribuciones y Conclusiones: Los resultados de los cuatro experimentos mostraron que la adición de abonos orgánicos y químicos incrementaron el rendimiento del sorgo forrajero y no influyeron sustancialmente en el contenido de metales pesados en el suelo, ni en el tejido vegetal; además la concentración de metales pesados contenida en los lodos residuales estuvo por debajo de los límites que establecen las Normas US-EPA-503-1996 y la NOM-SEMARNAT-2002, por lo que se concluye que los lodos residuales de la laguna de oxidación de la ciudad de Durango, se pueden aplicar a terrenos agrícolas de la región.

FIRMA DEL ASESOR PRINCIPAL: _____


Ph. D. Emilio Olivares Sáenz

SUMMARY

José María Hernández Herrera

Graduation date: May 2004

Autonomous University of Nuevo Leon.

Faculty of Agronomy.

Title of study: Use of wastewater sludge municipal of Durango city, and it's effect in the production and concentrations of heavy metals in the forage sorghum culture (*Sorghum vulgare Pers*).

Page numbers: 119

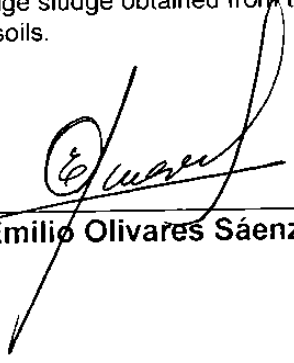
Candidate to obtain the Ph. Degree
In Agronomic Sciences with Water-
Soil Specialty

Study area: Soils Fertility, Vegetable nutrition, and Sludge wastewater use in agriculture.

Purpose and study method: The municipal wastewater sludge can be added to the soil with the purpose to increase yields of forage crops. Wastewater sludge can improve the physical and chemical characteristics of the soil and in some soils the heavy metals in the solutions may increase, therefore the purpose of this research was to evaluate different sewage sludge doses and compare them with chemical fertilizers and manure using as variables yield of dry matter of sorghum and heavy metal concentration in leaves and roots. This research was conducted in two different agriculture periods and two sites, with a total of four experiments, the soil used was the same for the entire research. The first experiment was sowed directly to the field at the experimental area of the Agronomic Technological Institute No. 1 of Durango City. The second experiment was sowed in polyethylene containers in the greenhouse area of the Research Interdisciplinary Center for the Integral Development of the Region - Polytechnic National Institute, Durango unit. The third experiment was sowed directly to the field and in the same area, where was sowed the first experiment. The fourth experiment was sowed at the same polyethylene containers of the second experiment. The objective research was to evaluate the effect of the application to the soil of five treatments, which consisted of two dosages of wastewater sludge, 4 and 8 Mg ha⁻¹, respectively, one dosage of bovine manure of 4 Mg ha⁻¹; one dosage of chemical fertilizer with the formula of 120-60-00, and a control without fertilizer application and the indicative culture was sorghum forage. The objective was to estimate the production of forage in dry basis and evaluate the concentration of heavy metals in soil and the culture. In experiments third and fourth there was not applied fertilizer organic, neither inorganic, because the research was focused to investigate the residuality. In experiments first and third, the experiment was established under a complete block design randomized and analyzed by nearest neighbor, and the means was analyzed for orthogonal contrast, in experiments second and fourth the experimental design was a complete block randomized with five treatments and five replicat.ons and mean comparison by Tukey method.

Contribution and Conclusions: The results of the four experiments showed that the addition of organic and chemicals fertilizer did not influenced substantially in the content of heavy metals in the soil neither in the culture, besides the heavy metals concentration in the wastewater sludge was below the limits established in Norm-US-EPA-503, 1996 and NOM-SEMARNAT- 2002 Therefore, the sewage sludge obtained from the oxidation lakes of Durango city may be apply to agricultural soils.

SIGNATURE OF THESIS DIRECTOR:


Ph. D. Emilio Olivares Sáenz

I. INTRODUCCIÓN

Los problemas con el agua residual a gran escala surgen después de que son establecidos los sistemas de drenaje en Europa y Estados Unidos de América a mediados del siglo XIX. Estos desechos se arrojaban a los ríos sin ningún tratamiento, por lo que surgieron problemas de contaminación y eutricación de los ríos por el exceso de materia orgánica en los residuos. Esta situación obligó a los países a dar tratamiento a las aguas residuales, lo que se llevaba a cabo en “granjas de tratamiento”, las cuales evolucionaron hasta las plantas modernas de tratamiento de aguas residuales.

Las aguas residuales de la mayoría de las comunidades se vertían directamente a ríos y corrientes mediante alcantarillado unitario, lo que provocaba una acumulación de lodos, desarrollo de olores y condiciones desagradables. Para solventar estos problemas se introdujo la evacuación separada de las aguas residuales y de las aguas pluviales, para después aplicarles un tratamiento.

Las aguas residuales son líquidos de composición variada que provienen de usos municipal, industrial, comercial o agropecuario, las cuales han sufrido degradación de su calidad original ocasionando la necesidad de un tratamiento que asegure la reutilización. Actualmente en México el tratamiento de aguas residuales asciende aproximadamente a 93,000 lps diarios, dando una

producción aproximada de 34,560 toneladas de biosólidos diarias, en Monterrey y su zona metropolitana producen 3,368 lps de agua residual y 150 toneladas diarias de lodo residual (Pissani, 2002). En la ciudad de Durango, México, asciende aproximadamente a 1,200 lps diarios, con una producción de lodo residual de 25 toneladas diarias (Flores y De la Barrera, 1999).

Los lodos residuales son el subproducto inevitable de las plantas de tratamiento de aguas residuales y conforme las normas indiquen una calidad mayor en el efluente, mayor será la producción de lodos residuales. Estos materiales se clasifican en primarios que resultan del tratamiento primario del agua residual y que no ha experimentado ningún proceso de tratamiento debido a que se obtienen de una remoción física por suspensión; los lodos secundarios son los que involucran un proceso de clarificación primaria seguida de un tratamiento biológico y una clarificación secundaria; y los lodos terciarios son los producidos por procesos de tratamiento avanzado del agua residual como la precipitación química y filtración.

La incorporación de lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales a los suelos agrícolas es una práctica muy común en países desarrollados como Estados Unidos de América, Europa y Asia, que desde el siglo XIX son aplicados a los suelos agrícolas por razones prácticas y económicas, en México los lodos residuales sin tratar se aplican desde inicios del siglo XIX. Las ventajas que tienen los lodos residuales cuando se aplican a los suelos agrícolas son: su valor como fertilizante porque contienen nitrógeno,

fósforo, potasio y algunos de los micronutrientes esenciales para las plantas y además mejoran las propiedades físico-químicas de los suelos, por el efecto de la materia orgánica (Ramos y Aguilera, 1995).

La desventaja de la incorporación de los lodos residuales a los suelos es su contenido de metales pesados, los cuales pueden contaminar el suelo y ser absorbidos por las plantas en concentraciones que pueden ser nocivas para la salud de quien las consume; el contenido de microorganismos patógenos puede causar enfermedades de quienes manejan los lodos (Cuadros A1 y A2); contaminación del agua por metales pesados que al ser lixiviados o arrastrados de la superficie del suelo se mezclan con las aguas superficiales o subterráneas; y la contaminación del aire por la producción de gases como metano, amoníaco, mercaptanos, H_2S y CS_2 (Metcalf y Eddy, 1996).

Algunos factores limitantes para la producción de forrajes en el municipio de Durango, México son: la escasez de agua, suelos de baja fertilidad y erosionados, pobres en materia orgánica; por lo que una alternativa para aumentar la fertilidad del suelo, la ofrece la aplicación de lodos residuales o biosólidos procedentes de la planta tratadora de aguas residuales de la ciudad de Durango; estos lodos pueden presentar características físico-químicas aceptables para su incorporación al suelo y para ser utilizados en un cultivo que no presente riesgos directos a la salud humana, respetando las normas establecidas y sobre todo hacer uso de los lodos residuales que se encuentran

sin utilidad en el fondo de las 6 lagunas de oxidación de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Esta investigación constó de cuatro experimentos, los cuales se efectuaron en dos localidades y dos ciclos agrícolas; en la primera localidad fue sembrado el cultivo de sorgo forrajero directamente en los suelos del área experimental del Instituto Tecnológico Agropecuario de Durango y la segunda localidad se sembró el mismo cultivo en contenedores de polietileno en el invernadero del Centro Interdisciplinario y de Investigación para el Desarrollo Integral de la Región del Instituto Politécnico Nacional Unidad Durango.

Los objetivos de ésta investigación fueron: Determinar las características de los lodos residuales provenientes de la ciudad de Durango, al momento de tomar las muestras; evaluar el efecto de la aplicación de lodo residual sobre la producción de forraje en base seca del sorgo forrajero; estimar la concentración de metales pesados en el tejido vegetal de la parte aérea (tallo, hoja y panícula) y en la raíz; evaluar el efecto residual de la aplicación de los lodos residuales en la productividad de sorgo forrajero en base seca y evaluar la concentración de metales pesados en el suelo.

1.1. OBJETIVOS

1. Determinar las características de los lodos residuales municipales de la ciudad de Durango, al momento de la toma de muestras.
2. Evaluar el efecto de la aplicación de lodos residuales sobre la producción de forraje en el cultivo de sorgo forrajero.
3. Estimar la concentración de metales pesados en el tejido vegetal de la parte aérea y en la raíz.
4. Evaluar el efecto residual de la aplicación de lodo residual en a productividad del sorgo forrajero en base seca.
5. Evaluar la concentración de metales pesados en el suelo.

1.2. HIPOTESIS

1. Los lodos residuales procedentes de la planta tratadoras de aguas residuales de la ciudad de Durango, México, son aptos para la aplicación a suelos agrícolas, debido a que las concentraciones de metales pesados, agentes patógenos y parásitos están dentro de los rangos permitidos, establecidos en las normas oficiales (US-EPA, 1996 y NOM-004-SEMARNAT-2002) para la aplicación de lodos residuales.
2. La aplicación de lodos residuales municipales de la ciudad de Durango, incrementan el rendimiento en el siguiente ciclo del cultivo de sorgo forrajero.
3. La concentración de metales pesados en el tejido vegetal del sorgo forrajero cultivado con aplicación de lodos residuales municipales de la ciudad de Durango, están dentro de los límites permisibles por la norma oficial NOM-004-SEMARNAT-2002.
4. El efecto residual de los nutrimentos contenidos en los lodos residuales están disponibles y se manifiestan en la productividad del sorgo forrajero en el siguiente ciclo agrícola.

5. La aplicación de lodos residuales municipales de la ciudad de Durango, México, en suelos alcalinos de la región, no incrementan la concentración de metales pesados en la solución del suelo y en los sitios de intercambio en niveles tales que puedan ser absorbidos por las plantas en grandes cantidades.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1. Generalidades sobre los lodos residuales

Los residuos generados por las primeras poblaciones humanas eran fácilmente reciclados por la naturaleza sin riesgos importantes de contaminación, pero a medida que se fue incrementando la población, los residuos generados se convirtieron en un problema para la sociedad. En culturas milenarias como la de China, los residuos orgánicos se utilizaron aplicándolos a suelos agrícolas, de esta forma se evitaba la contaminación y se mejoraba la fertilidad de los suelos.

Hasta 1940 los lodos residuales generados en las plantas más evolucionadas de tratamiento de aguas residuales, se aplicaban a suelos agrícolas, sin embargo, su uso disminuyó debido a la aparición de los fertilizantes químicos, los cuales eran de bajo costo, fácil aplicación y contenido nutrimental constante. En las últimas décadas, la aplicación de lodos residuales a suelos agrícolas está siendo considerada como uno de los métodos de disposición más atractivos, debido a su costo relativamente bajo y al efecto positivo sobre el rendimiento de los cultivos. Se estima que en 1998 en Estados Unidos de América se generaron 6.9 millones de toneladas de lodos, de los cuales el 67 por ciento se aplicó a los suelos agrícolas, 4 por ciento a suelos forestales, 9 por ciento para rehabilitar suelos marginales, 8 por ciento se

aplicó sobre sitios de contacto público y 12 por ciento se distribuyó o comercializó en sacos para aplicarlos al suelo o macetas (Outwater, 1994)

2.2. Tipos de lodos

Los tipos de lodos residuales dependen del tratamiento del agua residual; existen entre ellos los lodos primarios, lodos secundarios y lodos terciarios; además, los lodos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales, se pueden clasificar en las clases A y B; la clase A se refiere a lodos residuales con niveles de patógenos no detectables; cumplen con estrictos requerimientos de atracción de vectores, así como bajos niveles de metales pesados. Los de la clase B son lodos residuales tratados que contienen niveles detectables de patógenos, sin embargo, se pueden aplicar a suelos agrícolas con restricciones en cultivos (Metcalf y Eddy, 1996).

2.2.1 Lodo primario

Es el lodo resultante del tratamiento primario del agua residual y que no ha experimentado ningún proceso de tratamiento, usualmente contiene de 93 a 99.5 por ciento de agua, así como sólidos y sustancias disueltas que estuvieron presentes en el agua residual o fueron agregados durante los procesos de tratamiento del agua residual.

2.2.2. Lodo secundario

Los tratamientos secundarios del agua residual, involucran un proceso de clarificación primario seguido de un tratamiento biológico y una clarificación secundaria, el lodo generado por procesos de tratamiento secundarios del agua residual, tales como los sistemas biológicos activados y filtros de goteo, contienen de 0.5 a 2 por ciento de sólidos y son más difíciles de espesarse y deshidratarse que los lodos primarios.

2.2.3. Lodo terciario

Son producidos por tratamientos avanzados del agua residual, como la precipitación química y filtración. Los químicos usados en los procesos de tratamiento avanzado del agua residual, como el aluminio, fierro, sales, cal o polímeros orgánicos, aumentan la cantidad de lodo y por consiguiente el volumen del lodo (Metcalf y Eddy, 1996).

2.2.4. Características del lodo residual

La composición del lodo residual depende de las características del influente del agua residual que entra a las plantas de tratamiento de aguas residuales y de los procesos de tratamiento utilizados, ya que entre más industrializada sea una ciudad, tendrá mayores posibilidades de contener

metales pesados en mayor proporción y será un problema para aplicarlos a los suelos agrícolas.

Los tratamientos para las aguas industriales, los programas de prevención de contaminantes y los procesos de tratamiento avanzado que se le aplican a las aguas residuales y lodos, con el objetivo de reducir los niveles de contaminantes del lodo final que se obtienen de las plantas de tratamiento y su composición varía entre cada planta de tratamiento (Pissani, 2002).

Las propiedades más importantes que se necesitan para caracterizar un lodo residual son:

- Contenido de sólidos totales
- Contenido de sólidos volátiles
- pH
- Materia orgánica
- Patógenos
- Nutrientes
- Metales
- Químicos orgánicos sintéticos
- Contaminantes peligrosos

La composición del lodo es fundamental en las siguientes decisiones de diseño:

- Si el lodo que se aplica es de bajo costo.
- Que práctica de aplicación es más factible.
- La cantidad que se aplicará anualmente o acumulativamente.
- El grado de control y los sistemas de monitoreo requerido.

2.3. Aplicación de abonos orgánicos en suelos agrícolas

Todos los tejidos orgánicos que llegan al suelo en forma de restos de plantas y animales son sometidos a una transformación química y bioquímica. En estas transformaciones participan los microorganismos vegetales y animales inferiores y superiores. Los animales superiores cooperan en los primeros momentos, mezclando aquellos materiales con las partículas inorgánicas del suelo. Favoreciendo de esta forma su desintegración y transformación por los microorganismos que viven en él, especialmente bacterias y hongos (Ortiz y Ortiz, 1990).

Las bacterias, los hongos, los actinomicetos y las algas, constituyen los microorganismos del suelo que aportan un porcentaje de material orgánico una vez muertos, pero su principal función es actuar sobre la materia orgánica mediante los procesos de mineralización y humificación. La mineralización es una descomposición rápida de los residuos orgánicos, convirtiéndose en

compuestos minerales que poseen una formación química como CO_2 (gas), H_2O , NH_3 , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} . La humificación es otra actividad de los microorganismos, los cuales toman los residuos orgánicos y los transforman en otros nuevos complejos orgánicos (humus), que se caracterizan por su mayor estabilidad, porque se degradan lentamente en una mineralización gradual (Rodríguez, 1982).

En suelos de contenido de materia orgánica pobre, los problemas por la presión de laboreo se acrecentan y es limitante para el crecimiento y desarrollo de cultivos, una alternativa es la incorporación de materia orgánica a través de estiércol y considerando que el 65 por ciento de materia orgánica contenida en el estiércol se descompone durante el primer año, el 10 por ciento se descompone en el segundo año, 5 por ciento durante el tercer año y el resto durante el cuarto año en adelante (Rodríguez, 1992).

Los abonos orgánicos contienen la mayoría de los nutrientes necesarios para el crecimiento normal de los cultivos y el efecto de los macronutrientes contenidos se liberan rápidamente, como el nitrógeno que se libera un tercio con suma rapidez pero gran parte es muy resistente y persiste en el suelo por largo tiempo, también el fósforo que está combinado con la materia orgánica, alrededor de la mitad queda disponible para los cultivos y el potasio contenido en los abonos es soluble en agua y casi todo queda disponible para la planta (Alarcón, 1997).

El uso de estiércol en la agricultura tiene un incremento de los rendimientos y de los cultivos por las siguientes razones: Aporta todos los elementos esenciales que requiere la planta; contienen un efecto residual mayor que el de los fertilizantes químicos; libera nutrimentos en forma gradual que favorece su disponibilidad para el desarrollo del cultivo; mejora la estructura, porosidad, aireación y capacidad de retención de humedad del suelo; forma complejos orgánicos con los nutrimentos, manteniéndolos disponibles; eleva la capacidad de intercambio catiónico; libera CO₂ durante su descomposición formando otros compuestos que solubilizan nutrimentos de otras fuentes, abastece de energía a los microorganismos y favorece la resistencia de los agregados del suelo a ser dispersos.

Los estiércoles que presentan descomposición gradual y menor liberación de nutrimentos en el primer año de aplicación, tienen un mayor efecto residual que los que presentan liberación inmediata. Los suelos a los que se les adiciona materia orgánica en forma de estiércol, tienen una respuesta de los cultivos extraordinaria (Ludwick, 1994; SAGAR, 1998).

El mejoramiento de un suelo con la adición de abonos orgánicos es un proceso que toma varios años e igualmente sus efectos residuales se pueden prolongar por varios ciclos. Castellanos, *et al.*, (1989). Evaluaron dosis con estiércol de 30, 60, 120 y 240 Mg ha⁻¹ por año, durante un periodo de cuatro años, encontrando que el mejor tratamiento en cuanto a rendimiento de forraje fue donde se aplicó 60 Mg ha⁻¹ por año, además la aplicación de estiércol

abatió significativamente la densidad aparente; elevó el contenido de materia orgánica y de fósforo disponible. El estiércol presentó efectos residuales aún cuatro años después de la aplicación, además redujo el impacto del paso de maquinaria sobre la compactación del suelo.

En la investigación efectuada por Vázquez, (1996) se aplicó al suelo estiércol bovino en nopalito para verdura, encontrando que este material promueve una respuesta favorable en el crecimiento de la planta, en dicho estudio se aplicaron altas cantidades de estiércol bovino, desde 200, 400 y 600 t ha⁻¹ en una sola emisión al inicio de la investigación, en el segundo año de evaluación se detectaron diferencias en el rendimiento en dos cultivares de nopalito para verdura, siendo la dosis de 600 t ha⁻¹ la que obtuvo el rendimiento más alto siguiendo las dosis de 400 y 200 t ha⁻¹.

2.4. Aplicación de lodos residuales en suelos agrícolas

En algunos países, como en México hasta el año 2000, los lodos residuales debían ser confinados para evitar contaminación a terrenos agrícolas o forestales, pero al confinar estos lodos se están confinando también gran cantidad de elementos esenciales para las plantas, por lo que el ciclo de los minerales se ve interrumpido. Esta acción de confinamiento va en contra de la naturaleza, debido a que por millones de años se ha llevado a cabo un proceso de reciclaje de minerales en el sistema plantas-animales-microorganismos-suelo (Jimenes, *et al*, 2002; Clevenger, *et al*, 1983).

En las plantas de tratamiento de aguas residuales se generan grandes volúmenes de lodos, que en caso de no darles una disposición final adecuada, contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas y de los suelos, afectando los ecosistemas del área donde se depositen. Se ha considerado que los lodos por sus características propias o adquiridas después de un proceso de estabilización pueden ser susceptibles de aprovechamiento siempre y cuando cumplan con los límites permisibles de contaminantes establecidos por la Norma Oficial Mexicana (Cuadro A3) o en su caso, se dispongan en forma definitiva como residuos no peligrosos, para atenuar sus efectos contaminantes para el medio ambiente y proteger a la población en general. El almacenaje de los lodos residuales o biosólidos se efectúa hasta su disposición final o su aprovechamiento como mejoradores o acondicionadores de suelos o en cualquier actividad que represente un beneficio por su contenido de materia orgánica y nutrimentos. Para ser aprovechados los lodos deben ser muestreados y analizados frecuentemente de acuerdo al parámetro a determinar (Cuadros A4y A5) según la NOM-004-SEMARNAT (2002). La cual sugiere técnicas para analizar los lodos residuales por instrumentos de flama (Cuadros A6, A7, A8 y A9).

La aplicación de lodos residuales reduce costos de fertilización, además de mejorar las propiedades químicas y físicas del suelo, por contener buena cantidad de nitrógeno, fósforo, materia orgánica y micronutrimentos esenciales en la nutrición vegetal que ayudan a incrementar el rendimiento de los cultivos

debido a que varios de estos micronutrientes no están disponibles en suelos alcalinos (Hue, *et al.*, 1998; Williamson, *et al.*, 2000).

En suelos de origen calcáreo y pH 7.3 a 8.5, la mayoría de los cultivos presentan problemas de clorosis, fenómeno que es provocado por la baja disponibilidad de algún micronutriente. Las clorosis más comunes son las de zinc y hierro. El 50-60 por ciento del territorio de México, posee características donde se manifiestan estos tipos de clorosis, debido a que los suelos son calcáreos, con un alto contenido de carbonatos y bicarbonatos solubles y pH elevado. Además, los suelos son deficientes en nitrógeno, fósforo y elementos menores (Lee, 1998).

La incorporación de lodos residuales procedentes del tratamiento de aguas residuales a los terrenos agrícolas es una práctica muy común en países desarrollados como Estados Unidos de América, Asia y Europa, por razones prácticas y económicas. Los lodos residuales tienen valor fertilizante y mejoran las propiedades físicas de los suelos, las dosis de aplicación suelen fijarse en función de los requerimientos del cultivo en nitrógeno y fósforo, la productividad del suelo aumenta a causa de la mineralización de la materia orgánica y la liberación de nutrientes. En una investigación sobre la aplicación de lodos residuales en un suelo arenoso arcilloso de pH 5 y aplicaciones de dosis de 5, 10, 20 y 40 Mg ha⁻¹ en los cultivos de cebada y maíz, se encontró que la producción fue mayor cuando más elevada fue la dosis de lodo añadida. Se apreciaron diferencias significativas en el pH y el contenido de materia orgánica, los cuales

aumentaron en el tratamiento de 40 Mg ha¹ en relación al testigo. La adición de los lodos no causó efecto en la concentración de metales pesados del suelo y cultivos aún en la dosis más alta (Quinteiro, *et al.*, 1998).

La utilización de los lodos residuales urbanos en agricultura ha experimentado un notable aumento en los últimos años como consecuencia del bajo costo de estos subproductos orgánicos y de la creación de plantas tratadoras de aguas residuales que tienen tratamiento secundario o terciario, las cuales producen gran cantidad de lodos residuales imposibles de confinar en su totalidad, la incineración de estos subproductos constituye una alternativa utilizable por algunos núcleos de población. La incineración de los lodos provoca una generación de cenizas desprovistas de sustancias orgánicas tóxicas y patógenos, las cuales contienen elementos fertilizantes como fósforo, potasio, calcio y metales pesados esenciales y no esenciales para las plantas y por ello susceptibles de ser utilizados en la incorporación de éstas cenizas a los suelos agrícolas. A nivel mundial se han desarrollado alternativas que permiten la utilización de estos lodos residuales generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, una de ellas es la incorporación en suelos agrícolas, evitando el costo de confinamiento o de incineración. Esta práctica representa la oportunidad de darle un valor agregado a éste residuo y bajo ciertas condiciones de manejo representa una alternativa en el tratamiento de residuos y aprovecharse como fertilizante y/o acondicionador de suelo. En México la utilización de lodos residuales ha sido restringida por las norma NOM-004-ECOL-2000 (Sopper, 1993; Coll'i, 2000).

Cuando se aplican lodos residuales al suelo, la descomposición del material orgánico es lenta, así como la liberación de los nutrimentos, por lo que se evitan pérdidas por lixiviación o precipitación, lo cual es una ventaja comparado con los fertilizantes químicos inorgánicos. En lodos residuales deshidratados, la disponibilidad del nitrógeno en el primer año es aproximadamente del 20 por ciento y el fósforo del 50 por ciento (UBA, 2000).

Las principales formas de aplicar los lodos residuales al suelo son líquido o deshidratado, el líquido posee altos contenidos de amonio disponible en un 60 por ciento el primer año, con buenos resultados en el rendimiento de los cultivos, el 40 por ciento restante se libera lentamente durante dos o tres años. En el lodo deshidratado, la materia orgánica se descompone más lentamente, liberando al nitrógeno en un 20 por ciento en el primer año y el restante en los cinco años posteriores (Bingham, *et al.*, 1996).

La aplicación de lodos residuales a los terrenos agrícolas incrementa los rendimientos igual o mayor que el incremento obtenido con la aplicación de fertilizantes químicos, pero la utilización de estos lodos esta condicionada por la cantidad de metales pesados que contienen. Los altos rendimientos de sorgo obtenidos con la aplicación de lodos residuales en suelos calcáreos de Nuevo México están asociados principalmente a la mineralización y liberación de nutrimentos procedentes de los lodos tales como nitrógeno, fósforo, zinc y hierro y la falta de potasio en los lodos no es un problema en este tipo de suelos, debido a que este elemento se encuentra en grandes cantidades en suelos de

reciente formación como son los del norte de la República Mexicana y sur de Estados Unidos (McCaslin y O'Connor, 1982).

Los lodos residuales se pueden aplicar en forma líquida (3 a 7 por ciento de sólidos), deshidratados en filtro prensa (20 por ciento de sólidos) o secados con aire caliente (50 a 90 por ciento de sólidos). Los lodos líquidos se pueden aplicar con camiones cisternas especialmente diseñados para tal propósito, los lodos deshidratados se pueden aplicar con estercoladoras comunes y los lodos secos se pueden aplicar con canoas de aplicación de materiales orgánicos como estiércol de gallina. Es importante la incorporación de los lodos residuales al suelo por medio de arado o rastra, debido a que si estos se dejan sobre la superficie pueden ser arrastrados cuando ocurren precipitaciones fuertes, lo que ocasiona una pérdida del lodo y una posible contaminación en áreas no preparadas para la aplicación (Cogger, 1993).

Los reportes de investigaciones donde se aplicaron lodos residuales, han mostrado un incremento considerable en los rendimientos de los cultivos comparado con el testigo y en la mayoría de los casos, los tratamientos con la aplicación de lodos residuales superaron al fertilizante químico. En la investigación efectuada por Martínez, (2003) donde aplicó lodo residual en forma deshidratada y líquida con dosis de 4 y 8 Mg ha⁻¹ en hortalizas y granos básicos, observó que en el primer ciclo agrícola el lodo residual líquido superó al lodo residual deshidratado, sin embargo, después del segundo ciclo agrícola los resultados se invirtieron a favor del deshidratado. Al evaluar los cultivos en

diferentes ciclos agrícolas sin aplicación posterior de lodo residual, pero aplicando en cada ciclo la dosis recomendada de fertilizante químico, se encontró que el efecto residual de la aplicación de lodo residual duró hasta cinco ciclos de cultivos, superando en algunos casos al tratamiento con fertilización química. En cuanto a la concentración de metales pesados en hojas, frutos y suelo se reportó que los niveles de cadmio, plomo, cobalto, molibdeno y níquel, están por debajo de los límites de tolerancia. Este último resultado se explicó debido a la naturaleza calcárea de los suelos, lo que les asegura un alto pH (8.0) y la precipitación de los metales pesados en el suelo. En general, se concluyó de estos estudios que la aplicación de lodo residual a terrenos calcáreos del Estado de Nuevo León, México pueden incrementar considerablemente los rendimientos de hortalizas y granos básicos, sin presentar un riesgo por acumulación de metales pesados en el tejido vegetal.

Los cultivos extraen del suelo distintas cantidades de nutrimentos esenciales y no esenciales, variando de una especie a otra, estas cantidades cambian las condiciones en que se desarrolla el cultivo. En el Cuadro 1, se muestran los rangos de concentración de nutrimentos y algunos metales en los cultivos de sorgo y maíz expresados en porcentaje y mg kg^{-1} ; en el Cuadro 2, se muestra el contenido promedio de algunos elementos traza en los cultivos en general, expresados en mg kg^{-1} y en el Cuadro 3, se muestra la concentración promedio de algunos metales en la superficie del suelo, expresados en porcentaje y mg kg^{-1} .

La aplicación de lodos residuales a los suelos agrícolas modifica la concentración de elementos esenciales y no esenciales en el tejido vegetal, por lo que es importante conocer las concentraciones normales de estos elementos en diferentes órganos de la planta y el cambio que sufre la concentración con la aplicación de lodo residual.

Cuadro 1. Rangos de concentración de nutrimentos y algunos metales en tejidos de sorgo y maíz (Reuter and Robinson, 1986).

Nutrimento	Deficiente	Marginal	Critico	Adecuado	Alto	Tóxico
% N	2.1			3.38		
% N-NO ₃	0.05			0.15		
% P			0.25	0.30	1>	
% P-PO ₄	0.05			0.1		
% K	2.0	2.6		3.64		
% Ca			0.4	0.5		
% Mg			0.25	0.4-0.8		
% Cl		0.2		0.34-0.53		
mg kg. ⁻¹ Cu			5	8-15		
mg kg. ⁻¹ Zn	24.7		20	20-60		
mg kg. ⁻¹ Mn				100	100-140	
mg kg. ⁻¹ Fe	24-56		50	60-160	178	
mg kg. ⁻¹ B	<0.1		5	50-70	>98	

Cuadro 2. Contenido promedio de elementos traza en los cultivos (Trace elements, 2000).

Elemento traza	mg kg ⁻¹	Elemento traza	mg kg ⁻¹
Al	80	F	2.0
As	0.1	Fe	150
Ba	40	Pb	1.0
B	40	Mn	200
Br	4.0	Hg	0.1
Cd	0.05	Mo	0.5
Cr	1.5	Ni	1.5
Co	0.2	Se	0.02
Cu	10	Zn	50

Cuadro 3. Concentraciones promedio de metales pesados en un suelo mineral (Buckman y Brady, 1985).

Nutrimiento	Porcentaje	mg kg ⁻¹	Análisis de un suelo superficial mg kg ⁻¹
Fe	0.5-5.0	5000-50 000	25 000
Mn	0.020-1.0	200-10 000	2 500
Zn	0.001-0.025	10-250	100
B	0.0005-0.015	5-150	50
Cu	0.0005-0.015	5-150	50
Mo	0.00002-0.0005	0.2-5	2

2.5. Otros usos de los lodos residuales

Los lodos residuales son utilizados para rehabilitar suelos muy degradados como los que se encuentran en áreas cercanas a minas. Son frecuentemente utilizados en bosques para mejorar las condiciones del suelo y elevar los niveles de nutrimentos en áreas erosionadas o como un sustrato inicial en reforestación de bosques. También son utilizados como base en la fabricación de compostas para uso en jardines públicos o privados y para la construcción en forma de ladrillos o adobes.

2.6. Aspectos legales sobre la aplicación de lodos residuales

En Canadá, Estados Unidos de América y en algunos países de Europa se han desarrollado técnicas de tratamiento de aguas residuales que permiten la utilización de residuos generados en las plantas para ser incorporados en suelos agrícolas, evitando así problemas de confinamiento. Esta práctica representa la oportunidad de darle un valor agregado a éste residuo y bajo ciertas condiciones de manejo representa una alternativa. En México la utilización de lodos residuales ha sido restringida por las Normas Oficiales Mexicanas que restringen el uso de lodos residuales que no cumplen con las especificaciones y límites máximos permisibles (Háguad, *et al.*, 2000).

En Estados Unidos de América la ley federal de lodos residuales está contenida en la US-EPA-40 CFR part 503, donde se especifica que para que los lodos residuales sean aplicados a los suelos agrícolas deben cumplir ciertos niveles de metales pesados, estándares específicos de patógenos, restricciones sobre sitios de aplicación, tipo de cultivos, proceso de tratamiento, épocas y frecuencias de aplicación (Cuadro A10).

En México existe la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 la cual es una regulación para el uso de lodos activados y menciona que deben ser tratados o sometidos a procesos que disminuyan la presencia de patógenos, además se establecen los parámetros que deben cumplir los lodos residuales que son utilizados en agricultura, cabe mencionar que en lo referente a contaminantes como arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc, los niveles que se enumeran son similares a la Norma US-EPA-503 (1996), que esta vigente en Estados Unidos de América, pero la Norma Oficial Mexicana es más estricta en el contenido de coliformes fecales, *Salmonella spp* y huevos de helmintos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

En los Cuadros 4, 5, y 6 se muestran las concentraciones máximas permitidas de los metales pesados contenidos en los diferentes tipos de lodos residuales de acuerdo con la Norma US-EPA 503. En el Cuadro 5, se muestran las especificaciones y límites máximos permisibles de metales pesados en los lodos residuales de la norma Mexicana 2002 (NOM-004-SEMARNAT-2002) y en el Cuadro 6, se muestran las especificaciones y límites máximos permisibles

de patógenos y parásitos en los lodos residuales de la norma Mexicana 2002 (NOM-004-SEMARNAT-2002).

2.7. Limitaciones en el uso de lodos residuales

Los lodos residuales pueden presentar obstáculos como: riesgo de contaminación bacteriana o parasitaria de las plantas, acción nociva para la vegetación por parte de ciertos productos contenidos en los lodos, renuencia por parte de los agricultores a emplear productos de tal origen y a menudo sin ninguna garantía de la composición constante (Gamrasni, 1985).

2.7.1. Olores desagradables

El olor en los lodos residuales es causado por compuestos de azufre o amonía y depende del tipo de tratamiento que se aplica en la planta tratadora de aguas residuales, así como del tipo y tiempo de confinamiento. Algunos lodos pueden tener solo un ligero olor a amonía, sin embargo, otros pueden tener un fuerte olor que puede molestar a algunas personas.

En 1997 la Norma 503 de la US-EPA fue revisada por el colegio de ciencias en agricultura del estado de Pennsylvania para la utilización de lodos residuales, en la cual incluyeron para su incorporación al suelo algunas regulaciones sobre aspectos técnicos sobre riesgos que pueden ocasionar a la salud humana y al ambiente. Las mencionadas regulaciones prohíben la

aplicación de lodos residuales de baja calidad química, que tengan riesgos en el manejo, que sobrepasen el límite potencial de contaminación, que el contenido de patógenos no pase los límites máximos permisibles, su transportación hasta el sitio de aplicación sea segura y adecuada, que en los sitios de aplicación no tengan influencia en las aguas subterráneas o superficiales y que no represente un riesgo para los animales y humanos. Sobre algunos aspectos están los siguientes: prohibición de la aplicación en áreas sensibles del ambiente; prohibición a la aplicación líquida a la superficie del suelo donde existan corrientes de agua o aguas enclaustradas. Cuando se requiera de los lodos residuales por parte de agricultores, éstos deben implementar un plan de conservación de suelos. Respetar una distancia de las casas habitación, pozos, ríos, arroyos y vertederos. Evitar el contacto entre los lodos y posibles vectores de enfermedades como mosquitos, moscas y roedores. Restricción en la aplicación del lodo residual por un tiempo específico durante la cosecha y una educación de los individuos responsables de los programas de aplicación de los lodos residuales (Stehouwer, 1999).

2.7.2. Patógenos

El mayor problema de la aplicación de lodos residuales a los terrenos agrícolas en países subdesarrollados es el alto contenido de patógenos. Los lodos residuales en México contienen bacterias, protozoarios y huevos de parásitos intestinales en mayores concentraciones que los lodos residuales generados en países desarrollados.

En México alrededor del 90 por ciento de los huevos de helmintos encontrados en los lodos residuales pertenecen al género *Ascaris*, el cual es uno de los más resistentes y capaz de sobrevivir en el ambiente por varios años (Jimenes, *et al.*, 2002).

2.7.3. Metales Pesados

Los metales pesados tienen una densidad igual o mayor de 5 g cm^{-3} cuando está en forma elemental o cuyo número atómico es superior a 20, su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1 por ciento, la mayoría pertenece a los elementos en transición en la tabla periódica y muchos de ellos son tóxicos para las plantas, animales y al hombre. Los elementos más contaminantes son el cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Mg), cromo (Cr), arsénico (As), zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), boro (B), molibdeno (Mo) y cobalto (Co). La toxicidad de un agente contaminante, no solo depende de si mismo, sino de las características del suelo donde se encuentre será decisiva. La sensibilidad de los suelos a la agresión de los agentes contaminantes va a ser muy distinta, dependiendo de una serie de características edáficas como el pH, textura, estructura, mineralogía de las arcillas, materia orgánica, capacidad de cambio iónico, condiciones redox, óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, carbonatos y salinidad (Dorronsoro, *et al.*, 2002; Tumer, 1973).

Los lodos residuales tienen concentraciones importantes de metales pesados, los cuales pudieran entrar a la cadena alimenticia a través de los productos agrícolas, como es el caso del Pb que se acumula en los organismos vivos, el Cd pasa a la cadena alimentaria humana y animal, el Hg es cancerígeno y se filtra contaminando la atmósfera, las plantas y la fauna marina. En países desarrollados se aplican lodos residuales a terrenos agrícolas con restricciones en cuanto a la cantidad y frecuencia de aplicación con la finalidad de evitar que se acumulen cantidades importantes en el suelo. Los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro vías: La primera es que pueden quedar retenidos en el suelo, disueltos en la solución del suelo o bien fijados por procesos de adsorción, formación de complejos y precipitación, la segunda es la absorción por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas, la tercera involucra la volatilización a la atmósfera y la cuarta es la movilidad hacia las aguas superficiales o subterráneas (Alloway, 1990).

Cuadro 4. Máximas concentraciones de metales pesados permitidas en diferentes tipos de lodos residuales y cantidad máxima permitida de metales pesados que se puede aplicar por año (Walker, *et al.*, 1994).

Elemento	Máxima concentración en cualquier tipo de lodo residual (mg kg^{-1})	Máxima concentración en lodo residual de Clase A y B (mg kg^{-1})	Máxima concentración en lodo residual de Clase C (mg kg^{-1})	Máxima cantidad de metales permitida anualmente (kg/ha/año)
Arsénico	75	41	41	2.0
Cadmio	85	39	39	1.9
Cromo	3000	1200	3000	150
Cobre	4300	1500	1500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	--	--	--
Níquel	420	420	420	21
Selenio	100	36	100	2.0
Zinc	7500	2800	2800	140

Cuadro 5. Límites máximos permisibles para metales pesados en lodos residuales de diferente calidad establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002).

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

Cuadro 6. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos que pueden contener los lodos residuales establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Clase	Patógenos		Parásitos
	Coliformes fecales (NMP/g base seca)	<i>Salmonella spp</i> (NMP/g base seca)	Huevos de helmintos/g (base seca)
A	< 1,000	< 3	< 10
B	< 2,000	< 300	< 35

2.8. Absorción de los metales pesados por las plantas

Las plantas pueden absorber y acumular los metales pesados en función de su concentración en el suelo, la toxicidad de un agente contaminante no solo depende de si mismo, sino de la sensibilidad de los suelos a la agresión de los agentes contaminantes y su concentración va a ser muy distinta dependiendo de la serie de características edáficas y en que forma se encuentren en el suelo. Bingham, *et al.* (1996) encontraron una mayor concentración de Cd en el tejido de las plantas a medida que se incrementó la concentración de este elemento en el suelo. También observaron que la acumulación del Cd en el tejido difiere entre las especies; encontraron una mayor concentración en alfalfa, zacate bermuda y festuca, comparados con el zacate sudan y trébol blanco.

La aplicación de lodos residuales a los suelos agrícolas ha experimentado un aumento, tanto que se quieren aplicar en todo tipo de suelo para comparar sus bondades, es el caso de la investigación realizada por Benitez, *et al.* (2000), efectuada en un suelo ácido y donde el objetivo del trabajo fue estudiar el efecto que causa la incorporación de altas dosis de lodo residual, la experimentación la efectuaron en incubación para comparar el efecto que ocasiona la aplicación de 100 Mg ha¹ en un suelo no calcáreo degradado y aplicando tres tipos de lodos urbanos: digeridos, composteados e incinerados, para establecer cual de estos tipos de lodos presentan mayor potencial de contaminación de Cd, Cu, Zn, Pb, Ni, Co y Cr en el medio edáfico.

Los resultados obtenidos dejaron patente que la aplicación de los lodos residuales aumentó los niveles totales y asimilables de Cu, Zn y Pb en el suelo, en cambio las concentraciones de Ni, Co y Cr se encontraron escasamente afectadas. Comparativamente los aumentos de Cu, Zn y Pb en el suelo inducidos por el aporte de estos subproductos decreció en el siguiente orden: lodos residuales digeridos > lodos residuales compostados > lodos residuales incinerados. Pese a los aumentos observados, los niveles alcanzados de Cu, Zn y Pb no constituían un riesgo de contaminación por metales pesados en el suelo.

El carácter acumulativo de cada elemento, se refiere a la acumulación de contaminantes en los organismos y el suelo, la concentración asimilable será más elevada para un suelo ácido que para uno neutro o alcalino, en suelos ácidos los metales son poco móviles en los suelos y tienden a acumularse en la parte superficial, en el horizonte biológicamente más activo, lo que hace que los metales estén fácilmente accesibles para los vegetales, el pH es un factor esencial, la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino, el pH es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos, en medios muy alcalinos, pueden nuevamente pasar a la solución como hidroxicomplejos. Por otra parte la materia orgánica reacciona con los metales formando complejos de cambio y quelatos, los metales una vez que forman quelatos o complejos migran con mayor facilidad a lo largo del

perfil, la materia orgánica puede adsorber tan fuertemente a algunos metales, como el Cu y pueden quedar en posición no disponible por las plantas, por eso algunas plantas cultivadas en suelos orgánicos, presentan carencia de ciertos elementos como el Cu, los quelatos de Pb y el Zn son solubles y muy estables. La complejación por la materia orgánica del suelo es una de los procesos que gobiernan la solubilidad y la bioasimilación de metales pesados (Dorronsoro, *et al.*, 2002).

El pH del suelo regula la solubilidad, adsorción e inmovilidad de los metales pesados y afecta la absorción por su influencia en el estado de asimilación o cantidades disponibles de los metales, porque pueden estar en las siguientes formas: bloqueo o inhibición, ocurre cuando el metal se transforma en inasimilable al pasar a un compuesto insoluble; como por ejemplo el hierro, manganeso o cobre, se precipitan en medio alcalino originando hidróxidos insolubles; además el pH influye en los microorganismos del suelo y su efecto se presenta en algunas reacciones de los elementos minerales que pueden quedar inhibidas o paralizadas y origina en pH alcalino una menor absorción de metales por las plantas; antagonismo, es cuando se inhibe la absorción de un metal pesado estando en concentraciones constantes, pero cuando un metal aumenta su concentración, queda disponible para ser absorbido (Kelling, *et al.*, 1977; Navarro, 2000).

En una investigación donde utilizaron lodos residuales obtenidos por digestión anaeróbica de la planta de tratamiento de aguas residuales de China, Madrid, España, de origen urbano y aplicados en un suelo degradado, en clima semiárido y con altas dosis de lodo residual, de 0 y 80 Mg ha⁻¹ en el cultivo de *Thymus zygis*, se observó un incremento de metales pesados sobretudo a nivel superficial de 0-15 cm del suelo, así como un aumento en el cultivo autóctono de *Thymus zygis*. Los resultados mostraron que las concentraciones fueron ligeramente superiores para Cd, Cu y Zn en las raíces y en Zn en la parte aérea con respecto a las plantas testigo, pero en ningún caso alcanzaron los límites considerados como tóxicos (Illera, *et al.*, 2001).

La aplicación de lodos residuales a suelos del noreste de México pudiera ser menos riesgosa en cuanto a la disponibilidad de metales pesados después de aplicaciones importantes al suelo, debido a que la naturaleza de los suelos es calcárea, lo que produce pH's altos de 7.6 a 8.3 en los cuales los metales pesados son muy insolubles. Sin embargo, es importante probar esta hipótesis en forma experimental con la finalidad de determinar la cantidad y frecuencia con que se pueden aplicar los lodos sin que las plantas acumulen cantidades riesgosas para la salud humana (Walker, *et al.*, 1994).

2.9. Análisis del tejido vegetal para la determinación de metales pesados

La técnica más frecuente para determinar los niveles nutricionales y posibilidad de toxicidad en las plantas es muestrear partes específicas de la planta en una etapa fenológica dada. En la mayoría de las especies se seleccionan las hojas que maduraron recientemente en la etapa del inicio de floración. Las muestras se lavaron con agua desionizada, se secaron a una temperatura de 65° C y se molieron en un molino de acero inoxidable. El análisis químico se realizó mediante una digestión del tejido vegetal para eliminar la materia orgánica y posteriormente, en la mayoría de los casos, se utiliza el espectrofotómetro de absorción atómica para determinar la concentración del metal pesado que se analiza (Rodríguez y Rodríguez, 2002).

3.0. Análisis secuencial para la determinación de metales pesados en el suelo

El suelo es el principal almacén de nutrimentos y todo tipo de sustancias, las cuales pueden ser tóxicas para las plantas o animales y el nivel de éstas, esta en relación con la concentración y la forma de absorción. Las cantidades totales de contaminantes presentes en los abonos orgánicos que se aplican al suelo, constituyen una medida poco representativa de la posible toxicidad de un elemento pesado y resulta fundamental conocer la forma química bajo la que se presenta, porque la toxicidad de un elemento contaminante es muy distinta dependiendo de su presentación. Los posibles efectos por la acumulación de metales pesados en el suelo donde se aplican los lodos residuales municipales depende de la forma en que se encuentren los metales en estudio, debido a que existen rangos de peligrosidad por la acumulación, las fases como se encuentran en el suelo pueden ser determinadas por el análisis secuencial. La técnica de extracción secuencial estima la cantidad y el porcentaje del metal, en las formas de intercambio, adsorbida, orgánica, carbonatos y residual; para cada una de las formas se utilizan diferentes sustancias extractoras como es el caso de KNO_3 , H_2O , NaOH , EDTA y HNO_3 respectivamente. Los metales solubles en la solución del suelo y los que son absorbidos fácilmente por la planta son los que pueden ser extraídos con KNO_3 y H_2O . En una investigación realizada por Sposito, *et al.* (1982) se aplicaron al suelo lodos residuales municipales en forma líquida y composteada durante 4 años y con dosis de 0, 22.5, 45 y 90 t ha¹ por año, para determinar el contenido total de

Ni, Cu, Zn, Cd y Pb y mediante un análisis secuencial se determinó el porcentaje de metales que podía ser absorbido fácilmente por las plantas. En este estudio encontraron que el contenido de metales pesados extraído con KNO_3 y H_2O era muy bajo, fluctuando entre 1.1 y 3.7 por ciento, concluyendo que no existía riesgo en la aplicación de los lodos residuales ni con la dosis más alta.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Ubicación geográfica del estado de Durango

El estado de Durango representa el 6.3 % de la superficie del país, con una superficie de 123,520 km² y colinda: al norte con Chihuahua y Coahuila, al Este con Coahuila y Zacatecas, al Sur con Zacatecas, Nayarit y Sinaloa, al Oeste con Sinaloa y Chihuahua.

3.2. Orografía

El estado de Durango se extiende de poniente a oriente desde la Sierra Madre Occidental, sobre la costa, hasta el centro de la meseta del norte, en su depresión conocida con el nombre de Bolsón de Mapimí. Se presenta la conformación del Estado por un conjunto de dos regiones geográficas distintas: la montaña de la Sierra y la plana de la Meseta.

La región presenta un escalón horizontal en su conjunto, a 1,900 m de altura media que penetra en el estado de Chihuahua, siendo la continuación de las elevadísimas llanuras zacatecanas, encontrándose con un plano inclinado que va de los bordes de esta zona a los desiertos del Bolsón de Mapimí que se encuentra a un poco más de 1,100 msnm.

Al noroeste de la ciudad de Durango, se encuentra una extensa región cubierta por numerosos conos volcánicos pequeños, llamados Malpais de la Breña.

El territorio del Estado es una región verdaderamente montañosa, la Sierra Madre Occidental con sus ramales y cofraestructuras, ocupa cerca de 60,000 km². Las cordilleras que se levantan en las otras zonas, ocupan más de la mitad de su territorio, por lo que las llanuras y lomeríos poco escarpados apenas llegan a la quinta parte de la extensión de la superficie del Estado.

3.3. Geografía

El estado de Durango ocupa el extremo norte de la zona interior de la República Mexicana; su división política la fundan 39 municipios, distribuidos en un territorio que está comprendido entre los paralelos correspondientes a los 22° 24' y 26° 50' de la latitud norte, y entre los meridianos 102° 25' 55" y 107° 8' 50" de longitud oeste con relación al meridiano de Greenwich.

3.4. Suelos dominantes

En el Cuadro 7 se muestran los suelos dominantes en el estado de Durango así como la subunidad, textura y el porcentaje en la superficie total.

Cuadro 7. Suelos dominantes en el estado de Durango y el porcentaje de la superficie (INEGI, 2001).

Clave	Nombre	Subunidad		Textura	% superficie
B	Cambisol	Crómico	c	Media	2.40
		Districo	d	Media	1.06
		Eutrico	e	Media	5.51
C	Chernozem	Cálcico	k	Media	0.95
E	Rendsina	Sódico	NA	Media	5.72
H	Feozem	Calcarico	c	Media	0.30
		Háplico	h	Media, Fina	9.50
		Lúvico	l	Media	2.12
I	Litosol	Sódico	NA	Gruesa, Media.	28.60
K	Castañozem	Cálcico	k	Media	0.34
		Lúvico	l	Media	2.84
L	Luvisol	Crómico	c	Media	0.26
R	Regosol	Calcárico	c	Media	2.39
		Éutrico	e	Media	19.62
S	Solonetz	Órtico	o	Fina	0.27
V	Vertisol	Crómico	c	Fina	1.98
		Pélico	p	Fina	0.54
W	Planisol	Éutrico	e	Media	0.20
		Háplico	h	Media	1.18
X	Xerosol	Cálcico	k	Media	7.56
		Lúvico	l	Media, Fina	5.75
Y	Yermosol	Lúvico	l	Fina	0.37
Z	Solonchak	Órtico	o	Media	0.54

3.5. Hidrología

El sistema hidrológico de Durango forma parte de tres vertientes. Vertiente del pacífico: comprende las cuencas superiores de importantes ríos de los estados de Sinaloa y Nayarit, que desembocan en el Océano Pacífico. En el estado de Durango se les denomina con otros nombres y se les encuentra formados por diversos sistemas de quebradas: Huyuapan, de los Remedios, Elota, Piaxtla, La Ventana, Espíritu Santo, San Diego, Mezquital y Jesús María. Vertiente interior: En las cuencas cerradas o bolsones vierten sus aguas los ríos Cerro Gordo, Yermo, de la Cadena, Nazas y Santiaguillo. El más importante es el Nazas, donde se ubica la Presa del Palmito, que vierte sus aguas después de que se le une al Río Aguanaval, en la rica región agrícola de la Comarca Lagunera en la zona del Bolsón de Mapimí. A la vertiente del golfo, pertenecen los nacimientos de los ríos: Florido y San Juan que pasan a Chihuahua para formar el Río Conchos afluentes del Río Bravo. Adicionalmente, en el Estado existen una serie de presas con fines de riego y control de avenidas. Entre las más importantes están: Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco sobre el Río Nazas, y la San Gabriel sobre el Río Florido (INEGI, 1994).

3.6. Origen de las descargas de la ciudad de Durango

El origen es del tipo doméstico, aunque existen algunas de tipo químico o industrial para lo cual la planta tratadora de aguas residuales no fue diseñada porque no tiene capacidad para remover metales pesados, detergentes, grasas ni aceites. La industria que existe en Durango no genera descargas importantes, sin embargo los desechos que producen clínicas, laboratorios, talleres, industria, lavado de automóviles, escuelas, restaurantes, maquiladoras, generan contaminantes que deben tratarse antes de arrojarse al drenaje (Cuadros A11 y A12). La planta de tratamiento de aguas residuales fue diseñada para tratar un volumen de 2,000 lps. Actualmente se procesa un promedio de 1,500 lps cantidad que llega por los siguientes colectores: colector Canelas, que recibe un caudal de la zona centro y sur de la ciudad y conduce desechos de tipo doméstico, talleres, lavado de automóviles, escuelas, hospitales y restaurantes; colector 5 sur, conduce aguas residuales del sur de la ciudad, los desechos son de escuelas, talleres y restaurantes; colector San Gabriel, se localiza en la zona noroeste y conduce desechos de casa habitación, escuelas y una fabrica de triplay; colector Ferrocarril, conduce aguas de la zona norte, los desechos son de casa habitación, escuelas talleres y hospitales; colector 20 de Noviembre, conduce aguas residuales de la zona noreste de casa habitación, talleres, escuelas, laboratorios, lavado de automóviles e industriales. En este colector se encuentra la empresa de celulosa y papel que genera descargas altamente contaminantes por su elevada concentración de DBO, DBQ y celulosa.

La planta tratadora de aguas residuales tiene una eficiencia en el tratamiento del 80% (Cuadro A13) y se clasifica como facultativa, porque sus procesos de tratamiento son biológicos y los organismos responsables de la estabilización de materia orgánica y compuestos suspendidos funcionan en presencia de oxígeno.

El proceso de purificación se inicia eliminando los sólidos gruesos y material voluminoso en el desarenador, después se conduce a un cárcamo de bombeo donde el agua se eleva 15 m para verterla a las primeras lagunas. Este proceso se realiza en 6 lagunas a las que se les proporciona diferentes volúmenes de aire, donde se procesan 100,000 m³ de agua por cada laguna (Cuadros A14 y A15). Después sigue el proceso de aireación, que consiste en inyectar aire comprimido que producen los compresores centrífugos a través de una línea de difusores que se encuentran instalados en el fondo de las lagunas. Después de este proceso, el agua tratada se conduce al sistema de cloración para su desinfección, que se efectúa en una séptima laguna, donde se deposita como último lugar de almacenamiento con el objetivo de sedimentarla y pulimentarla para utilizarla en el riego de cultivos forrajeros.

3.7. Localización del área

En el presente trabajo de investigación se realizaron cuatro experimentos, de los cuales los experimentos 1 y 3 se llevaron a cabo en el ciclo agrícola primavera-verano 2001 y primavera-verano 2002 respectivamente, en el área de experimentación del Instituto Tecnológico Agropecuario No. 1, situado en la región agrícola entre los paralelos 24° de latitud norte y 104° de longitud oeste, ubicado en el kilómetro 22.5 de la carretera Durango-México, a una altura aproximada de 1899 msnm, con una temperatura media anual de 17°C y precipitación media anual de 412 mm (García, 1976).

Los experimentos 3 y 4, se llevaron a cabo en condiciones controladas en los ciclos agrícolas primavera-verano 2001 y primavera-verano 2002 respectivamente, en el Centro Interdisciplinario e Investigación y Desarrollo Integral Regional, situado entre los paralelos 24° de latitud norte y 104° de longitud oeste, ubicado en la avenida sigma sin número, fraccionamiento 20 de noviembre II, Durango, Dgo. a una altura aproximada de 1899 msnm, con una temperatura media anual de 17°C y precipitación media anual de 412 mm (García, 1976).

3.8. Experimento 1

3.8.1. Primera localidad y primer ciclo agrícola

Los lodos que se aplicaron en el área experimental del Instituto Tecnológico Agropecuario de Durango, fueron extraídos de la planta tratadora de aguas residuales municipales de la ciudad de Durango, Dgo., los cuales se obtuvieron con un muestreador de caja y plomada de acero inoxidable con capacidad de 1 litro, se llevaron a cabo 8 muestreos por cada laguna, dando un total de 48 muestras y luego se mezclaron para obtener 6 muestras compuestas que se analizaron en los laboratorios de suelos del Instituto Tecnológico Agropecuario de Durango, laboratorio de suelos del Centro Interdisciplinario e Investigación y Desarrollo Integral Regional y en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL.

3.8.2. Objetivos

Los objetivos de este experimento fueron: Determinación de las características de los lodos residuales al momento de tomar las muestras; producción de forraje en base seca y la concentración de metales pesados en la parte aérea (tallos, hojas y panículas) y en la raíz del cultivo de sorgo forrajero.

3.8.3. Tratamientos y diseño experimental

El diseño experimental empleado fue el de bloques completos al azar con 5 tratamientos (Cuadro 8) y 5 repeticiones. El tamaño de la unidad experimental fue de 38.4 m² con 6 surcos de 4.8 x 8 m, la distancia entre surcos fue de 0.8 m, dando un área total de 960 m². El cultivo indicador fue sorgo forrajero (*Sorghum vulgare Pers*) de la variedad silo sugar. La evaluación se efectuó en

los surcos centrales de cada parcela y como muestra útil se tomaron 4 plantas con competencia completa por cada unidad experimental, evitando plantas fuera de tipo. Las muestras se evaluaron cuando el grano se encontró en estado masoso lechoso.

Cuadro 8. Tratamientos evaluados en el experimento 1.

Tratamiento	
T 1	Testigo (sin aplicación)
T 2	Lodo residual, 4 Mg ha ⁻¹
T 3	Lodo residual, 8 Mg ha ⁻¹
T 4	Estiércol bovino 4 Mg ha ⁻¹
T 5	Fertilizante químico (120-60-00)

3.8.4. Desarrollo del Experimento

Los lodos se aplicaron a la superficie del suelo en forma semi sólida el día 22 de marzo del 2001 y luego se incorporaron con la misma tierra. La preparación del terreno fue: barbecho, rastra, trazo de surcos y siembra. La siembra se realizó a mano a chorrillo el día 24 de abril del 2001, con una densidad de 20 kg ha⁻¹ utilizando la variedad Silo Sugar de sorgo forrajero. Los trabajos de deshierbe se efectuaron con azadón, se aplicaron 5 riegos de auxilio, el primer riego se realizó los días 26 y 27 de abril, el segundo riego fue los días 8 y 9 de mayo, el tercer riego fue los días 28 y 29 de mayo, el cuarto riego fue los días 14 y 15 de junio y el quinto riego fue los días 29 y 30 de junio, en los meses de julio y agosto no fue necesario aplicar riegos, ya que se presentaron precipitaciones necesarias para el desarrollo y finalización del

cultivo, la fertilización química que se utilizó solo para el tratamiento número 5 fue con la fórmula 120 – 60 – 00. La fuente de fertilizante inorgánico fue sulfato de amonio (20.5 % N) y superfosfato triple de calcio (46 % P_2O_5), aplicando la totalidad del fósforo y la mitad del nitrógeno al momento de la siembra y la otra mitad se aplicó el día 8 de julio. La cosecha se efectuó los días 2, 3 y 4 de septiembre del 2001

Se analizó el suelo antes de la siembra a una profundidad de 0-30 cm, tomando una muestra compuesta de cada unidad experimental (Cuadro 10) además se caracterizaron los lodos residuales al momento de la toma de muestras (Cuadro 11) y se analizó el cultivo para determinar el contenido de metales pesados en la parte aérea (tallos, hojas y panículas) y en la raíz por medio de absorción atómica con la técnica descrita por Rodríguez y Rodríguez (2002).

3.8.5. Variables evaluadas y análisis estadísticos

Las variables que se evaluaron fueron: Las características químicas y físicas del suelo antes del experimento; características químicas y físicas del lodo residual utilizado, concentración de metales pesados presentes en el lodo residual y la producción de materia seca

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza, con ajuste de vecindad cercana y contrastes ortogonales para comparar los efectos de los tratamientos (Olivares, 1994). Los contrastes fueron diseñados para hacer las siguientes comparaciones entre los tratamientos.

En el contraste 1, se compara el testigo con los demás tratamientos.

En el contraste 2, se comparan los lodos contra el estiércol bovino y fertilizante químico.

En el contraste 3, se comparan las 2 dosis de lodos.

En el contraste 4, se compara el estiércol bovino contra el fertilizante químico.

3.9. Experimento 2

3.9.1. Segunda localidad y primer ciclo agrícola

Esta primera fase de la segunda localidad se llevó a cabo en el ciclo agrícola Primavera-Verano 2001, en el Centro Interdisciplinario y de Investigación para el Desarrollo Integral de la Región (CIIDIR - IPN - Unidad Durango) bajo condiciones de invernadero en Durango, Dgo.

El suelo que se utilizó fue el mismo que el del anterior experimento y su clasificación es: Solonetz gléico (INEGI, 1992) que tiene las características de: textura arcillosa, bajo contenido de materia orgánica (1.14%), baja infiltración (4cm/h), ricos en carbonatos de calcio y pH alcalino (8.6); el cultivo indicador fue sorgo forrajero, que se sembró en contenedores de polietileno de 40X20 cm, con un volumen de 20 kg.

La caracterización del suelo con el que se llevó a cabo el experimento y los lodos residuales utilizados, se efectuaron antes de la siembra, los cuales se presentan en los cuadros 10 y 11. Los lodos provenían de la planta tratadora de aguas residuales de la Ciudad de Durango, los cuales fueron caracterizados en los Laboratorios de suelos del Instituto Tecnológico Agropecuario de Durango, Laboratorio de Suelos del Centro Interdisciplinario e Investigación para el Desarrollo Integral Regional IPN Unidad Durango y en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, antes de su incorporación a los contenedores.

3.9.2. Objetivos

Los objetivos de éste segundo experimento fueron: Evaluar el efecto de la aplicación de los lodos residuales sobre la producción de forraje en base seca y estimar la concentración de metales pesados en el tejido vegetal de la parte aérea y en la raíz.

3.9.3. Tratamientos y diseño experimental

El diseño experimental empleado fue de bloques completos al azar con 5 tratamientos (Cuadro 9) y 5 repeticiones la unidad experimental fue un contenedor de polietileno. Se utilizó el método de Tukey para la comparación de medias y el análisis estadístico empleado fue el paquete computacional diseñado por Olivares (1994).

Cuadro 9. Tratamientos evaluados en el experimento 2.

Tratamiento	
T 1	Testigo (sin aplicación)
T 2	Lodo residual, 4 Mg ha ⁻¹
T 3	Lodo residual, 8 Mg ha ⁻¹
T 4	Estiércol bovino 4 Mg ha ⁻¹
T 5	Fertilizante químico (120-60-00)

Las fuentes de fertilizante químico fueron: Sulfato de amonio (20.5 % N) y Superfosfato de calcio triple (46 % P_2O_5), aplicando la totalidad del fósforo y la mitad del nitrógeno al momento de la siembra, la otra mitad se aplicó el día 14 de julio.

3.9.4. Variables evaluadas

Las variables evaluadas fueron: la producción de forraje en base seca y la concentración de metales pesados en la parte aérea y en la raíz de la planta.

3.9.5. Desarrollo del experimento

La siembra se realizó en forma manual el 28 de Abril del 2001, en cada contenedor de polietileno se sembraron tres semillas y a los 15 días se aclaró dejando una planta por contenedor, la separación de un contenedor a otro fue de 40 cm para evitar la cercanía de cada uno, durante ésta etapa los contenedores se estuvieron rotando, para evitar que las plantas estuvieran en una sola dirección.

El cultivo indicador fue sorgo forrajero variedad Silo Sugar y se aplicaron riegos ligeros a cada tratamiento cada cuatro días.

Los lodos se mezclaron con el suelo un mes antes de la siembra en forma semisólida.

Las muestras de planta para su análisis se colectaron cuando el grano de sorgo se encontraba en estado lechoso masoso, se tomaron muestras tanto en la parte aérea (tallos, hojas y panículas) como de la raíz y su análisis se realizó en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Los metales pesados en el lodo residual y en la planta (parte aérea y raíz) se efectuaron por medio de espectroscopia de absorción atómica mediante la técnica descrita por Rodríguez y Rodríguez (2002).

3.10. Experimento 3

3.10.1. Primera localidad y segundo ciclo agrícola

El experimento 3 se realizó en el área experimental del Instituto Tecnológico Agropecuario de Durango, ésta investigación pertenece a la primera localidad y segundo ciclo agrícola y se efectuó en la misma parcela que el anterior ciclo agrícola (experimento 1).

3.10.2. Objetivos

El objetivo de éste experimento fue: Evaluar el efecto residual de la aplicación de lodos residuales en la productividad del sorgo forrajero en base seca.

3.10.3. Diseño experimental

El diseño utilizado fue de bloques completos al azar con 5 tratamientos y 5 repeticiones con un análisis de varianza ajustado por vecindad cercana y las medias fueron comparadas por contrastes ortogonales (Olivares, 1994).

Las hipótesis estudiadas por medio de los contrastes ortogonales fueron las siguientes:

Ho: T1 vs T2+T3+T4+T5

Ho: T2+T3 vs T4+T5

Ho: T2 vs T3

Ho: T4 vs T5

En el contraste 1, se compara el testigo con los demás tratamientos.

En el contraste 2, se compara los lodos contra el estiércol bovino y fertilizante químico.

En el contraste 3, se compara las 2 dosis de lodos.

En el contraste 4, se compara el estiércol bovino contra el fertilizante químico.

3.10.4. Tratamientos evaluados

Debido a que se evaluó la residualidad de los tratamientos del primer experimento, se sembró en la misma parcela, por lo tanto, no se aplicó ningún tipo de abono ni fertilizante al inicio del segundo ciclo.

3.10.5. Variables evaluadas

Las variables a evaluar fueron: Producción de forraje en base seca y concentración de metales pesados en la parte aérea y raíz en el cultivo de sorgo forrajero.

3.10.6. Desarrollo del experimento

El experimento 3 se llevó a cabo en la misma área que el experimento número uno, los análisis de suelo y de los lodos residuales son los mismos que en el primer ciclo, los cuales se muestran en los Cuadros 10 y 11. La unidad experimental consistió en 6 surcos de 4.8 m x 8 m y la distancia entre surcos fue de 0.8 m, el tamaño de la unidad experimental fue de 38.4 m², la superficie total del experimento fue de 960 m², la evaluación se realizó en los dos surcos centrales de cada unidad experimental y como muestra útil se tomaron 4 plantas con competencia completa, evitando plantas fuera de tipo. A la parcela experimental no se le hizo ninguna aplicación, ya que se quería evaluar el efecto residual de los tratamientos para comparar los rendimientos y concentración de metales pesados en el cultivo. Solo se trabajó manualmente para reparar los surcos, la siembra fue en forma manual el día 18 de Abril del 2002, se aplicaron 5 riegos de auxilio, el primero fue el día 19 de Abril, con la finalidad de tener humedad para la emergencia de las plantas, el segundo riego se efectuó los días 3 y 4 de mayo, el tercer riego fue los días 25 y 26 de mayo, el cuarto riego fue los días 11 y 12 de junio y el quinto riego fue los días 29 y 30

de junio, no hubo necesidad de aplicar riegos en julio y agosto, debido a que se presentaron precipitaciones suficientes para el desarrollo del cultivo, la cosecha se realizó los días 4, 5, 6 y 7 de septiembre del 2002, cuando el grano presentó las características de lechoso masoso.

3.11. Experimento 4

3.11.1. Segunda localidad y segundo ciclo agrícola

Esta cuarta fase de la investigación se realizó en el segundo ciclo agrícola y en la segunda localidad en el Centro Interdisciplinario y de Investigación para el Desarrollo Integral de la Región, (CIIDIR - IPN - Unidad Durango) bajo condiciones de invernadero. El suelo que se utilizó fue el mismo que en el primer ciclo agrícola, con la finalidad de evaluar la residualidad de los abonos orgánicos e inorgánicos, los contenedores de polietileno utilizados en el primer ciclo agrícola fueron los mismos que se utilizaron para el segundo ciclo agrícola, realizando la siembra el día 20 de abril del 2002, se sembraron tres semillas por cada contenedor y se desahijaron 15 días después de germinadas las plántulas para dejar solo una planta por contenedor, se estuvieron moviendo los contenedores de polietileno para que no hubiera interferencia entre los tratamientos. Los riegos fueron ligeros y se efectuaron cada cuatro días.

3.11.2. Objetivos

Los objetivos de este cuarto experimento fueron: evaluar el efecto residual de los lodos en la productividad de sorgo forrajero en base seca y la concentración de metales pesados en el tejido vegetal y en el suelo.

3.11.3. Diseño experimental

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con 5 tratamientos y 5 repeticiones, utilizando el método de Tukey para comparación de medias (Olivares, 1994).

3.11.4. Tratamientos evaluados

Debido a que se evaluó la residualidad de los tratamientos del segundo experimento, se sembró en los mismos contenedores de polietileno, por lo tanto, no se aplicaron abonos orgánicos ni fertilizante inorgánico a ningún contenedor.

3.11.5. Variables evaluadas

Evaluación de las propiedades físicas y químicas del suelo.

Concentración y porcentajes de los metales pesados de Cd, Pb, Cu, Zn y Mn en el suelo por medio de un análisis secuencial.

Concentración promedio de elementos absorbidos por la parte aérea de Cd, Pb, Cu, Ni, Fe, Mg, K, Zn y Mn.

Concentración promedio de elementos absorbidos por la raíz de Cd, Pb, Cu, Ni, Fe, Mg, K, Zn y Mn.

Producción de materia seca.

3.11.6. Desarrollo del experimento

Los tratamientos (cuadro 9) se aplicaron en abril de 2001 (experimento 2) y se sembró sorgo forrajero el 28 de abril de 2001. Las fuentes de fertilizante químico fueron: Sulfato de amonio (20.5 % N) y Superfosfato de calcio triple (46 % P_2O_5), aplicando la totalidad del fósforo y la mitad del nitrógeno al momento de la siembra, la otra mitad se aplicó el 14 de julio del 2001. Los lodos se mezclaron con el suelo un mes antes de la siembra en forma semisólida.

En el año 2002 se sembró el día 20 de abril y se cosechó los días 8, 9 y 10 de septiembre y no se aplicaron tratamientos con la finalidad de evaluar el efecto residual de los materiales aplicados en el 2001.

Se realizó el análisis de suelo para cada tratamiento al finalizar la investigación, utilizando una muestra compuesta por tratamiento. Las determinaciones físicas y químicas se realizaron en el Instituto Tecnológico Agropecuario de Durango para realizar los análisis físicos y químicos.

Utilizando la misma muestra compuesta de cada tratamiento, se realizó un análisis secuencial en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL.

Para el análisis secuencial de los metales pesados se realizó el siguiente protocolo: fase soluble, se utiliza un extractor que rompe los enlaces entre el metal y los óxidos de hierro cristalizados sin dañar los enlaces con la materia orgánica y los silicatos, se adiciona H₂O deionizada como solución extractora; fase intercambiable, es donde el metal interacciona con la superficie de los sólidos, como minerales arcillosos y óxidos cristalizados por atracción o repulsión electrostática, la adición de KNO₃ como solución extractora, el cual hace que el catión K⁺ reemplace los cationes metálicos; fase orgánica, en ésta los metales adsorbidos sobre la materia orgánica como especies intercambiables son desplazados mediante un agente oxidante que libera los metales unidos a la materia orgánica, se le adiciona NaOH como solución extractora; fase carbonatos, la elevada cantidad de carbonatos genera una alta capacidad tamponadora del suelo, por lo tanto existe mayor retención de metales pesados por el suelo, se adiciona EDTA como solución extractora; fase residual, es la fracción del metal fuertemente adsorbido dentro de la estructura de los minerales silicatados, se le adiciona HNO₃ como solución extractora y después de obtener las disoluciones de metales de las distintas fases se procede a su lectura por espectrofotómetro de absorción atómica (Rodríguez, 2003).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Experimento 1

Las características físicas y químicas del suelo en donde se llevaron a cabo los cuatro experimentos se presentan en el Cuadro 10. En cuanto al pH del suelo se determinó en 8.6 lo cual se clasifica como alcalino por lo que se espera que los metales pesados que contienen los lodos residuales pasen a formas no solubles, dejándolos fuera de la solución del suelo y limitando su disponibilidad para ser absorbidos por las raíces de las plantas (Dorransoro, *et al.*, 2002). Esta característica de los suelos de Durango es muy conveniente para la aplicación de lodos residuales, debido a que se puede obtener la ventaja de la aplicación de estos materiales sin el riesgo de contaminar severamente los suelos con metales pesados.

Los análisis de suelo también mostraron que los porcentajes de nitrógeno y materia orgánica son considerados como pobres. Este resultado era previsible debido a las características semiáridas de la región, lo que no permite que se acumulen grandes cantidades de materia orgánica debido a la escasa precipitación. Esta pobreza del suelo en cuanto a nitrógeno y materia orgánica justifica la aplicación de materiales orgánicos con relaciones C/N bajas, por lo que la aplicación de lodos residuales mejora los niveles de nitrógeno en la solución del suelo al descomponerse lentamente este material orgánico.

Cuadro 10. Características físicas y químicas del suelo utilizado en los cuatro experimentos, procedente del área experimental del Instituto Tecnológico Agropecuario de Durango, Dgo.

Tipo de textura	Arcillosa
Arena	30.509%
Arcilla	42.211 %
Limo	27.28 %
pH	8.61 (1:2 agua)
Densidad aparente	1.04 g cm ⁻³
FERTILIDAD	
Nitrógeno total (con ácido amónico)	0.06 %
Fósforo	7.84 mg kg ⁻¹
Potasio intercambiable	870 mg kg ⁻¹
Materia Orgánica	1.14 %
Sodio intercambiable	33.5 mg kg ⁻¹
Calcio intercambiable	6200 mg kg ⁻¹
Magnesio intercambiable	420 mg kg ⁻¹
Conductividad eléctrica	1.138 dSm ⁻¹
CATIONES	ANIONES
Ca ²⁺ = 1.25 meq L ⁻¹	CO ₃ ⁼ = 0
Mg ²⁺ = 4 meq L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ = 9.25 meq L ⁻¹
Na ⁺ = 6 meq L ⁻¹	Cl ⁻ = 2.5 meq L ⁻¹
Laboratorio de Suelos del ITAD	

La textura de los suelos de la región en donde se llevó a cabo la investigación es principalmente arcillosa, lo que ocasiona que el suelo sea difícil de trabajar y el agua sea fuertemente retenida por las partículas del suelo. Estas características del suelo pueden subsanarse con la adición de materiales orgánicos, ya que se mejora la estructura, la infiltración del agua y la aireación,

por lo que esta característica del suelo también justifica la aplicación de lodos residuales.

En el Cuadro 11 se muestran los resultados de los análisis físico-químicos de los lodos residuales al momento de la toma de muestras de la planta tratadora de aguas residuales de la ciudad de Durango (Febrero 2001).

Cuadro 11. Características físicas y químicas del lodo residual al momento de la toma de muestras.

Tipo de textura	Migajón arenoso
Arena	63.48 %
Arcilla	1.8 %
Limo	34.72 %
pH	7.05 (1:2 agua)
Densidad aparente	0.996 g cm ⁻³
FERTILIDAD	
Nitrógeno total	1.14 %
Fósforo	286 mg kg ⁻¹
Potasio intercambiable	460 mg kg ⁻¹
Materia Orgánica	17.85 %
Sodio intercambiable	315 mg kg ⁻¹
Conductividad eléctrica	3.08 dSm ⁻¹
CATIONES	ANIONES
Ca ²⁺ = 18 meq L ⁻¹	CO ₃ ²⁻ = 0
Mg ²⁺ = 0 meq L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ = 18.7 meq L ⁻¹
Na ⁺ = 13.7 meq L ⁻¹	Cl ⁻ = 7.63 meq L ⁻¹

Laboratorio de suelos del ITAD

Los lodos residuales presentaron algunas características deseables para ser incorporados al suelo, el alto contenido de arena puede mejorar las características físicas del suelo arcilloso; el pH es neutro, lo que indica que los contenidos de nutrimentos estén disponibles para las plantas; el porcentaje de nitrógeno y materia orgánica mejora la fertilidad del suelo y pueden mejorar algunas características físicas como la estructura e infiltración del suelo; los bicarbonatos contenidos hacen que la precipitación de metales pesados sea más activa.

En el Cuadro 12 se muestran las concentraciones adecuadas y limitantes de los metales pesados según la Norma US-EPA parte 503 (1996), límite de la concentración de metales pesados permisibles en los lodos residuales de buena calidad de acuerdo a la norma Mexicana, NOM-004-SEMARNAT (2002) y los análisis de la concentración de metales pesados contenida en los lodos utilizados en esta investigación, los cuales se realizaron en el laboratorio de suelos del CIIDIR-IPN Unidad Durango.

Cuadro 12. Concentraciones adecuadas y limitantes de los metales pesados según la Norma US-EPA parte 503 (1996), límite de la concentración de metales pesados permisibles en los lodos residuales de buena calidad de acuerdo a la norma Mexicana, NOM-004-SEMARNAT (2002) y concentración de metales pesados contenida en los lodos utilizados en esta investigación.

Metal	Limite de la Concentración. (EPA 1996)		Limite de la concentración (NOM-004-SEMARNAT, 2002).	Concentración de los lodos de Durango
	Calidad estándar mg kg ⁻¹	Limite de la concentración mg kg ⁻¹	Limite máximo permisible en un lodo residual de buena calidad en mg kg ⁻¹	Análisis por CIIDIR-IPN-Unidad Durango. mg kg ⁻¹
As	41	75	75	1.19
Cd	39	85	85	3.65
Cu	1500	4300	4300	141.6
Pb	300	840	840	149
Hg	17	57	57	13.53
Mo	--	75	--	N.D.
Ni	420	420	420	N.D.
Se	100	100	--	N.D.
Zn	2800	7500	7500	1360
Cr	1200	3000	3000	73.6
Mn				178.8
Fe				1843

Fuente: EPA 1996.

Fuente: CIIDIR-Dgo

Los resultados del análisis de los lodos residuales mostraron que los metales Mo, Ni y Se no fueron detectados, lo que indica una baja concentración de estos elementos en los lodos residuales, por lo tanto la aplicación al suelo de estos metales no presenta riesgo de contaminación.

Las concentraciones más elevadas de metales pesados en los lodos residuales estudiados fueron para el Pb, el cual tiene una concentración de 17.7% en comparación con el límite permisible por las Normas US- EPA-503 (1996) y la norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT (2002), otro metal con un nivel relativamente más alto que los otros metales pesados fue el Hg con un 23.7%, lo que indica que para posteriores investigaciones o aplicaciones frecuentes y en altas dosis, se tenga cuidado con éstos metales para no tener una posible contaminación del suelo o cultivo. En el estado de Pennsylvania, EUA se estudió la concentración de metales pesados en diferentes tipos de lodos residuales, encontrando resultados semejantes a los obtenidos en el presente estudio, sin embargo, ellos detectaron al Cu como el elemento que pudiera llegar al límite permisible antes que otros metales pesados (Stehouwer, 1999).

En cuanto a los elementos de As, Cd, Cu, Zn, Cr, Mn y Zn, no son considerados por su concentración como peligrosos para poder contaminar el ambiente.

Los análisis de los lodos que se utilizaron en este experimento, muestran que las concentraciones de metales pesados se encuentran por debajo de lo permitido y aún lo adecuado para ser aplicados a suelos agrícolas.

En los Cuadros A16 y A17 se muestran los tratamientos el análisis de varianza por contrastes ortogonales y la distribución de los coeficientes de la primera localidad y para el primer y segundo ciclo agrícola 2001 y 2002 (experimentos 1 y 3).

En el análisis de contrastes ortogonales se encontró que el contraste 1 fue significativo ($p=0.018$), por lo que el testigo fue diferente en rendimiento de sorgo forrajero en base seca a los otros tratamientos. En el Cuadro 13 se observa que el promedio de rendimiento del testigo fue menor que en los otros tratamientos, evidenciando una respuesta a aplicaciones de nutrimentos y una baja fertilidad del suelo. Además, las medias de los tratamientos con lodo residual fueron mayores que las de fertilizante químico y estiércol, aunque la diferencia no fue significativa, sin embargo, se puede concluir que la aplicación de lodos residuales puede sustituir a la aplicación de fertilizante químico. El efecto de la aplicación de lodos residuales sobre el rendimiento de los forrajes ha sido documentado en otros trabajos. Por ejemplo, en Colorado se reportó un incremento en el rendimiento y calidad de forraje en especies de pastos nativos (Pierce, *et al* , 1998).

En el Cuadro 13 se muestran los promedios de los tratamientos evaluados ajustados por el método de vecindad cercana, en donde se observa que el testigo tuvo rendimientos más bajos que los otros tratamientos.

Cuadro 13. Comparación de medias entre los tratamientos, ajustados por el método de vecindad cercana (experimento 1).

Tratamientos	Media (gramos por planta)
2.- Lodo 4 Mg ha ⁻¹	164.28 a
3.- Lodo 8 Mg ha ⁻¹	158.95 a
5.- Fertilizante químico	151.76 a
4.- Estiércol bovino 4 Mg ha ⁻¹	146.01 a
1.- Testigo	108.28 b

4.2. Experimento 2

En el Cuadro 14 se muestran los contenidos promedio de los metales pesados en el tejido vegetal de la parte aérea (tallos, hojas y paniculas) en el cultivo de sorgo forrajero en base seca para cada uno de los tratamientos, los cuales se analizaron por absorción atómica en el laboratorio de suelos, plantas y agua de la Facultad de Agronomía de la UANL, en donde se observa que los contenidos de Cu, Fe, Zn y Mn se encuentran en niveles nutricionales adecuados, por lo que no representaron problemas de toxicidad en la planta. Para el caso de Cd, Pb y Ni, las concentraciones estuvieron muy por debajo del rango adecuado permitido por la Norma US-EPA-503 (1996) y la NOM-004-SEMARNAT (2002). Sin embargo, se observó que en el caso del Pb y Cu se incrementaron ligeramente las concentraciones en los tratamientos con lodos residuales.

Cuadro 14. Concentraciones promedio de los metales pesados en la parte aérea (tallos, hojas y panículas) del cultivo de sorgo forrajero expresados en mg kg^{-1} en base seca.

METAL	Parte aérea (mg kg^{-1})				
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
Cd	N.D.	0.8	0.56	0.42	0.21
Pb	4.2	6.18	8.87	8.4	N.D.
Cu	0.55	1.4	2.1	2.4	1.3
Ni	6.38	1.73	4.36	8.27	22.2
Fe	211.3	124.1	41.3	55.8	52.9
Mg	1360	1250	1050	860	1125
K	6025	5660	4400	4110	5350
Ca	2.7	9.4	1.3	2.8	1.0
Zn	26.3	30.4	27.7	28.3	19.7
Mn	56.2	53.6	51.0	38.1	46.8

N.D. = No detectado

Laboratorio de suelos, plantas y aguas de la FAUANL.

En el Cuadro 15 se muestran los contenidos promedio de los metales pesados en la raíz en el cultivo de sorgo forrajero base seca para cada uno de los tratamientos, los cuales se analizaron por absorción atómica en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de la Facultad de Agronomía de la UANL, en donde se observa que los contenidos de Cu, Fe, Zn y Mn, se encuentran en niveles nutricionales adecuados por lo que no representaron problemas de toxicidad en la planta. Para el caso de Cd, Pb y Ni, las concentraciones estuvieron en el rango adecuado permitido por la Norma US-EPA-503 (1996) y la NOM-004-SEMARNAT (2002).

Cuadro 15. Contenidos promedio de metales pesados en la raíz del cultivo de sorgo forrajero, expresados en mg kg^{-1}

METAL	Raíz (mg kg^{-1})				
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
Cd	0.28	0.22	0.24	0.45	0.47
Pb	8.46	5.12	12.4	6.19	6.5
Cu	3.01	3.3	3.2	4.1	2.8
Ní	2.8	1.6	3.9	6.5	10.7
Fe	4290	3460	3415	5881	4555
Mg	4220	21350	19860	30100	21400
K	1905	1625	1905	2300	1626
Ca	5550	5650	5350	5150	4950
Zn	24.5	26.6	26.3	34.8	25.1
Mn	134.6	135.1	120.7	179.9	151.3

N.D. = No detectado

Laboratorio de suelos, plantas y aguas de la FAUANL

Los análisis de los lodos residuales (Cuadro 11) muestran que las concentraciones de metales pesados analizados se encuentran por debajo de lo permitido por la norma US-EPA-503,1996 y la NOM-004-SEMARNAT, 2002, lo que indica que la procedencia del lodo residual es aceptable. Aunado a esto, las características de los suelos de Durango en cuanto al pH, asegura que los metales pesados que se apliquen pueden salir de la solución del suelo vía precipitación formando compuestos insolubles, evitando así la contaminación de los tejidos vegetales y posterior inclusión de estos metales en la cadena alimenticia. Algunas investigaciones han mostrado la relación de la solubilidad de los metales pesados y el pH, entre estas investigaciones, Bukovac, *et al.* (2002) mostraron que la liberación de Cd, Cu, y Pb disminuyó a medida que se incrementó el pH del sistema.

En el Cuadro A 18 se muestra el análisis de varianza para la segunda localidad y primer ciclo agrícola 2001 (experimento 2) donde se observa que existió diferencia entre los tratamientos.

En el Cuadro 16 se muestra la comparación de medias del rendimiento promedio por planta, en donde se observa que los tratamientos 3, 2 y 4, que corresponden a los abonos orgánicos de los lodos residuales y estiércol bovino, los cuales tuvieron rendimientos de materia seca superiores a los tratamientos 1 y 5. Los mayores rendimientos de materia seca en los tratamientos con lodos residuales se explican debido a la mayor concentración de nutrimentos en el material orgánico que se aplica, además también se ha demostrado que la aplicación de lodos residuales a terrenos agrícolas incrementa el carbono del suelo y algunas características físicas del suelo, tales como la estructura (agregados del suelo) y la capacidad de retención de humedad (Zibilske, *et al.*, 2000).

Cuadro 16. Comparación de medias por el método Tukey, expresados en gramos por planta (experimento 2).

Tratamientos	Media ^a (gramos por planta)
3 = 8 Mg ha ⁻¹ Lodo	43.6 a
2 = 4 Mg ha ⁻¹ Lodo	41.4 a
4 = 4 Mg ha ⁻¹ Estiércol	32.2 ab
1 = Testigo	23.4 bc
5 = Fertilizante químico	17.8 c

^a Tratamientos con la misma literal son similares

4.3. Experimento 3

En los Cuadros A 19 y A 20 se muestra el análisis de varianza por bloques completos al azar y el análisis de varianza por contrastes ortogonales, para rendimiento de forraje en base seca de la primera localidad y el segundo ciclo agrícola 2002, donde se observa que existió diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0.05$). En el contraste 1, que corresponde a la comparación del testigo contra los otros tratamientos, se encontró un efecto significativo, lo cual indica que la aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizantes químicos, modifica la respuesta de la producción de forraje base seca.

En el Cuadro 17 se muestra el promedio ajustado por covarianza (vecindad cercana) en la producción de sorgo base seca, en la primera localidad y en el ciclo agrícola 2002.

Cuadro 17. Comparación de medias ajustadas por vecindad cercana, para la primera localidad y segundo ciclo agrícola 2002 (Experimento 3).

Tratamientos	Media ^a (gramos por planta)
4 = 4 Mg ha ⁻¹ Estiércol bovino	229.91 a
3 = 8 Mg ha ⁻¹ Lodo residual	218.54 a
2 = 4 Mg ha ⁻¹ Lodo residual	206.64 a
5 = Fertilizante químico	187.28 a
1 = Testigo	130.61 b

^a Tratamientos con la misma literal son similares.

En la comparación de medias se encontró que los materiales orgánicos y fertilizante químico, tuvieron un efecto positivo sobre el rendimiento de materia seca comparado con el testigo, lo que indica que cualquiera de estos materiales puede ser empleado como abono; el efecto de los abonos orgánicos y fertilizante químico tuvieron un efecto residual, dado que se mantuvo la diferencia de estos materiales comparados con el testigo, este resultado es similar al obtenido por Vázquez, (1996), quien obtuvo respuesta de residualidad después del segundo año por la aplicación de estiércol bovino, sin embargo con los datos obtenidos en este experimento no fue posible demostrar que los lodos residuales fueron superiores al fertilizante químico, aún cuando los promedios de rendimiento en los lodos residuales fueron mayores que los promedios de los fertilizantes químicos en ambos ciclos. En otras investigaciones efectuadas por Castellanos, *et al*, (1989) y Alarcón, (1997), encontraron que en la adición de abonos orgánicos el efecto residual perdura por varios años, además contienen macronutrientes disponibles para las plantas y mejoran las características físicas de los suelos.

4.4. Experimento 4

En el Cuadro 18 se muestran las características físicas y químicas del suelo de cada tratamiento al final de la investigación, en donde se observa que la característica de textura se modificó con el tratamiento 3, que de ser un suelo arcilloso pasó a ser un suelo migajón arcilloso, esto debido al contenido de arena que tiene el lodo residual utilizado en esta investigación (63.48% arena), los demás tratamientos permanecieron en las mismas condiciones que al inicio del experimento. Respecto a la densidad aparente se observa un pequeño incremento en todos los tratamientos con respecto al análisis inicial ya que el tratamiento 1 aumentó 12.5%, los tratamientos 2 y 3 con un 5.76%, el tratamiento 4 con un 14.4% y el tratamiento 5 con un 6.73%, esto tal vez se originó por el trabajo de aireación cuando se mezcló la tierra en los contenedores. Respecto al pH, los tratamientos 2, 3, y 4 redujeron 0.41, 0.51 y 0.61 respectivamente, los tratamientos 1 y 5 se mantuvieron constantes. En el contenido de nitrógeno los tratamientos 2, 3, 4, 5, manifestaron un mínimo porcentaje de incremento con respecto al tratamiento 1, el cual se mantuvo con el mismo porcentaje que al inicio de la investigación, pero este incremento no fue significativo, debido a que la clasificación sigue siendo pobre. Respecto al fósforo se encontró un pequeño aumento entre los tratamientos, comparados con el testigo. Respecto al análisis del contenido de salinidad medida a través de la conductividad eléctrica, mostró que esta incrementa en las unidades experimentales donde se aplicaron los lodos residuales, aunque no llegó a niveles altos como para considerar problemas de salinidad para el crecimiento

de las plantas, sin embargo es importante vigilar el incremento de la salinidad cuando se aplica este tipo de materiales en dosis altas o aplicaciones frecuentes (Stehower, 1999). Respecto a la materia orgánica el incremento entre los tratamientos respecto al testigo fue: tratamiento 1 con un 0.13%, el tratamiento 2 con un 0.4%, el tratamiento 3 con un 0.44%, el tratamiento 4 con un 0.29% y el tratamiento 5 con un 0.25%, lo que indica que el incremento fue mínimo, pero si se incrementan las dosis incrementará el porcentaje de materia orgánica como lo mencionan Clevenger, *et al.* (1983), Hue, *et al.* (1998) y Quintero, *et al.* (1998).

Cuadro 18. Características físicas y químicas del suelo de cada tratamiento al final de la investigación, en el cuarto experimento en el invernadero del CIIDIR-IPN, Dgo., realizado en el Laboratorio de Suelos del Instituto Tecnológico Agropecuario de Durango.

	T 1 Testigo	T 2 4 t ha ⁻¹ Lodo residual	T 3 8 t ha ⁻¹ Lodo residual	T 4 4 t ha ⁻¹ Estiércol bovino	T 5 Fertilizante químico
Características del suelo					
Arena	34.56 %	35.72 %	40.56 %	39.28 %	31.28 %
Arcilla	47.44 %	43.28 %	35.44 %	41.44 %	43.44 %
Limo	18.00 %	18.00 %	24.00 %	19.28 %	25.28 %
Textura	Arcilloso	Arcilloso	Migajón Arcillosos	Arcilloso	Arcilloso
Densidad aparente	1.17 g cm ⁻³	1.1 g cm ⁻³	1.1 g cm ⁻³	1.19 g cm ⁻³	1.11 g cm ⁻³
pH (agua)	8.6	8.2	8.1	8.0	8.51
pH (CaCl ₂)	8.14	8.0	7.4	7.57	7.7
Fertilidad					
Nitrógeno total	0.06 %	0.07 %	0.08 %	0.07 %	0.07 %
P (Olsen)	6.4 ppm	7.1 ppm	8.1 ppm	8.1 ppm	8.2 ppm
M.O.	1.27 %	1.54 %	1.58 %	1.43 %	1.39 %
K	1640 ppm	1660 ppm	1930 ppm	1420 ppm	1500 ppm
Na	3240 ppm	3000 ppm	800 ppm	2300 ppm	2200 ppm
Ca	4900 ppm	6076 ppm	7056 ppm	6072 ppm	4900 ppm
Mg	1881.6 ppm	1999.2 ppm	2234.4 ppm	2116.8 ppm	1646.5 ppm
Extracto de Saturación (Salinidad)					
C.E.	1.07 dSm ⁻¹	2.3 dSm ⁻¹	2.46 dSm ⁻¹	1.83 dSm ⁻¹	1.49 dSm ⁻¹
Cationes					
Ca	0.98 meq L ⁻¹	0.96 meq L ⁻¹	2.1 meq L ⁻¹	2.2 meq L ⁻¹	0.93 meqL ⁻¹
Mg	0.39 meq L ⁻¹	0.98 meq L ⁻¹	1 meq L ⁻¹	2.21 meq L ⁻¹	0.74 meqL ⁻¹
Na	10.43 meqL ⁻¹	10.22 meq L ⁻¹	13 meq L ⁻¹	13.26 meqL ⁻¹	5.87 meqL ⁻¹
K	0.1 meq L ⁻¹	0.33 meq L ⁻¹	0.23 meq L ⁻¹	0.19 meq L ⁻¹	0.18 meqL ⁻¹
Aniones					
CO ₃	0	0	0	0	0
HCO ₃	9 meq L ⁻¹	9 meq L ⁻¹	8 meq L ⁻¹	8 meq L ⁻¹	9 meq L ⁻¹
Cl	0.5 meq L ⁻¹	0.25 meqL ⁻¹	0.25 meqL ⁻¹	0.25 meqL ⁻¹	0.25 meqL ⁻¹

Laboratorio de Suelos del ITAD - 2003

En los Cuadros 19 y 20 se presentan los resultados del análisis secuencial para el tratamiento 1, en los cuales la concentración y el porcentaje de Cd, en forma intercambiable indican que puede ser fácilmente absorbido por las plantas; sin embargo en esta investigación no se presentó en concentraciones peligrosas en la parte aérea ni en la raíz del cultivo de sorgo forrajero (Cuadros 14 y 15), así mismo se presentó con 54.59 % en forma adsorbida en la materia orgánica del suelo, lo que indica que la planta no lo absorbe fácilmente; con respecto al Pb, Cu, Zn y Mn, los porcentajes de su presencia son muy bajos para ser absorbidos por las plantas, ya que se encuentran asociados con materia orgánica, carbonatos y en forma residual, lo que indican que están fijados en formas que no son disponibles para las plantas. Cabe mencionar que en el tratamiento 1, no se aplicó ningún abono orgánico e inorgánico, por lo que los elementos pesados encontrados en la parte soluble del suelo, son nativos y sus niveles están por debajo de los límites de riesgo para ser absorbidos por las plantas.

Cuadro 19. Análisis secuencial del suelo del tratamiento 1 = testigo sin aplicación, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (2003) se expresa en mg kg^{-1} (ppm).

Solución extractora	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn
KNO ₃	0.262	3.69	0.35	3.62	20.04
H ₂ O	<0.032	0.113	0.22	11.17	21.67
NaOH	0.4304	2.08	0.94	4.79	11.62
EDTA	<0.032	9.55	1.80	17.26	111.16
HNO ₃	<0.032	5.38	1.13	9.18	9.95

Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la FAUANL - 2003

Cuadro 20. Análisis secuencial del suelo del tratamiento 1 = testigo perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (2003) se expresa en porcentaje.

Solución extractora	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn
KNO ₃	33.23	17.74	7.95	7.87	11.48
H ₂ O	4.05	0.54	5.01	24.26	12.42
NaOH	54.59	9.99	21.13	10.41	6.66
EDTA	4.05	45.86	40.53	37.49	63.70
HNO ₃	4.05	25.87	25.39	19.96	5.70

Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la FAUANL - 2003

En los Cuadros 21 y 22 correspondientes al tratamiento 2, se observa que la concentración de Cd representa la forma soluble más peligrosa de ser absorbida por la planta, pero puede también estar retenido en forma orgánica en el suelo, ya que en los Cuadros 14 y 15, muestran que no existió absorción por la planta. El Pb con un 13.5% y 0.417% en forma soluble e intercambiable, indican que no esta en forma soluble, además el 37.17% se encuentra en forma residual y con 36.85% asociado a carbonatos, lo que indica que es difícil que sea absorbido por la planta. El Cu con un 8.21% y 1.45% se encuentra en forma soluble e intercambiable, por lo que es muy bajo el nivel de absorción por la planta; el 78.54% que se encuentra asociado a carbonatos, esto indica que puede precipitarse o lixiviarse. El Zn con 34.9% se encuentra en forma soluble, por lo que puede ser absorbido por la planta, pero se encuentra en una concentración que no es tóxico para la planta. El Mn no tiene problema de ser absorbido por la planta, debido a que la forma soluble e intercambiable se

encuentran con un 2.16% y 15.65 % respectivamente y la única forma de mayor contenido se presenta con un 66.47%, pero no se encuentran en forma disponible ya que esta asociado a carbonatos.

Cuadro 21. Análisis secuencial del suelo del tratamiento 2 = 4 Mg ha⁻¹ de lodo residual, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (2003) se expresa en mg kg⁻¹ (ppm).

Solución extractora	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn
KNO ₃	0.262	2.83	1.141	9.19	3.72
H ₂ O	0.604	0.087	0.205	12.77	26.96
NaOH	0.373	2.526	1.138	1.99	15.21
EDTA	<0.032	7.721	10.91	1.63	114.47
HNO ₃	<0.032	7.788	0.504	11.02	11.84

Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la FAUANL - 2003

Cuadro 22. Análisis secuencial del suelo del tratamiento 2 = 4 Mg ha⁻¹ de lodo residual, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (2003) el cual se expresa en porcentaje.

Solución extractora	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn
KNO ₃	20.10	13.50	8.21	25.11	2.16
H ₂ O	46.35	0.417	1.45	34.90	15.65
NaOH	28.04	12.05	8.19	5.43	8.83
EDTA	2.45	36.85	78.54	4.46	66.47
HNO ₃	2.45	37.17	3.62	30.10	6.87

Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la FAUANL 2003

En los Cuadros 23 y 24 correspondientes al tratamiento 3, se observa que las mayores concentraciones y porcentajes son para los siguientes metales pesados. El Cd con un 53.27% en forma soluble indica que puede ser absorbido por las plantas, ya que es fácilmente reemplazado de la materia orgánica del suelo, aunque también se encuentra en forma adsorbida con un 25.71% lo que aminora su absorción por estar formando complejos con la materia orgánica. El Pb se encuentra en un 12.84% en forma soluble, pero no es peligrosa su absorción ya que la mayor parte se encuentra en forma residual con un 44.76%, esto indica que es muy difícil que sea absorbido por las plantas. El Cu con un 20.76% en forma soluble, no presenta riesgo de contaminación del cultivo, ya que el 41.46% se encuentra asociado a carbonatos, indica que esta retenido en el suelo y puede ser lavado o lixiviado. El Zn con un 19.49% en forma soluble, no representa riesgo de ser absorbido por las plantas, ya que el 24.81% y 24.09% se encuentra retenido en el suelo asociado a carbonatos y fijado en la materia orgánica. El Mn con un 17.65% en forma soluble, no representa riesgo de absorción, ya que el 66.84% es la mayor parte y se encuentra asociado a carbonatos, lo que indica que puede ser lavado o lixiviado fácilmente.

Cuadro 23. Análisis secuencial del suelo del tratamiento 3 = 8 Mg ha⁻¹ de lodo residual, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (2003) se expresa en mg kg⁻¹ (ppm).

Solución extractora	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn
KNO ₃	0.199	2.227	0.616	4.88	7.573
H ₂ O	0.667	0.067	<0.041	9.23	24.12
NaOH	0.322	2.729	0.592	11.41	8.42
EDTA	<0.032	4.56	1.23	11.75	91.35
HNO ₃	<0.032	7.763	0.487	10.08	5.195

Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la FAUANL - 2003

Cuadro 24. Análisis secuencial del suelo del tratamiento 3 = 8 mg ha⁻¹ de lodo residual, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el laboratorio de suelos, plantas y agua de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (2003) el cual se expresa en porcentaje.

Solución extractora	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn
KNO ₃	15.89	12.84	20.76	10.30	5.54
H ₂ O	53.27	0.38	1.38	19.49	17.65
NaOH	25.71	15.73	19.95	24.09	6.16
EDTA	2.55	26.29	41.46	24.81	66.84
HNO ₃	2.55	44.76	16.41	21.28	3.80

Laboratorio de Suelos Plantas y Aguas de la FAUANL - 2003

En los Cuadros 25 y 26 correspondiente al tratamiento 4, se observa que el Cd, con un 52.74% se encuentra en forma soluble, lo que indica que puede ser absorbido por la planta, ya que representa la fase más peligrosa de absorción, sin embargo los Cuadros 14 y 15, muestran que no existió presencia ni en la parte aérea ni en la raíz. El Pb con un 14.83% en forma soluble, no

representa riesgo de absorción por la planta, ya que la mayor parte de éste metal, esta en forma residual. El Cu con 17.94% en forma soluble, no representa riesgo de absorción, ya que el 31.81% esta asociado a carbonatos, lo que indica que no representa riesgo de ser absorbido. El Zn no se encuentra asimilable para la planta porque esta asociado a carbonatos (25.09%) y complejos orgánicos (23.7%). El Mn con 74.02% asociado a carbonatos no representa riesgo de alta absorción.

Cuadro 25. Análisis secuencial del suelo del tratamiento 4 = 4 Mg ha⁻¹ de estiércol bovino, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (2003) se expresa en mg kg⁻¹ (ppm).

Solución extractora	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn
KNO ₃	0.154	3.65	0.374	8.57	4.19
H ₂ O	0.548	2.73	<0.041	7.75	17.85
NaOH	0.273	3.01	0.388	10.91	6.12
EDTA	<0.032	7.65	0.663	11.55	97.90
HNO ₃	<0.032	7.57	0.618	7.25	6.19

Laboratorio de Suelos Plantas y Aguas de la FAUANL - 2003

Cuadro 26. Análisis secuencial del suelo del tratamiento 4 = 4 Mg ha⁻¹ de estiércol bovino, perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (2003) se expresa en porcentaje.

Solución extractora	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn
KNO ₃	14.82	14.83	17.94	18.59	3.17
H ₂ O	52.74	11.08	1.96	16.84	13.49
NaOH	26.27	12.25	18.61	23.70	4.63
EDTA	3.07	31.06	31.81	25.09	74.02
HNO ₃	3.07	30.76	29.65	15.76	4.68

Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la FAUANL - 2003

En los Cuadros 27 y 28 correspondientes al tratamiento 5, se observa el Cd con 49.58% en forma soluble y de intercambio más peligrosa, sin embargo en los Cuadros 14 y 15, muestran que no existió absorción por el cultivo, lo que indica que pudiera estar formando complejos orgánicos ya que un 23.67% esta asociado con material orgánico. El Pb con 30.8% en forma residual, indica que esta fuertemente adsorbido dentro de la estructura de los minerales silicatados y no puede ser absorbido por la planta. El Cu con 38.86% y 22.4% se encuentra asociado a carbonatos, lo que indica que no es absorbido por las plantas y se puede precipitar. El Zn tiene 30.53% esta en forma soluble, por lo que esta disponible para las plantas. El Mn con 63.27% está asociado a carbonatos, esto indica que puede ser precipitado.

Cuadro 27. Análisis secuencial del suelo del tratamiento 5 = fertilizante químico (120-60-00) perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (2003) se expresa en mg kg^{-1} (ppm).

Solución extractora	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn
KNO ₃	0.178	4.44	0.430	6.32	11.36
H ₂ O	<0.032	3.97	<0.041	13.90	33.93
NaOH	0.085	3.23	0.387	7.71	7.65
EDTA	<0.032	6.19	0.860	9.93	108.5
HNO ₃	<0.032	7.93	0.496	7.66	9.25

Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la FAUANL - 2003

Cuadro 28. Análisis secuencial del suelo del tratamiento 5 = fertilizante químico (120-60-00) perteneciente al cuarto experimento ubicado en el invernadero del CIIDIR-IPN, unidad Durango y analizado en el laboratorio de suelos, plantas y agua de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (2003) se expresa en porcentaje.

Solución extractora	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn
KNO ₃	49.58	17.24	19.43	13.88	6.65
H ₂ O	8.91	15.40	1.85	30.53	19.87
NaOH	23.67	12.53	17.47	16.94	4.48
EDTA	8.91	24.02	38.86	21.82	63.27
HNO ₃	8.91	30.80	22.40	16.82	5.42

Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la FAUANL - 2003

En el Cuadro 29 se muestran las concentraciones promedio de los metales pesados en el tejido vegetal de la parte aérea (tallos, hojas y paniculas) en el cultivo de sorgo forrajero en base seca para cada uno de los tratamientos, en donde se observa que las concentraciones de Cu, Fe, Zn y Mn, se encuentran en niveles nutricionales adecuados para el crecimiento del sorgo forrajero, considerando que estos elementos son esenciales para el crecimiento de las plantas (Clevenger, *et al.* 1983), para el caso de Cd, Pb y Ni, las concentraciones estuvieron muy por debajo del rango adecuado permitido por la Norma Us-EPA-503 y la NOM-004-SEMARNAT, 2002, lo que indica que no constituyen riesgo de contaminación para los animales que consuman el forraje.

Cuadro 29. Concentraciones promedio de los metales pesados en la parte aérea (tallos, hojas y panículas) del cultivo de sorgo forrajero expresados en mg kg^{-1} en base seca, pertenecientes al cuarto experimento y a cada uno de los tratamientos, analizados en el laboratorio de suelos, plantas y agua de la Facultad de Agronomía de la UANL por medio del espectrofotómetro de absorción atómica.

METAL	Parte aérea (mg kg^{-1})				
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
Cd	N.D.	0.6	1.5	1.0	N. D.
Pb	3.9	6.0	7.0	5.4	0.6
Cu	0.58	1.0	1.6	1.3	1.5
Ni	3.6	2.1	3.3	6.7	14.0
Fe	252	218	180	97	59
Mg	1285	1228	1432	1230	1650
K	6320	6430	6540	6410	5260
Ca	1.30	1.37	1.40	2.0	1.8
Zn	39	28.0	21.4	19.8	23.5
Mn	47	43.8	46.6	52	42.4

N D = No detectado

Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la FAUANL (2003).

En el Cuadro 30 se muestran las concentraciones promedio de los metales pesados en la raíz en donde se observa que las concentraciones de Cu, Zn y Mn, se encuentran en niveles nutricionales adecuados para el crecimiento del sorgo forrajero, ya que estos metales son considerados como micronutrientes necesarios para la nutrición vegetal, Reuter y Robinson (1986). mencionan que los metales como Cu, debe encontrarse en concentraciones mayores de 12 mg kg^{-1} para ser considerado tóxico para las plantas, el Zn debe encontrarse en cantidades mayores de 40 mg kg^{-1} para ser

considerado fitotóxico, el Mn, debe encontrarse en concentraciones mayores de 190 mg kg^{-1} para ser considerado problema para las plantas. Observando éstos resultados se concluye que ningún metal llegó al límite de toxicidad. Clevenger, *et al.* (1983) mencionan que el Fe, Mn, Cu y Zn, se encuentran deficientes en suelos calcáreos como los del noreste de México, lo que coincide con los resultados obtenidos en éste trabajo, debido a que estos metales no presentaron ningún problema durante el desarrollo de la planta. Para el caso de Cd, Pb y Ni, Benitez, *et al.* (2000) mencionan que estos metales pesados no constituyeron ningún riesgo, aún con cantidades de 100 mg ha^{-1} aplicadas de lodo residual, igualmente los contenidos de elementos traza en los cultivos en general. En esta investigación se observa un incremento en éstos metales pero aunque las concentraciones aumentaron debido a una mineralización de la materia orgánica, aún así se mantuvieron por debajo del rango permitido por la Norma US-EPA-503. 1996 y la NOM-004-SEMARNAT. 2002.

Cuadro 30. Concentraciones promedio de los metales pesados en la raíz del cultivo de sorgo forrajero expresados en mg kg^{-1} en base seca, pertenecientes al cuarto experimento y a cada uno de los tratamientos, analizados en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua de la Facultad de Agronomía de la UANL por medio del espectrofotómetro de absorción atómica.

Metal	Raíz (mg kg^{-1})				
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
Cd	0.2	0.2	0.4	0.4	0.2
Pb	6.3	6.5	8.0	6.3	6.8
Cu	3.0	3.0	4.1	4.6	3.5
Ni	3.4	2.9	3.8	6.5	12.0
Fe	3265	3782	4825	3474	4749
Mg	1453	1825	1951	1963	1460
K	5491	6732	6373	6749	6380
Zn	20.1	28.3	32.5	21.6	31
Mn	106.4	129.5	185.5	168.5	110

Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la FAUANL - 2003

En el Cuadro A 21 se muestra el análisis de varianza de bloques completos al azar para el rendimiento de forraje en base seca para la segunda localidad y segundo ciclo agrícola 2002, perteneciente al cuarto experimento, donde se observa que existió diferencia significativa entre tratamientos ($P < 0.05$).

En el Cuadro 31 se muestra la comparación de medias de rendimiento por planta en la segunda localidad y segundo ciclo agrícola, en donde se observa que el tratamiento 3 respondió consistentemente a la aplicación de lodo residual, sin embargo en éste segundo ciclo, la transformación de materia seca fue más eficiente que en el primer ciclo, por lo que la mineralización fue más

completa, permitiendo una mejor nutrición de la planta en el segundo ciclo agrícola, también se observa que los tratamientos 4 y 2, tuvieron rendimientos de materia seca superiores a los tratamientos 5 y 1.

Cuadro 31. Comparación de medias de materia seca por planta para la segunda localidad y segundo ciclo 2002 (experimento 4).

Tratamientos	Media ^a (gramos por planta)
3 = 8 Mg ha ⁻¹ Lodo residual	110.38 a
4 = 4 Mg ha ⁻¹ Estiércol bovino	90.62 a
2 = 4 Mg ha ⁻¹ Lodo residual	68.32 ab
5 = Fertilizante químico	61.0 bc
1 = Testigo	54.82 c

^a Tratamientos con la misma literal son similares

En el Cuadro 32 se observa gran variación en las normas que marcan los niveles de contaminación que establecen cada uno de los países en relación a la presencia de metales pesados para ser considerados como contaminantes de un suelo. En ésta investigación se observa que los niveles de los metales pesados se encuentran por debajo de los rangos permitidos, aún en los países de Holanda y Francia que son los más estrictos en el contenido de metales pesados. En el análisis secuencial de todos los tratamientos utilizados en esta investigación (Cuadros 19, 21, 23, 25 y 27) se observó que el Cd y Pb (totales) presentes en el suelo no tienen riesgo de contaminación, igualmente los metales pesados de Cu y Zn se encontraron por debajo de los niveles para que un suelo sea considerado como contaminado, lo que indica que los materiales evaluados en este estudio se pueden adicionar al suelo sin presentar problemas

de contaminación y el suelo puede ser utilizado para sembrar cualquier cultivo que se adapte a la región.

Cuadro 32. Nivel de contaminación por metales pesados en algunos países, en los que se considera como suelo contaminado (expresados en mg kg^{-1} total en el suelo). Adaptado de Chen, Tsai y Tsui (1999).

País	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Taiwan	5	200	200	500	500
Holanda	1	50	50	50	200
EUA	20	750	210	150	1400
Alemania	5	200	200	1000	600
Francia	2	100	50	100	300
Japón	-	125	100	400	150

V. CONCLUSIONES

5.1. Experimento 1

Los tratamientos con lodos residuales, fertilizante químico y estiércol bovino, fueron superiores al testigo y no se encontró diferencia entre ellos, por lo que se puede concluir que la aplicación de los lodos residuales pueden sustituir a la aplicación de fertilizante químico.

La concentración de metales pesados contenida en los lodos residuales, se encuentran muy por debajo de la Norma US-EPA-503 (1996) y la norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT (2002).

Los suelos de la región en donde se realizó el estudio son ideales para la aplicación de lodos residuales, debido a su pH y sus bajos niveles de nitrógeno, fósforo y materia orgánica.

5.2. Experimento 2

Los tratamientos correspondientes a los abonos orgánicos de lodos residuales y estiércol bovino, mostraron la mayor producción de forraje en base seca que los tratamientos con fertilizante inorgánico y el testigo, los cuales mostraron la menor producción.

La concentración de metales pesados contenidos en los lodos residuales, estuvo por debajo de los límites que establecen las Normas US-EPA-503 (1996) y la NOM-004-SEMARNAT (2002).

La adición de abonos orgánicos y químicos, no influyó en el contenido de metales pesados en la parte aérea y raíz del cultivo.

5.3. Experimento 3

Los tratamientos 4, 3, 2 y 5 que contenían abonos orgánicos y fertilizante químico, mostraron una mayor producción de forraje base seca, comparados con el tratamiento 1, debido al efecto de residualidad.

5.4. Experimento 4

Los tratamientos 3, 4 y 2 correspondientes a los abonos orgánicos, mostraron la mayor producción de forraje en base seca y los tratamientos con fertilizante químico y el testigo mostraron la menor producción.

La concentración de metales pesados contenidos en los lodos residuales, estuvo por debajo de los límites que establecen las Normas US-EPA-503 (1996) y NOM-004-SEMARNAT (2002) lo que indica que la procedencia del lodo residual es aceptable para incorporarse a los suelos de la región. Aunado a esto, las características de los suelos de Durango en cuanto al pH, aseguran que los metales pesados que se apliquen pueden salir de la solución del suelo vía precipitación formando compuestos insolubles, evitando así la contaminación de los tejidos vegetales y posterior inclusión de estos metales en la cadena alimenticia.

La adición de abonos orgánicos y químicos, no influyó en el contenido de metales pesados en el cultivo.

5.5. Conclusiones del análisis secuencial

Donde se encuentra material orgánico existe una extracción importante de elementos pesados, lo que indica que éstos elementos pesados como el Cd, esta presente en la solución del suelo, sin embargo no se encontró en niveles importantes en el tejido vegetal.

Los otros elementos pesados de Pb, Cu, Zn y Mn, no están disponibles para la planta, debido a que no son extraídos con agua y no hay problema de ser absorbidos por la planta ya que se encuentran asociados con los carbonatos.

Los niveles de Cd, Pb, Cu y Mn, presentes en el suelo después de la aplicación de los tratamientos, fueron bajos y no representan riesgos de contaminación del suelo.

El análisis secuencial mostró que el Cd es extraíble en porcentajes importantes por KNO_3 y agua, por lo que esta presente en la solución del suelo, sin embargo este elemento no se encontró en niveles importantes en el tejido vegetal.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, del C. L. A. 1997. Efecto de estiércol bovino combinado con fertilizante químico sobre la productividad de un suelo cultivado con maíz bajo riego. Tesis para obtención de grado de maestro en ciencias en suelos. Universidad Autónoma Antonio Narro. Buenavista, Saltillo. Coahuila. pp. 8-12.
- Alloway, B. J. 1990 Heavy metals in soils. Ed. John Wiley and Sons. Inc. New York, USA. pp. 56-79.
- Benitez, E. E., F. Romero., Gallardo-Lara y R. Nogales. 2000. Asimilabilidad de metales pesados en un suelo enmendado con diferentes biosólidos residuales urbanos. Departamento de agroecología. Edafología. 7(2):157-164. Granada, España.
- Bingham, F. T., A. L. Page., R.J. Mahler and T. J. Ganje. 1996. Yield and cadmium accumulation of forage species in relation to cadmium content of sludge-amended soil. A usable commodity for land application. Agricultural Experiment Station. New Mexico State University. Las Cruces, New México. pp. 57-60.
- Buckman, O. H. y C N Brady 1985 Naturaleza y propiedades de los suelos. UTEHA. México, D F. pp. 22-25.

- Bukovac, M., J. Flores and E. Backer. 2002. Peach leaf surfaces. Changes in wettability, retention, cuticular permeability and epicular wax chemistry during expansion with special reference to spray application. *Journal American Society Horticulture Science*. 104: 611 – 617.
- Castellanos, Z. J., G. A. Longoria y J. A. Muñoz. 1989. Efecto de cuatro años de estercolamiento sobre algunas características del suelo y el rendimiento de forrajes. *Terra*. Número 1, Volumen 7. pp. 57-63.
- Clevenger, T., B. Ahrens., G. O'Connor and D. Nelson. 1983. Sewage sludge: A usable commodity for land application. Reporte especial núm. 55. Agricultural Experiment Station. New Mexico State University. Las Cruces, New México. pp. 2-12.
- Cogger, C. 1993. Worksheet for calculating biosolids, application rates in agriculture. Extension soil scientist, WSU-Puyallup and Dan Sullivan, Extension soil scientist, Oregon State University. pp. 1-12.
- Collí, M. J. 2000. Tratamiento de excretas y aguas residuales para pequeñas comunidades. Curso teórico–práctico de tratamiento de agua residual municipal e industrial. Instituto mexicano de tecnología del agua. México, D.F. pp. 6-60.

- Chen, Z. S., C. C. Tsai and C. C. Tsui. 1999. Proposed regulation of soil pollutants in Taiwan soils. In: Proceedings of 6. Workshop on soil Pollution and Prevention: Soil Remediation Techniques on Soils Contaminated by Organic Pollutants, Z. S. Chen (Ed) Taipei, Taiwan. Pp. 169-207.
- Dorronsoro, C., I. Martín., M. I. García., E. S. Fernández., J. Aguilar and J. Fernández. 2002. Migration of trace elements from pyrite tailing in carbonate soil. *Journal Environ Qual.* 31: 829-835.
- Flores, M. I. y F. V. De la Barrera. 1999. Funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Durango. SIDEAPA. Durango, Dgo. México. pp. 1-18.
- García, E. 1976. Modificaciones al sistema de clasificación Climática de Köppen. Para aplicarlo a las condiciones climáticas de la Republica Mexicana. Instituto de Geografía de la UNAM. México, D.F. 84 p.
- Gamrasni, M. A. 1985. Aprovechamiento agrícola de aguas negras urbanas. Editorial LIMUSA, México, D.F. pp. 7-14.
- Háguad, M. L., R. R. Foroughbakhch y M. Hernández. 2000. Comportamiento de especies vegetales utilizando residuos generados en una planta tratadora de aguas residuales en Nuevo León, México, para su posible

incorporación en prácticas agrícolas; Investigación para el desarrollo regional; COFUPRO, SEP-CONACyT, FIRA. México, D.F. pp. 145-151.

Hue, N. V., J. A. Silva and R. Arrifin. 1998. Sewage sludge soil interactions as measured by plant and soil chemical composition. Land application of biosolids. University of Hawaii. Journal Environ. Qual. 17: 384-390.

Illera, V. I. y V. W. Cala. 2001. Niveles de metales pesados en *Thymus zygis* desarrollado en suelos enmendados con residuos orgánicos urbanos. Revista internacional de contaminación ambiental. Núm. 4. México, D.F. pp. 179-186.

INEGI. 1992. Cartografía Edafológica de Durango, Este G 13 D 82. México, D.F.

INEGI. 1994. Durango, Resultados Definitivos, VII Censo Agrícola-Ganadero, México, D.F. pp. 21 – 43.

INEGI. 2001. Anuario Estadístico del Estado de Durango. Aguascalientes, Ags. México pp. 3 – 21.

- Jimenes, B., J. A. Barrios and C. Andreoli. 2002. Biosolids management in developing countries experiences in Mexico and Brazil. *Water 21. Magazine of the International Water Association*. pp. 56-58.
- Kelling, K.A., D.R. Keeney, L. M. Walsh and J. A. Ryan. 1977. A field study of agricultural use of sewage sludge; Effect on uptake and extractability of sludge-borne metals. *Journal environ. Qual.*, vol. 6, no. 4. College of agriculture and life sciences; University of Wisconsin. pp. 352-358.
- Lee, R.V. 1998. Aplicación de ácido sulfúrico en el riego, corrige la clorosis férrica de los cultivos en suelos calcáreos. *Terra*, abril- junio 1998. 16 (2): 36-49. México, D.F.
- Ludwick, A. E. 1994. Productores de hortalizas. *Revista mensual*. 3 (2): 8-12. México, D.F.
- Martínez, C. J. 2003. Efecto del lodo residual en el rendimiento y concentración de metales pesados en hortalizas y granos básicos Tesis doctoral de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Marín, N. L., pp. 43-123.
- McCaslin, B. D. and G. A. O'Connor. 1982. Potential fertilizer value of gamma-irradiated sewage sludge on calcareous soils. *Agricultural Experiment Station Bulletin 692* pp 5-24

Metcalf y Eddy. 1996. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Tercera edición. McGraw-Hill. México, D.F. pp. 9-303.

Navarro, G. 2000. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Química agrícola. Ediciones mundi-prensa. España. pp. 140-165.

Norma Oficial Mexicana 2002. (NOM-004-SEMARNAT-2002). Protección ambiental para lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. México, D.F. pp. 18- 60.

Outwater, A. B. 1994. Reuse of sludge and minor wastewater residuals. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida. USA. pp. 12-16.

Olivares, S. E. 1994. Paquete de diseños experimentales. Versión 2.5. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N. L.

Ortiz, V. B. y S. C. A. Ortiz. 1990. Edafología. Séptima edición. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. pp.133-215.

- Pierce, B. L., E. F. Redente., K. A. Barbarick., R. B. Brobst and Phegeman. 1998 Plant biomass and elemental changes in shrubland forages following biosolids application. *Journal Environ. Qual.* 27:780-794.
- Pissani, Z. J. F. 2002. Tratamiento y aprovechamiento agrícola de aguas residuales. Facultad de agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N. L. pp. 4-11.
- Quinteiro, R. M. P., C. M. L. Andrade y V. E. De Blas. 1998. Efecto de la adición de un lodo residual sobre las propiedades del suelo: Experiencias de campo. Departamento de biología vegetal y ciencia del suelo. *Edafología.* 5 :1-10. Universidad de Vigo, España.
- Ramos, B. R. y H. N. Aguilera. 1995. Contaminación por metales pesados, sales y sodio en suelos de chinampa de Xochimilco, San Luis Tlaxiatemalco, Tlahuac y Mixquic, D.F. La investigación edafológica en México 1992-1995. *Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo.* Cd. Victoria, Tamps. Méx. pp. 158.
- Reuter, D. J. and J. B. Robinson. 1986. Plant analysis an interpretation manual. Intaka press. National library of Australia. Melbourne, Sydney, Australia. pp. 178-180.

- Rodríguez, F. H. y A. J. Rodríguez. 2002. **Métodos de análisis de suelos y plantas, criterios de interpretación.** Editorial Trillas, México. 196 p.
- Rodríguez, F. H. 2003. **Análisis secuencial. Procedimiento para la determinación de metales pesados en el suelo.** Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N. L. pp. 1-3.
- Rodríguez, S. P. 1982. **Fertilizantes. Nutrición vegetal.** AGT Editor, S. A. México, D.F. pp. 30-56.
- Rodríguez, N. F., L. F. Ramírez y F. R. Sustaita. 1992. **Materia orgánica, su efecto en el suelo e influencia directa en la planta.** Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. pp. 1-23.
- SAGAR.1998. **Alianza para el campo. Utilización de estiércoles.** Subsecretaría de desarrollo rural, programa de apoyo al desarrollo rural. Colegio de Posgraduados. pp. 1-8.
- Stehouwer, R. 1999. **Environmental issues. Land application of sewage sludge in Pennsylvania.** College of agricultural Sciences. Pennsylvania State University. USA. Cooperative extension. pp. 1-8.
- Sposito, G , L. J. Lund and A. C. Chang. 1982 **Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge I Fractionation of Ni, Cu,**

Zn, Cd, and Pb in solid phases. Soil Science Society of America Journal.
46: 260-264

Sopper, W. E. 1993. Municipal sludge use in land reclamation. Lewis
Publishers. Washington, D. C. pp. 8-86.

Trace elements. 2000. The handbook of trace elements. Published by St.
Lucie Press. Corporate Blvd. N. W. Boca Raton, Florida. pp. 43- 45.

U.B.A.(Universidad de Buenos Aires) 2000. Disposición y valorización agrícola
de biosólidos de plantas depuradoras. Dirección de agua y
saneamiento. Universidad de Buenos Aires, Argentina. pp.1-32.

United State Environmental Protection Agency. 1996. A plain english guide to
the EPA part 503 biosolids rule. Office of Wastewater Management.
Washington, DC. pp. 25-31.

Vázquez, A. R. E. 1996. Efecto de altos niveles de estiércol en el segundo
año de producción de nopal para verdura. Avances de investigación del
Centro de Investigación Agropecuaria de la Facultad de Agronomía de
la Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N. L. pp. 89-90.

Walker, J., L Knight and L Stein 1994 A plain english guide to the EPA Part
503 biosolid rule EPA/832/R-93/003

Williamson, W. M., L. G. Greenfield and M. H. Beare. 2000. Biodegradation assessment of woolscour sludge and fellmongery sludge. *Journal Environ. Qual.* 29: 1998-2005. University of Canterbury , New Zealand.

Zibilske, L. M., W. M. Clapham and R. V. Rourke. 2000. Multiple applications of mill sludge in an agricultural system: soil effects. *Journal Environ. Qual.* 29: 1975-1981. University of Maine, Weslaco, Texas. ,

APÉNDICE

Cuadro A 1. Agentes infecciosos que pueden estar presentes en el lodo residual (Metcalf y Eddy, 1996).

Organismo	Enfermedad	Causa
Bacteria		
<i>Escherichia coli</i> (enteropatógena)	Gastroenteritis	Diarrea
<i>Legionella pneumophila</i>	Legionelosis	Enfermedades respiratorias agudas
<i>Leptospira</i> (150 especies)	Leptospirosis	Leptospirosis, fiebre (enfermedad de Weil)
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea	Fiebre alta, diarrea, úlceras en el intestino delgado
<i>Salmonella</i> (1,700 especies)	Salmonelosis	Envenenamiento de alimentos
<i>Shigella</i> (4 especies)	Shigelosis	Disentería bacilar
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	Diarrea extremadamente fuerte, deshidratación
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersinosis	Diarrea
Virus		
Adenovirus (31 tipos)	Enfermedades respiratorias	
Enterovirus (67 tipos p.e. polio, eco y virus Coxsackie)	Gastroenteritis, anomalías cardíacas, meningitis	
Hepatitis A	Hepatitis infecciosa	Leptospirosis, fiebre
Agente Norwalk	Gastroenteritis	Vómitos
Reovirus y Rotavirus	Gastroenteritis	
Protozoos		
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiasis	Diarrea, disentería
<i>Cryptosporidium</i>	Criptosporidiosis	Diarrea
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebiasis (disentería amébrica)	Diarrea prolongada con sangre, abscesos en el hígado e intestino delgado
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis	Diarrea, náuseas indigestión
Helmintos		
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis	Infestación de gusanos
<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobiasis	Gusanos
<i>Fasciola hepatica</i>	Fascioliasis	Gusanos
<i>Hymenolepis nana</i> ,	Hymenolepiasis	Tenia enana
<i>Taenia saginata</i>	Teniasis	Tenia en buey y cerdo
<i>Trichuris trichiurasis</i>	Trichuriasis	Gusanos

Cuadro A 2. Organismos que han sido propuestos como indicadores de la contaminación humana (Metcalf y Eddy, 1996).

Organismo indicador	Características
Bacterias coliformes fecales	Especies de organismos que pueden fermentar lactosa con generación de gases (producen una colonia diferenciable en un periodo de incubación de 24 en 2 h a 48 en 3 h) el grupo de coliformes incluye 4 géneros de la familia enterobacteriácea (<i>Escherichia</i> , <i>Klebisella</i> , <i>Citrobacter</i> y <i>Enterobacter</i>).
Bacterias coliformes <i>Klebisella</i> <i>Escherichia coli</i>	La población termotolerante se incluye en el grupo de coliformes fecales, se cultiva a 35° C durante 24 h. Es parte de la población bacteriana y es el género de coliformes más representativo de la contaminación fecal.
Estreptococos fecales	Junto con los coliformes fecales determinan las fuentes de contaminación fecal reciente humana o de animales de granja. Con los procedimientos analíticos no es posible diferenciar los verdaderos estreptococos fecales de algunas de las variedades que se parecen, lo que representa un impedimento Para su uso como indicador.
Estreptococos	Los <i>s. faecalis</i> y <i>s. faecium</i> son los miembros más específicos de contaminación humana, éstos pueden aislarse y cuantificar mediante la eliminación de las demás familias mediante métodos analíticos.
<i>Clostridium perfringens</i>	Es una bacteria persistente anaerobia formadora de esporas y es una indicadora en los casos de infección.
<i>P. aeruginosa</i> y <i>A. hydrophila</i>	Están presentes en grandes cantidades en el agua y lodo residual.

Cuadro A 3. Aprovechamiento de los lodos residuales según su tipo y clase, hasta con un contenido de humedad de 85% (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	- Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.
Excelente o bueno	B	- Los establecidos para clases B y C. - Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación.
Excelente o bueno	C	- Los establecidos para clase C. - Usos forestales. - Mejoramiento de suelos. - Usos agrícolas.

Cuadro A 4 Frecuencia de muestreos y análisis para lodos residuales y biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002)

Volumen generado por año (t /año) en base seca	Frecuencia de muestreo y análisis	Parámetros a determinar
Hasta 1,500	Una vez al año	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos.
> de 1,500 hasta 15,000	Una vez por semestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos.
Excelente o bueno	Una vez por trimestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos

Cuadro A 5. Preservación y tiempo máximo para el análisis de cada uno de los parámetros según la NOM-004-SEMARNAT (2002).

Parámetros	Preservación*	Tiempo máximo de análisis
Coliformes fecales y <i>Salmonella spp.</i>	4° C	48 horas
Huevos de helmintos	4° C	30 días
Arsénico, cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo y zinc.	4° C	180 días
Mercurio	4° C	13 días ^a (plástico) 38 días ^b (vidrio)
Sólidos totales	4° C	24 horas
Sólidos volátiles	4° C	24 horas
Tasa específica de absorción de oxígeno**	No requiere	24 horas

* a partir de su toma y hasta antes de iniciar el análisis, la muestra debe mantenerse en refrigeración.

** si la muestra es tomada en el laboratorio, debe mantenerse la temperatura constante o ambiente, durante el transporte y analizada inmediatamente

Cuadro A 6. Relación de longitud y ancho de banda para los elementos analizados por flama según la NOM-004-SEMARNAT (2002).

Elemento	Longitud de onda (λ)	Ancho de banda espectral (nm)
Cd	228.8	0.7
Cr	357.9	0.7
Cu	324.8	0.7
Ni	232.0	0.7
Pb	217.0	0.7
Zn	213.9	0.7

Cuadro A 7. Relación de concentraciones para calibración del instrumento utilizando flama según la NOM-004-SEMARNAT (2002).

Elemento	Concentración (mg kg ⁻¹)
Cd	1.5
Cr	4.0
Cu	2.0
Ni	7.0
Pb	9.0
Zn	1.0

Cuadro A 8. Relación de longitud y ancho de banda para los elementos analizados por generador de hidruros según la NOM-004-SEMARNAT (2002).

Elemento	Longitud de onda (λ)	Ancho de banda espectral (nm)
As	193.7	0.7
Hg	253.7	0.7

Cuadro A 9. Relación de concentración para calibración del instrumento utilizando generador de hidruros según la NOM-004-SEMARNAT (2002).

Elemento	Concentración (mg kg ⁻¹)
As	5.0
Hg	50

Cuadro A 10. Efecto de los procesos de tratamiento del lodo residual sobre las prácticas de aplicación según la US. EPA (1996)

Definición y proceso de tratamiento	Efecto producido en el lodo	Efecto sobre las prácticas de aplicación
<p>Espesamiento: Es la separación por gravedad del agua y sólidos, flotación o centrifugación. Los espesadores del lodo se pueden usar como tanques para igualar el flujo y minimizar los efectos de las floculaciones de las cantidades de lodo en el proceso de tratamiento posteriores.</p>	<p>Ayuda a incrementar la concentración de sólidos en el lodo, por la remoción de agua, haciendo que baje el volumen de lodo. Puede combinarse una mezcla entre lodo primario y lodo secundario.</p>	<p>Los costos de transporte son más bajos para las prácticas agrícolas, forestales, recuperación de suelos y sitios de contacto público.</p>
<p>Digestión aerobia y anaerobia Es la estabilización biológica del lodo a través de la conversión de poca materia orgánica a agua, bióxido de carbono y metano. Los digestores pueden usarse para almacenar lodo y ser más fáciles a las operaciones de tratamiento y homogenizar los sólidos del lodo para un mejor manejo.</p>	<p>Reduce los compuestos volátiles y biodegrada el contenido orgánico y la masa del lodo, por la conversión de material soluble y gas. Se reduce el volumen por la concentración de los sólidos, decrece los niveles de patógenos y controla la pudrición y olores.</p>	<p>Reduce el volumen de lodo.</p>
<p>Estabilización con cal El lodo se estabiliza con la adición de álcali.</p>	<p>Eleva el pH del lodo, reduciendo la actividad biológica, decrece los niveles de patógenos y controla la pudrición, aumenta la masa de los sólidos secos. La descomposición, lixiviación, liberación de gases, olores y metales pesados ocurren con el tiempo, debido a que los efectos del pH son temporales.</p>	<p>El pH alto del lodo estabilizado con cal, inmoviliza los metales pesados.</p>

Cuadro A 10. Efecto de los procesos de tratamiento del lodo residual sobre las prácticas de aplicación (US. EPA 1996). (continuación)

Acondicionamiento:		
Es la alteración de las propiedades físicas del lodo para facilitar la separación del agua en el lodo. El acondicionamiento puede realizarse en tres diferentes maneras: adición de químicos inorgánicos como cal y cloruro férrico, adición de químicos orgánicos como polímeros y el acondicionamiento termal que consiste en elevar la temperatura del lodo, sirviendo como desinfectante.	Con la deshidratación del lodo se mejoran las características. El acondicionamiento incrementa la masa de sólidos secos que se manejan sin aumentar el contenido orgánico, puede mejorar la compactibilidad y estabilización del lodo. El lodo tratado con polímeros tiende a ser pegajoso y menos manejable. Algunos lodos son corrosivos.	El tratamiento con polímeros requiere consideraciones especiales de operación para aplicarlos al suelo.
Deshidratación:		
Es la separación del agua de los sólidos. Los métodos incluyen; filtros de vacío, centrifugadoras, filtros prensa, cintas prensa, lagunas y camas de secado por medio de arena	La concentración de sólidos se incrementa de 15 al 40% para lodo orgánico y 45% o más para lodo inorgánico debido a la remoción del agua. Algo de nitrógeno y otros materiales solubles son removidos con el agua. El manejo es fácil debido a la conversión de lodo líquido a lodo húmedo. Además reduce el combustible requerido para el secado a calor	Los costos de aplicación y transporte disminuyen para todas las prácticas.
Composteo		
Es un proceso aerobio que incluye la estabilización biológica del lodo, se efectúa en una pila estática aireada o en un vessel.	Baja la actividad biológica. Destruye patógenos, degrada el lodo a un material húmico. Aumenta la masa del lodo debido a la adición de agentes de volumen.	Contiene excelentes propiedades para el acondicionamiento de suelos. Puede almacenarse sin riesgos
Secado a calor		
El calor mata patógenos y elimina el contenido de agua	Desinfecta el lodo Disminuye los olores y actividad biológica	Reduce considerablemente el volumen del lodo

Cuadro A 11. Plantas de tratamiento, capacidad instalada y volumen tratado de agua residual por municipio y tipo de servicio.

Municipio y tipo de servicio.	Total	Laguna de oxidación.	Otra	Capacidad instalada (lps)	Volumen tratado (m ³ / año)
Canatlán	7	7	0	56.39	809 529.0
Público	7	7	0	56.39	809 529.0
Canelas	1	1	0	3.9	31 536.0
Público	1	1	0	3.9	31 536.0
Coneto	1	1	0	15.0	ND
Público	1	1	0	15.0	ND
Cuencamé	5	5	0	29.75	421 636.0
Público	5	5	0	29.75	421 636.0
Durango	14	7	7	1 994.09	51 532 977.0
Público	7	5	2	1 698.62	49 259 547.0
Privado	7	2	5	295.47	2 273 430.0
Simón Bolívar	1	1	0	21.5	132 451.0
Público	1	1	0	21.5	132 451.0
Gómez Palacio	10	3	7	194.57	1 214 590.0
Privado	10	3	7	194.47	1 214 590.0
Gpe. Victoria	7	7	0	76.92	1 672 669.0
Público	7	7	0	76.92	1 672 669.0
Hidalgo	2	2	0	3.76	67 802.0
Público	2	2	0	3.76	67 802.0
Indé	2	2	0	12.29	100 284.0
Público	2	2	0	12.29	100 284.0
Lerdo	5	3	2	61.0	837 660.4
Público	1	1	0	10.0	204 984.0
Privado	4	2	2	51.0	632 676.4
Mapimí	1	1	0	10.0	217 598.0
Público	1	1	0	10.0	217 598.0
Mezquital	2	2	0	12.68	211 922.0
Público	2	2	0	12.68	211 922.0
Nazas	1	1	0	5.0	91 454.0
Público	1	1	0	5.0	91 454.0
Nombre de Dios	3	3	0	24.22	272 156.0
Público	3	3	0	24.22	272 156.0
Nuevo Ideal	14	14	0	36.72	522 552.0
Público	14	14	0	36.72	522 552.0
Ocampo	6	6	0	30.64	346 265.0
Público	6	6	0	30.64	346 265.0
El Oro	2	2	0	14.0	208 894.0
Público	2	2	0	14.0	208 894.0
Otáez	1	1	0	1.0	ND
Público	1	1	0	1.0	ND
Panuco	7	7	0	65.42	311 260.0
Público	7	7	0	65.42	311 260.0
Peñón Blanco	3	3	0	14.56	260 172.0
Público	3	3	0	14.56	260 172.0

Cuadro A 11. Plantas de tratamiento, capacidad instalada y volumen tratado de agua residual por municipio y tipo de servicio (continuación).

Poanas	5	5	0	38.44	594 138.0
Público	5	5	0	38.44	594 138.0
Rodeo	1	1	0	6.0	119 837.0
Público	1	1	0	6.0	119 837.0
San Bernardo	1	1	0	1.0	36 582.0
Público	1	1	0	1.0	36 582.0
Juan de Gpe.	1	1	0	8.0	157 680.0
Público	1	1	0	8.0	157 680.0
San Juan del Río	4	4	0	15.44	116 683.0
Público	4	4	0	15.44	116 683.0
Pedro del Gallo	1	1	0	11.51	100 286.0
Público	1	1	0	11.51	100 286.0
Santa Clara	1	1	0	12.44	121 098.0
Público	1	1	0	12.44	121 098.0
Santiago Papasq.	2	2	0	60.27	848 000.0
Público	2	2	0	60.27	848 000.0
Súchil	2	2	0	12.36	184 486.0
Público	2	2	0	12.36	184 486.0
Tamazula	1	1	0	2.0	45 412.0
Público	1	1	0	2.0	45 412.0
Tepehuanes	3	3	0	58.52	634 820.0
Público	3	3	0	58.52	634 820.0
Tlahualilo	1	1	0	30.0	403 661.0
Público	1	1	0	30.0	403 661.0
Topia	1	1	0	2.5	66 226.0
Público	1	1	0	2.5	66 226.0
Vicente Guerrero	1	1	0	92.6	909 814.0
Público	1	1	0	92.6	909 814.0
Total					
Estado	120	104	16	3 034.54	63'602,130.4
Público	99	97	2	2 493.5	59'481,434.0
Privado	21	7	14	541.04	4'120,696.3

Cuadro A 12. Usuarios de la red de drenaje y el desecho que producen.

Usuario	Tipo de desecho
Casa habitación	Materia orgánica, heces fecales, detergentes.
Talleres Automotrices	Pintura, solventes químicos, grasas y aceites.
Lavado de automóviles	Grasas, aceites, arena y detergentes
Laboratorios químicos	Solventes orgánicos e inorgánicos, metales pesados
Lab. de análisis clínicos	Sangre, heces fecales y urea.
Restaurantes	Detergentes, grasas, aceites, materia orgánica.
Escuelas	Materia orgánica, heces fecales, solventes orgánicos e inorgánicos.
Clínicas y hospitales	Materia orgánica y residuos tóxicos.
Maquiladoras	Materia orgánica, detergentes, grasas y aceites.
Industria de la madera	Celulosa, solventes químicos y metales pesados.
Otro tipo de Industria	Metales pesados, solventes químicos, aerosol, grasas, aceites, pinturas.

Cuadro A 13. Eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales de acuerdo con los parámetros, unidad, influente, efluente y remoción de acuerdo con los reportes del laboratorio.

Parámetro	Unidad	Influente	Efluente	Remoción
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	mg L ⁻¹	137.0	45.06	67%
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg L ⁻¹	352.6	114.2	68%
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg L ⁻¹	150.4	35.9	76%
Sólidos sedimentables (SS)	mg L ⁻¹	2.1	0.0	100%
Sustancias activas al azul de metileno (SAAMS)	mg L ⁻¹	13.3	7.1	47%
Grasas y aceites (GyA)	mg L ⁻¹	40.6	8.2	80%
Coliformes totales	NMP/100 mL	6'950,000	28,000	99%
Coliformes fecales	NMP/100 mL	3'350,000	18,000	99%
Potencial hidrógeno (pH)	Unidad	7.21	7.36	
Oxígeno disuelto	Mg L ⁻¹	0.0	4.10	
Temperatura	C	25.5	24.1	
Eficiencia promedio				80%

Cuadro A 14. Dimensiones y capacidad de almacenamiento de las lagunas de oxidación de la ciudad de Durango.

Laguna	Profundidad	Área (m ²)	Volumen(m ³)	Difusores
A 1	4.5 m	25,300	100,738	450
B 1	4.5 m	25,530	104,179	450
A 2	4.5 m	24,750	98,253	285
B 2	4.5 m	24,750	99,216	285
A 3	4.5 m	27,500	109,638	150
B 3	4.5 m	27,500	110,714	150
Sedimentación y pulimento	3.0 m	144,600	434,010	

Cuadro A 15. Dimensiones y distribución de las lagunas de oxidación de la ciudad de Durango.

Laguna A 1 230m X 110m	Laguna A 2 225m X 110m	Laguna A 3 250m X 110m	Cloración
Laguna B 1 230m X 111m	Laguna B 2 225m X 110m	Laguna B 3 250m X 110m	Sedimentación D 482m X 300m

Cuadro A16. Análisis de varianza por contrastes ortogonales, para la primera localidad y primer ciclo agrícola 2001 (experimento 1)

F. V.	G L.	Fc	p
Contraste 1	8871	6.830*	0.018
Contraste 2	842.2	0.640 NS	0.559
Contraste 3	84.9	0.065 NS	0.797
Contraste 4	82.6	0.063 NS	0.797
Error	19461		

*significativo

NS = No significativo

Cuadro A 17. Distribución de los coeficientes y tratamientos por medio del arreglo por contrastes ortogonales, de la primera localidad y para el primer y segundo ciclo agrícola 2001 y 2002 (experimentos 1 y 3).

	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
Contraste 1	4	-1	-1	-1	-1
Contraste 2	0	1	1	-1	-1
Contraste 3	0	1	-1		
Contraste 4	0	0	0	1	-1

Cuadro A18. Análisis de varianza para la producción de sorgo forrajero de la segunda localidad y primer ciclo agrícola 2001 (experimento 2).

F. V.	G. L.	C. M.	Fc	p
Tratamientos	4	622.5	* 15.9	0.00
Bloques	4	75.8	NS 1.9	0.159
Error	16	39.11		
Total	24			

*Diferencia significativa

NS= No significativa

C.V. = 19.74%

Cuadro A 19. Análisis de varianza para el rendimiento de sorgo forrajero en base seca de la primera localidad y segundo ciclo agrícola 2002 (experimento 3).

F. V.	G. L.	S. C.	C. M.	F	p>f
Tratamientos	4	26525.18	6631.29	4.84	0 010
Bloques	4	1171.625	292 907	0.21	0 925
Error	16	21897 187	1368.574		
Total	24	49594			

Cuadro A 20. Análisis de varianza de contrastes ortogonales para el rendimiento de forraje en base seca de la primera localidad y segundo ciclo agrícola 2002 (experimento 3).

F. V.	G. L.	C. M.	Fc	P
Contraste 1	1	25588	23.21	0.000
Contraste 2	1	79.9	0.07	0.790
Contraste 3	1	354	0.321	0.585
Contraste 4	1	4543	4.126	0.057
Error	15	1102		

* Significativo

NS= No significativo

C.V. = 19.01 %

Cuadro A 21. Análisis de varianza por bloques completos al azar, para la producción de sorgo forrajero base seca segunda localidad y segundo ciclo agrícola 2002 (experimento 4).

F. V.	G. L.	C. M.	Fc	P
Tratamientos	4	2653.7	* 5.32	0.006
Bloques	4	564.8	NS 1.13	0.377
Error	16	498.1		
Total	24			

*Diferencia significativa

NS= Diferencia no significativa

C.V. = 23.98 %

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



**USO DE LODOS RESIDUALES PROCEDENTES DE LA
CIUDAD DE DURANGO Y SU EFECTO EN LA
PRODUCTIVIDAD Y CONCENTRACIÓN DE METALES
PESADOS EN SORGO FORRAJERO (*Sorghum vulgare*
Pers.)**

POR

JOSÉ MARÍA HERNÁNDEZ HERRERA

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CON ORIENTACION EN AGUA-SUELO**

MARIN, N. L., MÉXICO

ABRIL DE 2004

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



**USO DE LODOS RESIDUALES PROCEDENTES DE LA
CIUDAD DE DURANGO Y SU EFECTO EN LA
PRODUCTIVIDAD Y CONCENTRACIÓN DE METALES
PESADOS EN SORGO FORRAJERO (*Sorghum vulgare*
Pers.)**

POR

JOSÉ MARÍA HERNÁNDEZ HERRERA

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CON ORIENTACION EN AGUA-SUELO**

MARIN, N. L., MÉXICO

ABRIL DE 2004

