

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

DIVISION DE INGENIERIA



**ESTUDIO PARA DETERMINAR EL USO DE LODOS RESIDUALES
SOBRE LOS SUELOS AGRICOLAS DE CUATRO MUNICIPIOS
DE NUEVO LEON**

POR

EMILIO MARTINEZ RANGEL

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
TITULO DE:**

**INGENIERO AGRONOMO
EN IRRIGACION**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México Junio de 1999

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

DIVISION DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

**ESTUDIO PARA DETERMINAR EL USO DE LODOS RESIDUALES
SOBRE LOS SUELOS AGRICOLAS DE CUATRO MUNICIPIOS
DE NUEVO LEON**

Realizado por:

EMILIO MARTINEZ RANGEL

**Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador
como requisito parcial para obtener el título de:**

INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACION

**Dr. Juan Fco. Pissani Zuñiga
Asesor principal**

**M.C. Gregorio Briones Sánchez
Asesor**

**M.C. Luis Samaniego Moreno
Asesor**

**Ing. Jesús Valenzuela García
Coordinador de la División de Ingeniería**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
Junio de 1999**

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Juan Francisco Pissani Zuñiga, asesor principal de mi tesis, por sus consejos y apoyo que dedicó a mi formación. A mis asesores MC. Gregorio Briones Sánchez y MC. Luis Samaniego Moreno por sus valiosas sugerencias al presente trabajo.

A la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación.

A la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo brindado en la realización de la presente investigación.

Al LQI Fernando Rangel Sánchez y al IQ Luis García Reta por su valioso apoyo y sugerencias.

Al MC. Rubén López por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo.

A todas aquellas personas que de una u otra forma participaron en la ejecución del presente trabajo.

DEDICATORIAS

A MIS PADRES

MARIA DE LA LUZ RANGEL LOPEZ (qepd)

EMILIANO MARTINEZ TORRES

A MIS HERMANAS

MARÍA DE LA LUZ

MARÍA GUADALUPE

IRMA

ROSA MARTA

A MIS DEMAS FAMILIARES

TIOS
PRIMOS
SOBRINOS

A MIS MEJORES AMIGOS

MARCELINO

MARIO

EL TIJUANA

EDGAR

EL CHINO

JUAN

EL ABUELO

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CUADROS	viii
INDICE DE FIGURAS	xi
1. INTRODUCCION	1
Objetivos	5
2. REVISION DE LITERATURA	6
2.1 Lodo residual y Biosólidos	6
2.2 Disposición del lodo	6
2.2.1 Confinamiento del lodo	7
2.2.2 Incineración	9
2.2.3 Aplicación de lodo a los suelos	10
2.3 Características del lodo residual	26
2.3.1 Cantidad del lodo residual	28
2.3.2 Contenido de sólidos totales	29
2.3.3 Contenido de sólidos volátiles	32
2.3.4 pH	33
2.3.5 Materia orgánica	33
2.3.6 Patógenos	33
2.3.7 Nutrientes	39
2.3.8 Metales	42
2.3.9 Químicos orgánicos	46
2.3.10 Contaminantes peligrosos	47
2.4 Tipos de lodo	48
2.4.1 Lodo primario	48
2.4.2 Lodo secundario	48
2.4.3 Lodo terciario	48
2.5 Efectos de los procesos de tratamiento del agua y lodo residual sobre las características del lodo	49
2.6 Factores a considerar en la selección de terrenos para la aplicación de lodos	52
2.6.1 Clima	52
2.6.2 Topografía	52
2.6.3 Suelos y geología	54
2.6.4 Geohidrología	56
2.6.5 Hidrología	57
2.6.6 Uso y disponibilidad del suelo	58
2.6.7 Selección del cultivo y requerimientos de nutrientes	58
2.7 Estimación de la dosis de aplicación de lodo para sitios agrícolas de acuerdo a EPA	59
2.7.1 Dosis agronómica y límites para metales pesados de EPA (40 CFR Parte 503)	60
2.7.2 Cálculo basado en Nitrógeno	61
2.7.3 Cálculo basado en fósforo	67
2.7.4 Cálculo basado en los límites de contaminante	68
3. MATERIALES Y METODOS	70
3.1 Características y localización de las plantas de tratamiento	70
3.2 Primera etapa:	71

3.2.1 Corrosividad	71
3.2.2 Reactividad	72
3.2.3 Explosividad	72
3.2.4 Toxicidad	72
3.2.5 Inflamabilidad	74
3.2.6 Biológico infeccioso	74
3.3 Segunda etapa:	75
3.3.1 Contenido de metales pesados	75
3.3.2 Contenido de químicos orgánicos sintéticos	75
3.3.3 Contenido de microorganismos	76
3.3.4 Contenido de sales	76
3.3.5 Clasificación de los lodos de las plantas de tratamiento de agua residual en base a los rangos establecidos para metales pesados por la EPA	77
3.3.6 Selección de los lodos que tienen aptitud agrícola en base a las normas de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos	77
3.4 Tercera etapa:	77
3.4.1 Clima	77
3.4.2 Topografía	77
3.4.3 Geología	77
3.4.4 Hidrología	77
3.4.5 Edafología	78
3.4.6 Cultivo	78
3.5 Cuarta etapa:	78
3.5.1 Contenido de N, P y K disponibles para las plantas y materia orgánica	78
3.5.2 Estimación de las dosis de aplicación de lodo en base a nitrógeno y superficie de suelo que se requeriría para aplicar el lodo seleccionado y generado en un año	78
3.5.3 Estimación de la máxima carga de lodo que se puede aplicar por unidad de superficie en base al contenido de metales pesados	78
3.5.4 Número de años que puede utilizarse el lodo como suplemento parcial de fertilizantes	78
3.6 Quinta etapa:	78
3.6.1 Posible ahorro en los costos del tratamiento y disposición de lodos	79
3.6.2 Posible ahorro en los costos derivados por el uso de fertilizantes comerciales usados en la producción de los cultivos	79
3.6.3 Posible ahorro anual	79
4. RESULTADOS Y DISCUSION	80
4.1 Primera Etapa	80
4.1.1 Planta Dulces Nombres	80
4.1.2 Planta Norte	85
4.1.3 Planta Noreste	90
4.2 Segunda etapa	101
4.2.1 Metales pesados contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento contra los límites permisibles de EPA para la aplicación de lodo al suelo	101
4.2.2 Químicos orgánicos sintéticos contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento contra los límites permisibles de EPA.	103
4.2.3 Microorganismos contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento contra los límites permisibles de EPA	105
4.2.4 Salinidad	107
4.2.5 Clasificación de los lodos de las plantas de tratamiento de agua residual en base a los rangos establecidos para metales pesados por la EPA	108
4.2.6 Selección de los lodos para uso agrícola en base a las normas de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA)	109

4.3 Tercera etapa	110
4.3.1 Clima	110
4.3.2 Topografía	113
4.3.3 Geología	115
4.3.4 Hidrología	118
4.3.5 Edafología	123
4.3.6 Cultivo	151
4.4 Cuarta Etapa	153
4.4.1 Nutrientes y materia orgánica contenidos en el lodo de la planta Noreste	153
4.4.2 Estimación de la mineralización del nitrógeno orgánico	154
4.4.3 Estimación del nitrógeno disponible	156
4.4.4 Estimación del fósforo disponible	157
4.4.5 Estimación del potasio disponible	158
4.4.6 Contenido de N, P y K disponibles para las plantas y MO	158
4.4.7 Estimación de las dosis de aplicación de lodo en base a nitrógeno y superficie de suelo que se requeriría para aplicar los lodos generados en un año en la planta Noreste	159
4.4.8 Estimación de la máxima carga de lodo que se puede aplicar por unidad de superficie en base al contenido de metales pesados en los suelos del área de estudio	160
4.4.9 Número de años que puede utilizarse el lodo como suplemento parcial de fertilizantes en el área de estudio	164
4.5 Quinta etapa	165
4.5.1 Posible ahorro en los costos del tratamiento y disposición de lodos	165
4.5.2 Posible ahorro en los costos derivados por el uso de fertilizantes comerciales usados en la producción de los cultivos en el área de estudio	168
4.5.3 Ahorro anual	174
5. CONCLUSIONES	175
6. RECOMENDACIONES	178
7. LITERATURA CITADA	180

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
2-1	Resumen de las características típicas de las prácticas de aplicación de lodo al suelo.	10
2-2	Efecto de los procesos de tratamiento del lodo residual sobre las prácticas de aplicación (U.S. EPA, 1984).	30
2-3	Principales patógenos en el lodo y agua residual municipal.	34
2-4	Niveles típicos de patógenos en los lodos líquidos digeridos anaerobicamente y lodos desestabilizados.	35
2-5	Niveles típicos de nutrientes identificados en el lodo (Sommers, 1977; Furr <i>et al.</i> , 1976).	39
2-6	Concentraciones promedio de metales en el lodo comparado con los límites máximos de concentración (adaptado de U.S. EPA, 1990).	43
2-7	Niveles típicos de nutrientes en el lodo de diferentes procesos de tratamiento (Sommers, 1977).	49
2-8	Impactos posibles de las regiones climáticas sobre la aplicación de lodo.	52
2-9	Pendientes recomendadas para la aplicación de lodo.	53
2-10	Limitaciones del suelo para la aplicación del lodo a los terrenos agrícolas en Wisconsin (Keeney <i>et al.</i> , 1975).	54
2-11	Profundidades recomendadas para el agua subterránea.	57
2-12	Límites para metales pesados de la Parte 503, para la aplicación de lodo al suelo.	60
2-13	Factores de mineralización (K_{min}) para diferentes lodos (Adaptado de Sommers <i>et al.</i> , 1981).	62
2-14	Perdidas de volatilización de NH_4 como NH_3 .	64
3-1	Características principales de las plantas: Norte, Noreste y Dulces Nombres.	70
3-2	Parámetros que determinan si un residuo es corrosivo.	71
3-3	Parámetros que determinan si un residuo es peligroso debido a su reactividad.	72
3-4	Parámetros que determinan a un residuo peligroso debido a su explosividad.	72
3-5	Compuestos inorgánicos de mayor preocupación.	73
3-6	Compuestos orgánicos no volátiles de mayor preocupación.	73
3-7	Compuestos orgánicos volátiles de mayor preocupación.	73
3-8	Parámetros que determinan si un residuo es peligroso por su inflamabilidad.	74
3-9	Metales regulados bajo la 40 CFR Parte 503 y límites permisibles para la aplicación de lodo al suelo.	75
3-10	Químicos orgánicos identificados en la evaluación de riesgos de EPA y límites permisibles para la aplicación de lodo al suelo.	76
3-11	Límites permisibles o aceptables de microorganismos contenidos en los lodos para la aplicación al suelo, reportados por la EPA.	76
4-1	Resultados de corrosividad del lodo de la planta Dulces Nombres contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	82
4-2	Resultados de reactividad del lodo de la planta Dulces Nombres contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	82
4-3	Resultados de explosividad del lodo de la planta Dulces Nombres.	82
4-4	Resultados de toxicidad para compuestos inorgánicos del lodo de la planta D. N. contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	83
4-5	Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos no volátiles del lodo de la planta D. N. contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	83
4-6	Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos volátiles del lodo de la planta D. N. contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	84
4-7	Resultados de inflamabilidad del lodo de la planta Dulces Nombres	85
4-8	Resultados de corrosividad del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	87
4-9	Resultados de reactividad del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	87

4-10	Resultados de explosividad del lodo de la planta Dulces Nombres.	87
4-11	Resultados de toxicidad para compuestos inorgánicos del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	88
4-12	Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos no volátiles del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	88
4-13	Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos volátiles del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993	89
4-14	Resultados de inflamabilidad del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	92
4-15	Resultados de la prueba del biológico infeccioso del lodo de la planta Norte.	92
4-16	Resultados de corrosividad del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	92
4-17	Resultados de reactividad del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	93
4-18	Resultados de explosividad del lodo de la planta Noreste.	93
4-19	Resultados de toxicidad para compuestos inorgánicos del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	94
4-20	Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos no volátiles del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	95
4-21	Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos volátiles del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	97
4-22	Resultados de inflamabilidad del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.	98
4-23	Resultados de la prueba del biológico infeccioso del lodo de la planta Noreste.	99
4-24	Metales contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento de agua residual, y límites permisibles de EPA para la aplicación de lodo al suelo (mg de metal/kg de lodo seco).	102
4-25	Químicos orgánicos sintéticos contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento contra los límites recomendados de la EPA (mg/kg ps).	104
4-26	Microorganismos presentes en los lodos de las tres plantas de tratamiento contra los límites permisibles o aceptables de microorganismos de la EPA para la aplicación al suelo de lodos residuales de EPA.	106
4-27	Salinidad del lodo de la planta Noreste comparado con un suelo normal y un suelo ligeramente salino.	107
4-28	Metales contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento y en los lodos de varios tipos de agua residual reportados por la EPA (mg de metal/kg de lodo seco).	108
4-29	Temperatura y precipitación media mensual y anual de las estaciones del área de estudio.	110
4-30	Principales grupos mayores de suelo y unidades en el área de estudio.	123
4-31	Principales grupos mayores de suelo encontrados en el área de estudio y superficie abarcada.	125
4-32	Características físicas y químicas de un Calcisol lúvico del área de estudio.	127
4-33	Características físicas y químicas de un Calcisol háplico del área de estudio.	128
4-34	Características físicas y químicas de un Castañozem lúvico en el área de estudio.	130
4-35	Características físicas y químicas de un Castañozem háplico en el área de estudio.	132
4-36	Características físicas y químicas de un Fluvisol calcárico en el área de estudio.	133
4-37	Características físicas y químicas de un Leptosol lítico en el área de estudio.	135
4-38	Características físicas y químicas de un Leptosol rendzico en el área de estudio.	136
4-39	Características físicas y químicas de un Regosol calcárico en el área de estudio.	138
4-40	Características físicas y químicas de un Vertisol crómico del área de estudio.	140
4-41	Características físicas y químicas de un Vertisol háplico del área de estudio.	141
4-42	Resultados de los análisis para metales pesados contenidos en los suelos (profundidad de 0-15 cm) de ocho lugares del área de estudio.	145
4-43	Promedio de los análisis de suelo para metales de cada uno de los lugares muestreados contra los niveles típicos encontrados en los suelos de Ontario y E.U.A. y límites máximos acumulativos de la EPA (mg/kg de suelo).	146

4-44	Promedio de los suelos que no han recibido aplicaciones de metal y suelos que ya han recibido, máxima cantidad de metal que pudiera agregarse a estos, promedio en suelos de E.U.A., límite máximo acumulativo de EPA y concentración aceptable en suelos de E.U.A.(mg/kg de suelo).	146
4-45	Principales parámetros para la selección de los grupos mayores de suelos y rangos recomendados.	150
4-46	Superficies sembradas con cultivos bajo riego durante el ciclo agrícola otoño- invierno 97/98.	151
4-47	Superficies sembradas con cultivos bajo riego durante el ciclo agrícola primavera-verano 98/98.	152
4-48	Superficies sembradas con cultivos bajo temporal durante el ciclo agrícola primavera-verano 98/98.	152
4-49	Contenido de nutrientes y MO en el lodo de la planta Noreste versus nutrientes contenidos en fertilizantes comerciales.	154
4-50	Estimación del nitrógeno mineralizado del N orgánico en diferentes años de producción por cada tonelada de lodo que se aplique al suelo por ha.	156
4-51	Estimación del ND considerando pérdidas de NH_4 como NH_3 debido a los tipos de lodo y métodos de aplicación (kg/ton de lodo peso seco).	157
4-52	N, P, K disponibles por tonelada de lodo (kg/ton de lodo peso seco).	158
4-53	Estimación de las dosis de aplicación de lodo y superficie necesaria para aplicar los lodos generados en un año, considerando: cultivo, demanda de N y método de aplicación del lodo.	160
4-54	Estimación de la máxima carga de lodo para los suelos del área de estudio en base a los límites máximos acumulativos para metales.	161
4-55	Cantidades de metales pesados agregados por el lodo de acuerdo al cultivo, dosis y método de aplicación.	162
4-56	Número de años útiles para los suelos de Marín-Zuazua de acuerdo al tipo de cultivo, dosis y método de aplicación y máxima carga de lodo.	164
4-57	Número de años útiles para los suelos de Agua Fría, Dulces Nombres y Santa Rosa de acuerdo al tipo de cultivo, dosis y método de aplicación y máxima carga de lodo.	165
4-58	Costo de los procesos de tratamiento y disposición del lodo.	166
4-59	Costos que se derivarían al aplicar el lodo en forma deshidratada ya sea como suplemento parcial de fertilizantes o mejorador de suelos.	167
4-60	Costos de producción promedio de los principales cultivos con potencial para recibir lodos en el área de estudio, correspondiente al año de 1998.	169
4-61	Precio de los principales fertilizantes comerciales.	169
4-62	Costo total de fertilización de acuerdo al cultivo, en el área de estudio para el año de 1999.	172
4-63	Cantidad de N, P y K disponibles en el lodo al año que podrían aprovecharse en la producción de los cultivos de acuerdo al tipo y método de aplicación del lodo, así como su equivalencia a fertilizante comercial y costo de éstos.	172
4-64	Fertilizante comercial requerido para satisfacer las demandas de N y P y costo al año.	173
4-65	Ahorro anual que se tendría al utilizar el lodo deshidratado sobre el sorgo forrajero y el trigo.	173
4-66	Ahorros anuales estimados.	174

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2-1	Confinamiento de lodo deshidratado en un relleno sanitario (Pissani, 1998).	8
2-2	Aplicación de lodo deshidratado (Pissani y Guzmán, 1999).	13
2-3	Aplicación de lodo deshidratado sobre terreno forestal.	14
2-4	Aplicación superficial del lodo líquido mediante un camión cisterna (Pissani y Guzmán, 1999).	21
2-5	Tractor equipado con sistema de inyección de lodos.	22
2-6	Sistema de riego por surcos.	23
2-7	Aplicación de lodo deshidratado.	24
2-8	Diagrama de generación, procesos básicos de tratamiento y uso del agua y lodo residual. Adaptado de Ostergaard H. B., 1997.	28
2-9	Ciclo de los metales en la cadena trófica. Adaptado de Ostergaard H. B., 1997.	44
2-10	Procesos de los metales pesados en el sistema suelo-agua. Adaptado de Ostergaard H. B., 1997.	45
2-11	Procesos de tratamiento del lodo residual antes de su utilización agrícola.	51
3-1	Localización de las plantas de tratamiento de aguas residuales: Norte, Noreste y Dulces Nombres. Nuevo León.	71
4-1	Tipos de clima que predominan en el área de estudio de acuerdo a la clasificación climática de Koppen modificada por García (1976).	111
4-2	Plano topográfico del área de estudio.	114
4-3	Plano geológico del área de estudio.	117
4-4	Plano de hidrología subterránea del área de estudio.	120
4-5	Plano de hidrología superficial del área de estudio.	122
4-6	Plano edafológico del área de estudio.	124
4-7	Estructura del costo de producción por actividad de los principales cultivos agrícolas en el área de estudio (participación porcentual).	170

1. INTRODUCCION

A principios del siglo, las aguas residuales de la mayoría de las comunidades se vertían directamente a ríos y corrientes mediante alcantarillado unitario. La acumulación de lodos y el desarrollo de olores y condiciones desagradables surgieron como consecuencia de esta práctica. Para solventar estos problemas se introdujo la evacuación separada de las aguas residuales y de las aguas pluviales, y el tratamiento de las aguas residuales. El problema de la evacuación de lodos surgió como una consecuencia de los grandes volúmenes de lodo que se empezaron a generar con la aparición de métodos de tratamiento de las aguas residuales más modernos y eficientes.

La evacuación final de los residuos sólidos, semisólidos (lodo) y contaminantes concentrados separados del agua residual mediante los diversos procesos de tratamiento, ha sido y continúa siendo uno de los problemas más complejos y costosos en el ámbito de la ingeniería de aguas residuales (Metcalf y Eddy, 1991).

En algunas ciudades del país, como Monterrey, existen sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales municipales, y la industria de esta zona ha reutilizado dichas aguas desde 1955; liberando aguas de fuentes naturales para la población como consecuencia del grave problema de escasez de agua.

Actualmente la ciudad de Monterrey y su zona metropolitana cuentan con 21 plantas de tratamiento de aguas residuales de las cuales 18 son de la iniciativa privada que en conjunto producen aproximadamente 3,368 lps de aguas residuales tratadas y tres de la paraestatal Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D. (S.A.D.M.) con una producción aproximada de 8,000 lps de aguas residuales tratadas. Como resultado de los procesos de separación del agua y de los sólidos sedimentables se generan

aproximadamente 120 toneladas diarias de lodos, los cuales actualmente son confinados en un relleno sanitario ubicado en la planta de tratamiento Dulces Nombres, Pesquería, N.L. Las sustancias contaminantes que pueden estar contenidas en dichos lodos provienen de una amplia gama de desechos domésticos, industriales y del comercio. Estos lodos contaminados pueden ocasionar a su vez varios problemas para su tratamiento y disposición, además del alto costo que esto puede representar (Pissani, 1998).

En los países desarrollados, el interés de la aplicación del lodo al suelo se ha incrementado en los años recientes por su accesibilidad y factibilidad en comparación con otras opciones de evacuación de lodo, tales como relleno sanitario, incineración y disposición al océano; éstas últimas opciones han disminuido. No obstante la evacuación al terreno y a los vertederos está viéndose sometida a una legislación cada vez más estricta (Outwater, 1994).

Outwater (1994) menciona que la aplicación del lodo al suelo está siendo considerada como uno de los métodos de disposición más atractivos, debido a su costo relativamente bajo y a su potencial como una amplia solución de aplicación.

La aplicación al suelo se diseña con el objetivo de conseguir un tratamiento adicional del lodo. La luz solar, los microorganismos del suelo y la desecación, se combinan para destruir los organismos patógenos y muchas de las sustancias tóxicas presentes en el lodo. Los metales traza quedan atrapados en la matriz del suelo, y los nutrientes los consumen las plantas y los convierten en biomasa útil, los lodos tratados se pueden utilizar como un sustituto parcial de fertilizantes químicos costosos y pueden actuar como mejoradores o acondicionadores del suelo para facilitar el transporte de nutrientes, aumentar la retención del agua y mejorar la aptitud del suelo para el cultivo. (Pissani, 1990; Metcalf y Eddy, 1991).

La aplicación de lodo a los suelos está muy extendida como método de evacuación, así como de recuperación de terrenos marginales para usos productivos y aprovechamiento de los nutrientes contenidos en el lodo, principalmente nitrógeno y potasio. El lodo puede

aplicarse a suelos agrícolas, forestales, para rehabilitar terrenos marginales o en sitios de contacto público (parques, jardines, cementerios, etc.). La aplicación de lodo al suelo ha sido practicada satisfactoriamente desde antes de los años de 1940 y ha sido una práctica común en los E.U.A., debido a su costo relativamente bajo y a su potencial como una amplia solución de disposición (Metcalf y Eddy, 1991).

Aproximadamente el 33% de 5.4 millones de toneladas métricas secas de lodo generadas anualmente en los Estados Unidos de América son aplicadas al suelo. De esa cantidad que se aplica al suelo, el 67% se aplica a los suelos agrícolas, el 3% a suelos forestales, el 9% para rehabilitar terrenos marginales, otro 9% se aplica sobre sitios de contacto público y el 12% se distribuye o comercializa en sacos para aplicarse al suelo.

En las regiones áridas y semiáridas, las aplicaciones de lodo pueden ser una fuente significativa de materia orgánica y nutrientes que pueden ser utilizados benéficamente para el crecimiento de los cultivos y pueden aportar apreciables cantidades de nitrógeno y fósforo además de potasio, este último en menor concentración. Además de suministrar macro y micronutrientes, por lo general, el lodo contiene de 30-60% de materia orgánica la cual puede mejorar las propiedades físicas del suelo tales como: estructura, capacidad de retención del agua, infiltración, aireación, por lo cual facilita la labranza y disminuye la erosión de los suelos. La materia orgánica de los lodos aumenta la capacidad de intercambio catiónico y la actividad microbiológica de los suelos, por lo tanto, el lodo en general mejora las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de los suelos.

En áreas de poca precipitación e irrigadas, los constituyentes del lodo tales como las sales solubles y el boro (B) deben considerarse también cuando se determinan las dosis de aplicación de lodo. Altas concentraciones de salinidad en las capas arables pueden impedir la germinación y el rápido desarrollo de la semilla. Excesiva salinidad puede causar dispersión del suelo, reducir la velocidad de infiltración y la aireación del suelo causando cambios en la estructura del suelo que hace más difícil su labranza (Jacobs et al., 1993).

Muchos de los agostaderos de las regiones áridas y semiáridas han sido degradados por sobre pastoreo, fuego, erosión del aire y prácticas de manejo. La aplicación de lodo a estos lugares puede incrementar el suelo y la vegetación (Aguilar et al., 1994). Los beneficios pueden incluir el incremento de la productividad de los agostaderos; mejorar la calidad del forraje; incrementar la absorción de la precipitación y la humedad del suelo; reducir el escurrimiento; incrementar la germinación y poblaciones de pastos favorables; menor competencia por la invasión de matorrales y malezas; y decrecer el potencial de la erosión (Fresquez et al., 1990; Gallier et al., 1993; Peterson and Madison, 1992; Pierce et al., 1992). Además, las localizaciones remotas de la mayoría de los agostaderos minimizan la preocupación pública acerca de olores, vectores y traficabilidad.

Seoanez (1995) menciona que es indudable que la utilización de los lodos aplicados a los suelos agrícolas plantea una serie de problemas en cuanto a las repercusiones sanitarias que dicha práctica puede tener. Al menos, parte de las posibles repercusiones han sido profundamente estudiadas y prácticamente en todas las legislaciones sanitarias se da una serie de normas o límites para la utilización agrícola de las aguas y lodos residuales. Más o menos justificadas científicamente, todas ellas se encaminan a proteger de la contaminación los vegetales destinados al consumo humano o animal y el medio ambiente.

Por lo tanto, existe inseguridad acerca de las consecuencias ambientales de la aplicación del lodo al suelo; este método está limitado fuertemente por la presencia de metales o compuestos tóxicos asociados con el lodo, así como de microorganismos patógenos. Cuando los productos del lodo son usados juiciosamente el riesgo a la salud humana y al ambiente es insignificante. Cuando se siguen las reglas de aplicación y buenas prácticas de manejo del lodo, rara vez se reportan efectos dañinos a los humanos, a la fauna o al ambiente como resultado de la aplicación de productos del lodo al suelo (Environment Canada, 1984; U.S EPA, 1979; 1983).

Objetivos:

- Caracterización preliminar CRETIB para determinar la peligrosidad del lodo de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales de Monterrey, N.L. de acuerdo a su: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico infeccioso según la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993 que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al medio ambiente.
- Selección de los lodos que tienen aptitud para usarse como fertilizantes y/o mejorador de suelos según las normas de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) 40 CFR Parte 503 (Estándares para el uso y disposición de lodos residuales, que establecen los requerimientos para la aplicación al suelo de los lodos residuales) y considerando criterios de salinidad para las zonas áridas y semiáridas.
- En función de los factores siguientes: clima, topografía, geología, hidrología: subterránea y superficial, edafología, y patrones de cultivo determinar la factibilidad de aplicar los lodos a los suelos agrícolas de los municipios siguientes: Apodaca, General Zuazua, Marín y Pesquería, N.L.
- Cuantificar la superficie de suelo de los cuatro municipios (Apodaca, General Zuazua, Marín y Pesquería) que se requeriría para aplicar todo el lodo seleccionado generado durante un año, de acuerdo a las necesidades de nutrientes de los cultivos, así como el número de años que podrían utilizarse.
- Análisis económico para determinar el posible ahorro económico con el uso del lodo como suplemento parcial de fertilizantes o mejorador de suelos, en los procesos de tratamiento y disposición del lodo, así como en los costos derivados por el uso de fertilizantes comerciales usados en la producción de los cultivos en el área de estudio.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 Lodo residual y Biosólidos

El lodo residual se define como los residuos sólidos, semisólidos o líquidos, removidos en los procesos de tratamiento primario, secundario o avanzados del agua residual. El lodo incluye escorias o sólidos removidos en los procesos de tratamiento y cualquier material derivado del lodo (por ejemplo, una mezcla de lodo y fertilizante) pero no incluye a los granitos de arena, cribados y cenizas generadas por la combustión del lodo en un incinerador (U.S. EPA, 1995a).

El término biosólido se originó dentro de la industria del tratamiento de aguas residuales, tratando de definir la porción descontaminada y agrícolamente viable de los lodos residuales generados por los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Actualmente es utilizado para describir a los lodos que contienen principalmente productos orgánicos con altos contenidos de nutrimentos esenciales para las plantas que pueden ser benéficamente reciclados como fertilizantes y mejoradores de suelo (Pissani, 1998).

Según Sorber (1994) el término lodo difiere de biosólido, éste último se refiere a un producto tratado que es cuidadosamente verificado y periódicamente reutilizado a través de aplicaciones innovativas.

2.2 Disposición del lodo

Los métodos de disposición del lodo más usados en la actualidad son: confinamiento en relleno sanitario, incineración y aplicación al suelo, éste último ha ido

incrementado interés en los últimos años por su accesibilidad y factibilidad en comparación con los otros métodos de disposición (Metcalf y Eddy, 1991).

2.2.1 Confinamiento del lodo

El confinamiento del lodo puede definirse como la disposición planeada de los sólidos del agua residual incluyendo: lodo, arenas y cenizas sobre un sitio diseñado donde son enterrados y monitoreados. El lodo es llevado al confinamiento por camiones que recogen el lodo de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Hay varios tipos de confinamientos, pero el método más usado a menudo es el que consiste en deshidratar el lodo para después transportarlo por medio de camiones al relleno sanitario, este lodo deshidratado contiene aproximadamente 80% de humedad y 20% de sólidos. Los camiones tiran el lodo dentro del relleno (Figura 2-1), en donde los tractores se encargan de enterrarlo usando una de las dos técnicas especiales de enterramiento. Estas técnicas utilizan el espacio más eficientemente y forman una pendiente para el drenaje de la precipitación.

Los 5 métodos de confinamiento más utilizados en la actualidad consisten en:

1. Tirar el lodo en arena y grava dentro de un pozo abierto previamente y cavado por un bulldozer, el pozo es tapado posteriormente para controlar olores y otros problemas.
2. Tirar el lodo en un terreno y nivelarlo.
3. Tirar el lodo sobre la superficie del relleno y mezclar con basura durante la compactación.
4. Tirar el lodo dentro de un pozo.
5. Deshidratar el lodo en la planta de tratamiento, después se lleva al relleno, se tira y se entierra inmediatamente.



Figura 2-1. Confinamiento de lodo deshidratado en un relleno sanitario (Pissani, 1998).

2.2.1.1 Impacto ambiental del confinamiento de los lodos

Los dos contaminantes de preocupación ambiental de la disposición por confinamiento de los desperdicios son los gases y lixiviados. El lixiviado es generado debido a que el agua penetra al relleno y el gas debido a la descomposición de la materia orgánica.

La producción de gas de la materia orgánica empieza antes de que sea confinado. Los principales gases que son generados de la descomposición de la materia orgánica son el dióxido de carbono y metano. El dióxido de carbono es importante en las áreas con agua de buena calidad, debido a que es soluble con el agua, contrario de otros gases que pueden producirse dentro del relleno los cuales son insolubles. Cuando el dióxido de carbono se disuelve en el agua baja el pH, el cual crea una corrosividad ambiental. También crea un incremento en la dureza del agua. Usualmente el efecto del dióxido de carbono es mayor durante los primeros meses de descomposición y puede continuar por algunos años.

La producción de lixiviados dentro de un relleno depende de las cantidades de agua que entran en el relleno. La lixiviación resulta cuando la cantidad de agua que entra excede la cantidad de agua que puede ser retenida por el residuo. Esta es una razón para que la investigación del terreno y las características del suelo sean esenciales para el diseño de los

rellenos. Las causas principales de la intrusión de los excesos de agua son debidas a un incremento de los niveles freáticos. Otras consideraciones que deben evaluarse son la topografía y el clima del lugar, debido a que esos dos factores pueden causar un impacto dramático sobre el relleno si estos no son evaluados apropiadamente. El mejor método para manejar los lixiviados es prevenir o limitar su producción desde los orígenes.

2.2.2 Incineración

Uno de los métodos más populares de la disposición de residuos es la incineración. La incineración es la destrucción completa de materiales por medio de calor a sus constituyentes inertes. Este material que es destruido es el producto residual llamado lodo. El lodo residual en forma de torta o pastel normalmente contiene de 55 a 85% de humedad. Este no puede ser quemado hasta que el contenido de humedad sea reducido a por lo menos el 30%. El propósito de la incineración es para reducir el lodo a su volumen mínimo, como la ceniza. Hay tres objetivos en la incineración que deben cumplirse: secar la torta de lodo, destruir el contenido de sólidos volátiles por medio de calor y producir un residuo estéril o ceniza. Las cenizas generadas por la incineración de los lodos son llevadas a un relleno sanitario o son usadas para concreto.

Hay cuatro tipos básicos de incineradores usados en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Estos son el incinerador de múltiple coraza, el incinerador de cama fluida, el horno eléctrico y el horno ciclónico. Cada sistema tiene su método distinto de incineración y mientras uno puede ser más eficiente en costos, otro puede tener más impacto sobre el medio ambiente.

2.2.2.1 Impacto ambiental de la incineración de los lodos

Uno de los impactos ambientales que tiene la incineración de los lodos es sobre el aire. El humo descargado de los incineradores o flujo de gas debe ser incoloro. El flujo de gas es una emisión principalmente hecha de nitrógeno, dióxido de carbono y oxígeno. Hay indicios de cloruros y sulfuros en el gas, si los niveles llegan a ser altos, éstos pueden

causar la posibilidad de corrosión. Con respecto al color de la descarga, si hay una cantidad significativa de partículas en la emisión, éstas serán detectadas por el color. El chorro puede variar de una apariencia negra a una apariencia blanca y tendrá un rastro amarillo claro a marrón oscuro. La descarga puede también tener olores no deseados que juntos con el color de las emisiones deben controlarse adecuadamente para ocasionar daños mínimos.

2.2.3 Aplicación de lodo a los suelos

El método de aplicación de lodo al suelo ofrece diferentes alternativas o prácticas de aplicación: 1) aplicación del lodo a terrenos agrícolas; 2) aplicación de lodo a terrenos forestales; 3) recuperación de terrenos marginales y 4) aplicación de lodo a sitios de contacto público, jardines, etc.

Cada una de las prácticas tiene ventajas y desventajas en términos de la calidad y cantidad del lodo que puede utilizarse y de los requerimientos para el sitio de aplicación. El Cuadro 2-1 resume las características típicas de las prácticas de aplicación de lodo al suelo.

Cuadro 2-1. Resumen de las características típicas de las prácticas de aplicación de lodo al suelo.

Característica	Aplicación a suelos agrícolas^a	Aplicación a suelos forestales	Rehabilitación y recuperación de terrenos	Aplicación a sitios de contacto público, jardines, etc.
Dosis de aplicación	Variada; el rango normal en peso seco es de 2 a 70 ton/ ha/año (1 a 30 Ton/ac/año) dependiendo del tipo de cultivo, características del lodo, etc. El rango típico es de 10 ton/ha/año (5 Ton/ac/año).	Variada; el rango normal en peso seco es de 10 a 220 ton/ha/año (4 a 100 Ton/ ac/año) dependiendo del suelo, especies de arboles, calidad del lodo, etc. El rango típico es de 18 ton/ ha/año (8 Ton/ac/año) ^b .	Variada; el rango normal en peso seco es de 7 a 450 ton/ha/ año (3 a 200 Ton/ac/ año). Usualmente la aplicación es sólo una vez.	Variada dependiendo del uso (cultivos, césped, etc.). El rango típico es de 18 ton/ha/año (8 Ton/ha/ año).
Frecuencia de aplicación	Típicamente repetida anualmente, usualmente entre la cosecha y la siembra. La calendarización puede ser compleja con grandes cantidades de lodo.	Usualmente aplicado anualmente o en intervalos de 3 a 5 años.	Usualmente una aplicación.	Varias, dependiendo del uso.
Propiedad de los sitios de aplicación	Usualmente propietarios de tierras privadas. Las condiciones de aplicación a menudo son por un contrato entre el agricultor y el municipio.	Usualmente propietarios de firmas privadas para la reproducción de arboles o agencias gubernamentales en el ámbito estatal o federal.	Usualmente propietarios de firmas mineras o agencias gubernamentales a nivel estatal o federal.	Usualmente propietarios privados; algunos sitios de contacto público pueden ser propiedad de una agencia gubernamental (parques etc.).

Cuadro 2-1. Resumen de las características típicas de las prácticas de aplicación de lodo al suelo (continuación).

Característica	Aplicación a tierras agrícolas^a	Aplicación a tierras forestales	Rehabilitación y recuperación de terrenos	Aplicación a sitios de contacto público, jardines etc.
Vida útil de los sitios de aplicación	Usualmente no limitada para los lodos con bajo contenido de metales, típicamente de 20-100 años o más. ^b	Depende del metal contenido en el lodo, puede variar de 20 a 55 años o más. ^b	Usualmente una aplicación que ayude a revegetar el terreno.	Varía, posiblemente 32 o más años. ^b
Complejidad del transporte del lodo y costos	Puede ser costoso si son muchos agricultores y las distancias de transportación son complicadas.	Depende de la distancia a los suelos forestales y de los caminos dentro del lugar.	Depende de la distancia a los suelos disturbados.	Puede incluir el transporte del lodo desde la planta de tratamiento de agua residual al centro de procesamiento, el transporte de materiales para composteo, y distribución del lodo procesado.
Calendarización	La calendarización puede dificultarse, debido a que los trabajos de aplicación deben hacerse cerca de la siembra y de la cosecha y por las pobres condiciones del tiempo.	La calendarización del lodo puede afectarse por el clima y la madurez de los árboles.	La disponibilidad puede afectarse por el clima y la disponibilidad de nuevos sitios.	Varía dependiendo del uso.
Restricciones de aplicación	Usualmente ninguna cuando se usan los vehículos adecuados de aplicación. Puede limitarse por el tipo de cultivo y por metales contenidos en el lodo.	Puede dificultarse si los caminos de acceso están limitados y el terreno está desnivelado. Puede limitarse por los metales contenidos en el lodo.	Usualmente ninguna pero puede complicarse por lo irregular del terreno que es común en los lugares disturbados.	Ninguna; similar a la aplicación superficial de los fertilizantes semisólidos, cal o estiércol de animal.
Reciclaje benéfico de los nutrientes del lodo	Sí. Reduce el uso de fertilizantes comerciales.	Sí. Reduce o elimina el uso de fertilizantes comerciales.	Sí. Reduce o elimina el uso de fertilizantes comerciales.	Sí. Reduce o elimina el uso de fertilizantes comerciales.
Posible beneficio a la condición actual del suelo	Depende de las características existentes del suelo y la cantidad de lodo usado.	Depende de las características existentes del suelo.	Sí. Permite al suelo el soporte de vegetación y retarda la erosión	Depende de las características existentes del suelo y la cantidad de lodo usado.
Mejora en la respuesta del crecimiento vegetal	Puede mejorar la producción; generalmente reemplaza algunos nutrientes de fertilizantes comerciales.	Sí. Proyecta un impacto positivo	Sí. Proyecta un impacto positivo	Depende de las condiciones existentes del suelo y de la cantidad de nutrientes aplicados a la planta.
Disponibilidad de técnicas y literatura pertinente a esta práctica.	Extensiva.	Moderada.	Moderada.	Moderada.

^a ton = tonelada métrica, Ton = tonelada inglesa.

^b Las estimaciones de la vida útil del sitio están basadas en el documento de soporte técnico para la aplicación de lodo residual al suelo (U.S. EPA, 1992). La vida útil del sitio puede alargarse si el lodo no es aplicado cada año.

2.2.3.1 Aplicación de lodo a los suelos agrícolas

La aplicación de lodo a los suelos agrícolas es practicada en la mayoría de los países desarrollados, en E.U.A. se practica casi en todos los estados, y es especialmente común en

Colorado, New Jersey, Pennsylvania, Ohio, Illinois, Michigan, Missouri, Wisconsin, Oregon y Minesota. Cientos de comunidades entre grandes y pequeñas tienen desarrollados programas exitosos de aplicación de lodo a los suelos agrícolas. Esos programas benefician la municipalidad generando el lodo para una aceptabilidad ambiental actual, y para mejores costos en el control de los lodos, los agricultores se benefician también ya que reciben los nutrientes en el lodo para la producción de cultivos, generalmente a costos menores que con los fertilizantes convencionales.

El lodo aplicado a los suelos agrícolas puede aplicarse en dosis iguales o mayores que las dosis agronómicas. La cantidad de nitrógeno disponible o asimilable (ó fósforo) aplicada a un lugar está basada en los requerimientos del cultivo. Esta cantidad de N puede de otro modo aplicarse a un lugar como fertilizante comercial por el agricultor. Para limitar las cargas de N a las recomendaciones de fertilización, el impacto sobre el agua subterránea no debe ser mayor que las operaciones agrícolas usando fertilizantes comerciales o estiércol.

2.2.3.1.1 Ventajas de la aplicación de lodo a los suelos agrícolas

El lodo contiene varios macronutrientes indispensables para las plantas, principalmente N, P y K, y en muchos casos, variadas cantidades de micronutrientes tales como boro (B), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y zinc (Zn).

El lodo también puede ser un valioso acondicionador de los suelos. La adición de materiales orgánicos como el lodo a un suelo arcilloso de textura fina, puede ayudar a que el suelo sea más friable y puede incrementar la cantidad del espacio poroso disponible para el crecimiento de las raíces y para la entrada del agua y aire dentro del suelo. En los suelos arenosos de textura granulosa, los residuos orgánicos como el lodo, pueden incrementar la capacidad de retención del agua en el suelo, suministrar y situar químicos para el intercambio y adsorción de nutrientes. El agua agregada al suelo durante la aplicación del lodo también es un recurso valioso.

Los trabajos de tratamiento para la generación del lodo, pueden ser benéficos, porque en muchos casos la aplicación a los suelos agrícolas es menos costosa que otros métodos alternativos de uso o disposición del lodo. El público en general puede beneficiarse ahorrando costos, resultado de la aplicación del lodo a los suelos agrícolas, y el reciclaje de nutrientes, es atractivo a la preocupación ciudadana con la conservación de recursos y el medio ambiente.

Otra ventaja de la aplicación a los suelos agrícolas es que usualmente las plantas de tratamiento no tienen que adquirir terrenos. El suelo utilizado para la aplicación del lodo es sostenido en producción, esta importancia para futuros usos no es dañada. Usualmente se toman lugares con un marco relativamente rural donde las aplicaciones de lodo son similares a las operaciones convencionales, tales como el esparcido del estiércol de animal (Figura 2-2), y probablemente no llega a ser una molestia pública si es manejado apropiadamente.



Figura 2-2. Aplicación de lodo deshidratado (Pissani y Guzmán, 1999).

2.2.3.1.2 Limitaciones de la aplicación de lodo a los suelos agrícolas

Las dosis de aplicación de lodo para los suelos agrícolas (unidad peso seco del lodo aplicada por unidad de área) son relativamente bajas usualmente. De esta manera, pueden requerirse grandes extensiones de suelo, requiriendo la cooperación individual de muchos propietarios de tierras. Además, el transporte del lodo, debe ser tan eficiente como la

calendarización de aplicación, requiriendo que sea compatible con la siembra agrícola, la cosecha y posibles condiciones climáticas adversas; además se requiere de manejos cautelosos. Si los agricultores que aceptan el lodo son numerosos y están mal distribuidos, un sistema de distribución caro y complicado puede requerirse.

2.2.3.2 Aplicación de lodo a los suelos forestales

Esta práctica también es común en algunos países de Europa, E.U.A. y Canadá (Figura 2-3). En los E.U.A. actualmente el 3% del lodo que se aplica al suelo es aplicado a terrenos forestales, la aplicación de lodo a los terrenos forestales tiene el potencial para ser una práctica de mayor uso. El lodo ha sido aplicado a los suelos forestales en más de 10 estados, por lo menos sobre experimentación a nivel de campo.



Figura 2-3. Aplicación de lodo deshidratado sobre terreno forestal.

Tres categorías de terrenos forestales pueden estar disponibles para la aplicación de lodo:

- Terrenos recientemente desmontados antes de la plantación
- Plantaciones establecidas nuevamente (cerca de 3 a 10 años de edad)
- Bosques establecidos

La disponibilidad de terrenos y consideraciones de aplicación para cada tipo de terreno forestal mencionados anteriormente, determinarán el tipo de lugar o combinación de lugares que serán adecuados para un programa de aplicación de lodo a los suelos forestales.

2.2.3.2.1 Ventajas de la aplicación de lodo a los suelos forestales

El lodo contiene nutrientes y micronutrientes esenciales que a menudo se carecen en los suelos forestales. Estudios (Cole et al., 1983) han demostrado crecimientos acelerados de los árboles, como resultado de la aplicación de lodo a las plantaciones establecidas nuevamente y las ya establecidas. Además, el lodo contiene materia orgánica que puede mejorar las condiciones de los suelos forestales, incrementando la permeabilidad de los suelos arcillosos de textura fina, o incrementando la capacidad de retención del agua de los suelos arenosos.

La localización de las plantas de tratamiento cerca de los terrenos forestales puede ser benéfica, debido a que las aplicaciones de lodo a los suelos forestales pueden ser menos costosas que otros métodos de uso o disposición de lodo. El público en general puede beneficiarse ahorrándose costos por los trabajos de tratamiento del lodo y por la comercialización de árboles que usan el lodo, y el reciclaje de nutrientes es atractivo para la preocupación ambiental de la ciudadanía. Debido a que los bosques son perennes, la calendarización de las aplicaciones de lodo no es tan compleja como los programas de aplicación de lodo a los suelos agrícolas, en donde los ciclos de plantación y cosecha deben considerarse. Una última ventaja de la aplicación de lodo a los suelos forestales es que las plantas de tratamiento no tienen que pagar para adquirir terrenos.

2.2.3.2.2 Limitaciones de la aplicación de lodo a los suelos forestales

Debido a que la aplicación del lodo a los suelos forestales no es muy practicada como las aplicaciones agrícolas, el manejo está más limitado sobre esta práctica. Puede dificultarse el control del acceso público en los suelos forestales enmendados con lodo. El

público está acostumbrado a un libre acceso a las áreas forestales con el propósito de recrearse, y puede tender a ignorar los mensajes en los postes, cercas, etc.

Los accesos dentro de algunas áreas forestales pueden dificultarse para el equipo convencional de aplicación de lodo. El terreno puede estar muy accidentado y obstruido. Pueden requerirse caminos de acceso, o el desarrollo y uso de equipo especial para la aplicación de lodo puede requerirse también.

2.2.3.3 Aplicación de lodo para la recuperación o rehabilitación de terrenos

Las minas superficiales de carbón, la exploración de minerales, los daños generados por las minas subterráneas y las operaciones de las minas, han creado disturbios drásticos en los suelos. Las propiedades de esos suelos marginales y disturbados drásticamente varían considerablemente de un lugar a otro. Su inhabilidad para sostener la vegetación es el resultado de factores severos, tales como:

- **Falta de nutrientes.** El suelo tiene bajos niveles de N, P, K o de micronutrientes.
- **Propiedades físicas.** Los materiales pedregosos o arenosos tienen una capacidad de retención del agua pobre y una capacidad de intercambio catiónico (CIC) baja. Los suelos arcillosos tienen una infiltración, permeabilidad y drenaje pobre.
- **Propiedades químicas.** El pH de los suelos de las minas, y de algunos suelos disturbados drásticamente, varían de muy ácidos a alcalinos. Niveles del potencial de fitotoxicidad del Cu, Zn, Fe y sales pueden estar presentes.
- **Materia orgánica.** Poca.
- **Propiedades biológicas.** La actividad biológica del suelo está generalmente reducida.
- **Topografía.** Muchos de esos suelos están caracterizados por tener pendientes muy accidentadas estando sujetos a erosiones excesivas.

Históricamente, la recuperación de esos suelos está acompañada por nivelaciones de la superficie a pendientes que minimicen la erosión y faciliten la revegetación. En algunos casos se agrega suelo. Los enmendadores de suelo tales como la cal y el fertilizante son agregados, y césped, legumbres y arboles son plantados. Aunque algunas veces esos métodos son exitosos, numerosos fracasos han ocurrido, principalmente debidos a las pobres propiedades físicas, químicas o biológicas de estos suelos.

El lodo puede usarse para regresar el suelo estéril a la productividad o para suministrar la cubierta vegetal necesaria para controlar la erosión del suelo. Una cantidad relativamente grande de lodo puede aplicarse a dichas áreas (7 a 450 ton secas/ha) para suministrar materia orgánica y nutrientes suficientes capaces para sostener vegetación hasta la formación de un ecosistema sostenible. Debido a esas grandes aplicaciones, sólo se hace una aplicación de lodo a esos sitios, EPA permite grandes aplicaciones de lodo sobre estos terrenos pero puede exigir monitoreos del agua superficial y agua subterránea como una condición para la aplicación del lodo, si lo consideran necesario.

Proyectos pilotos de demostración y a gran escala han sido emprendidos en por lo menos 20 estados de E.U.A. para estudiar la aplicación de lodo en la recuperación de terrenos. Los resultados sugieren que el lodo puede usarse satisfactoriamente para recuperar terrenos disturbados cuando la aplicación del lodo es manejada adecuadamente.

2.2.3.3.1 Ventajas de la aplicación de lodo para la recuperación de terrenos

Puede ser extremadamente atractiva la aplicación de lodo en áreas donde existen suelos disturbados y marginales, debido a que beneficia los trabajos de tratamiento para el uso o disposición del lodo y al medio ambiente a través de la rehabilitación de áreas de suelo dañadas severamente.

El lodo tiene varias características que lo hacen conveniente para rehabilitar y mejorar los suelos marginales y disturbados. Una de las muchas cosas importantes es la materia orgánica de los lodos la cual: 1) mejora las propiedades físicas de los suelos, mejora la granulación, reduce la plasticidad y cohesión e incrementa la capacidad de

retención del agua; 2) incrementa la capacidad de intercambio catiónico del suelo; 3) suministra nutrientes a las plantas; 4) incrementa y amortigua el pH del suelo y 5) aumenta la actividad y el rejuvenecimiento de las poblaciones de microorganismos.

La capacidad de amortiguación natural y el pH de la mayoría de los lodos, mejorará moderadamente las condiciones de acidez o la alcalinidad encontrados en muchos suelos mineros. La inmovilización de metales pesados es dependiente del pH, así la aplicación del lodo reduce el potencial de la acidez, y las cargas del metal lixiviado y escurrido. El lodo también es deseado porque los nutrientes contenidos en él pueden substancialmente reducir las necesidades de fertilizante comercial. Además, el lodo ayuda a incrementar el número y la actividad de los microorganismos del suelo.

2.2.3.3.2 Limitaciones de la aplicación de lodo para la recuperación de terrenos

Las especies de plantas vegetales para reforestar un terreno, deben seleccionarse cuidadosamente para su sostenimiento en las condiciones del suelo y clima. Si se planea implantar cultivos para la alimentación de animales o consumo humano, debe cumplirse con los requerimientos de la aplicación de lodo a los suelos agrícolas.

Los lugares a recuperar, especialmente minas viejas abandonadas, a menudo tienen terrenos irregulares y excesivamente erosionados. Una nivelación extensiva y otros pasos de preparación del terreno, pueden requerirse para la aplicación del lodo. Similarmente, los suelos disturbados a menudo tienen patrones irregulares en sus características del suelo. Esto puede causar dificultades en la aplicación del lodo, en la revegetación, y en los futuros sitios de monitoreo.

2.2.3.4 Aplicación de lodo a sitios de contacto público, jardines domésticos y césped

El lodo aplicado a dichos lugares es usado como fertilizante o acondicionador del suelo, sobre terrenos que tienen un alto potencial de contacto público. Esos lugares de contacto público incluyen parques públicos, canchas deportivas, cementerios, viveros, autopistas, campos de golf y aeropuertos entre otros. Usualmente el lodo que es vendido o

regalado en bolsas o en otros contenedores es composteado, o secado a calor. El lodo composteado está seco, prácticamente inodoro y facilita su distribución y manejo. (U.S. EPA, 1993).

Hay dos aspectos básicos para aprobar el uso del lodo en parques y áreas de recreación: 1) rehabilitar áreas para establecer un parque y 2) usar el lodo como un sustituto de fertilizantes convencionales para mantener y establecer la vegetación de los parques.

2.2.3.4.1 Ventajas de la aplicación de lodo a los sitios de contacto público

En algunas áreas de los E.U.A., existe una alta demanda de los lodos embolsados para aplicarse a jardines, parques y céspedes. Esto debido a que los lodos a menudo son vendidos a un precio menor que los fertilizantes comerciales, o es dado gratis. Además, aunque los nutrientes contenidos en muchos lodos son menores que los contenidos en los fertilizantes comerciales, el lodo contiene materia orgánica que puede liberar nutrientes más lentamente, minimizando posibles quemaduras en las plantas (Lue-Hing *et al.*, 1992).

2.2.3.4.2 Limitaciones de la aplicación de lodo a los sitios de contacto público

Requerimientos estrictos, en particular los límites de contaminante para metal y los requerimientos para patógenos, deben tomarse en cuenta para aplicar el lodo a jardines, céspedes y sitios de contacto público. Esto se debe al alto potencial de contacto humano a esos lugares y por que no es posible imponer restricciones a estos lugares cuando el lodo embolsado se aplica al suelo.

Deberán conocerse los límites de contaminantes y los requerimientos para patógenos para que no sea un problema a los tratadores de lodo, algunos tratadores han reportado problemas para cumplir satisfactoriamente esos requerimientos, y las medidas correctivas pueden involucrar incremento en los costos de operación.

En general, los costos de un programa que mercede lodo para usarlo en jardines, céspedes y sitios de contacto público pueden ser mayores que los costos para aplicarlo

directamente al suelo. Mayores costos incluyen la deshidratación de los lodos, procesos para lograr un contenido adecuado de patógenos, reducción de atracción de vectores, mercadeo y transporte.

2.2.3.5 Métodos de aplicación

La selección del método de aplicación del lodo dependerá de las características físicas del lodo (líquido o deshidratado), la topografía del terreno y del tipo de vegetación presente (cultivos anuales, cultivos de forraje existentes, árboles o terrenos sembrados).

2.2.3.5.1 Aplicación del lodo líquido

La aplicación del lodo en estado líquido es interesante debido a su sencillez. No es necesario llevar a cabo procesos de deshidratación y el transporte del lodo líquido se puede realizar por bombeo. Las concentraciones comunes del lodo aplicado al terreno en estado líquido varían entre el 1% y el 10%. El lodo líquido se puede aplicar al terreno con el uso de vehículos o por métodos de riego similares a los empleados para la distribución de agua residual.

La distribución del lodo se puede realizar por distribución en superficie, inyección o incorporación subsuperficial. Los métodos por inyección e incorporación se pueden usar para cumplir los requerimientos de reducción de atracción de vectores de EPA. Las limitaciones que afectan a la aplicación con vehículos incluyen las dificultades de desplazamiento en suelos húmedos, o la posible reducción de la producción de los cultivos como consecuencia de la compactación del suelo producida por el paso de los vehículos. El uso de vehículos equipados con llantas de flotación pueden minimizar estos problemas.

La distribución superficial (Figura 2-4) puede realizarse mediante camiones cisterna equipados con tuberías de distribución montados en la parte posterior, con rociadores o aspersores de cañón de alta capacidad. Este tipo de aplicación es ideal para ser usado en terrenos forestales.

La aplicación superficial con vehículos es el método más comúnmente empleado para la aplicación del lodo a terrenos de cultivos de campo y cultivos de forraje. La aplicación superficial del lodo líquido normalmente está limitada para los suelos con pendientes mayores del 6%.

Después de que el lodo ha sido aplicado a la superficie del suelo y se permite el secado parcial, comúnmente es incorporado por un rastreo u otras opciones de labranza previo a la plantación del cultivo (maíz, soya, pequeños granos, algodón y otros cultivos en hilera), a menos que los sistemas de labranza mínima o labranza cero sean usados.



Figura 2-4. Aplicación superficial del lodo líquido mediante un camión cisterna (Pissani y Guzmán, 1999).

El lodo líquido puede aplicarse también por inyección más abajo de la superficie del suelo (Figura 2-5), la inyección generalmente es el método preferido cuando se quiere aceptación pública. El equipo disponible incluye vagones tanque con inyectoros tirados por tractor (desarrollados originalmente para estiércoles de animal líquido) y camiones pipa con llantas de flotación e inyectoros (desarrollados para la aplicación de lodo).

Las ventajas atribuidas a la aplicación por inyección o inmediata incorporación al suelo incluyen la minimización de la posibilidad de generación de olores y de la atracción de vectores, minimización de las pérdidas de amoníaco por volatilización, eliminación de la escorrentía superficial, y menor percepción del proceso llevado a cabo, debido a la

inmediata mezcla del lodo y suelo, lo cual contribuye a mejorar la aceptación pública de las actividades.



Figura 2-5. Tractor equipado con sistema de inyección de lodos.

El lodo puede ser inyectado dentro del suelo con pendientes arriba del 12%. La inyección puede realizarse antes de la siembra o después de la cosecha para la mayoría de los cultivos, pero es probable que sea inadecuado para la producción de forrajes y céspedes. Algunos inyectores pueden dañar el césped o el forraje establecidos y dejar hendiduras profundas en el campo.

Equipo con inyectores especializados ha sido desarrollado para no dañar los forrajes o céspedes. La inyección deberá hacerse perpendicular a la pendiente para evitar que el líquido corra cuesta abajo a lo largo del corte y se encharque al final de la pendiente.

Los sistemas de riego incluyen el uso de aspersores y el riego mediante surcos. El uso de sistemas de inundación no ha resultado exitoso, y no es recomendable. Los sistemas de irrigación por surcos pueden diseñarse para aplicar lodo durante la temporada de desarrollo del cultivo (Figura 2-6).



Figura 2-6. Sistema de riego por surcos.

El riego por aspersión se ha utilizado, principalmente, en terrenos forestales y, en ocasiones, para la aplicación a terrenos dedicados a la evacuación del lodo que estén relativamente aislados del público y que sean de difícil acceso. Los aspersores pueden funcionar adecuadamente en terrenos demasiado duros o húmedos para el uso de vehículos cisterna y/o sistemas de inyección, y pueden funcionar incluso durante la temporada de crecimiento de los cultivos. Normalmente, para evitar problemas provocados por las obturaciones, se utilizan aspersores de cañón de gran diámetro y gran capacidad.

Los sistemas de irrigación por aspersión generalmente no son usados para aplicar el lodo a forrajes o para cultivos en hilera durante la época de desarrollo, aunque una aplicación ligera para el rastrojo de un cultivo forrajero seguido de una cosecha es aceptable. La adherencia del lodo a la vegetación puede tener efectos perjudiciales sobre la producción del cultivo debido a la reducción de la fotosíntesis.

El uso de aspersores incluye los costos energéticos asociados a las bombas de alta presión, además la irrigación por aspersión tiende a incrementar el potencial de problemas de olores y atracción de vectores, reduce la estética al sitio de aplicación, los cuales pueden conducir a problemas de aceptabilidad pública.

2.2.3.5.2. Aplicación de lodo deshidratado

El lodo deshidratado puede aplicarse a las tierras cultivables por equipo similar que el usado para la aplicación del estiércol de animal (Figura 2-7), pero muchos equipos sofisticados han sido desarrollados con llantas de alta flotación y mejorado su diseño de aplicación. Las concentraciones típicas del lodo deshidratado aplicado al terreno suelen variar entre el 15% y el 30%. La posibilidad de aplicación del lodo mediante distribuidores de abono convencionales constituye una ventaja importante, ya que los agricultores pueden aplicar el lodo al terreno con su propia maquinaria. Otras ventajas incluyen la reducción de costos de transporte, almacenamiento y distribución del lodo.

En la aplicación a terrenos forestales, el uso de lodo deshidratado no suele ser práctico; una vez almacenado y transportado, el lodo se puede devolver a su forma líquida para su aplicación. Típicamente, el lodo deshidratado se aplicará superficialmente y será incorporado por una rastra u otra forma de labranza. La incorporación, de cualquier modo, no es usada cuando el lodo deshidratado es aplicado para el desarrollo de forrajes o para labranza cero o labranza mínima. Para dosis altas de aplicación, se pueden utilizar excavadoras, palas o niveladoras.



Figura 2-7. Aplicación de lodo deshidratado.

2.2.3.6 Epoca de aplicación

El período de aplicación del lodo deberá calendarizarse cerca de la labranza, siembra y operaciones de cosecha, y también puede estar influenciada por el cultivo, clima y propiedades del suelo. El lodo no puede aplicarse durante períodos de mal tiempo.

La aplicación del lodo a los suelos agrícolas que están inundados, congelados o cubiertos por nieve está prohibida si no se asegura que el lodo no entra a las tierras húmedas o agua superficial. La humedad del suelo es una consideración importante, afectando el período de aplicación. La circulación sobre suelos húmedos durante o inmediatamente de precipitaciones pesadas puede resultar en compactación y puede dejar hendiduras profundas en el suelo, haciendo difícil la producción del cultivo y reduciendo la producción.

2.2.3.7 Impacto de la aplicación de lodo sobre los suelos

Hay preocupación de que las aplicaciones de lodo resulten en un incremento de bacterias, patógenos, virus, parásitos, químicos y metales en los cuerpos de agua potable, acuíferos y la cadena alimenticia. También hay preocupación acerca de los efectos acumulativos de los metales en los suelos cultivados. Investigadores señalan que si los metales tales como el zinc, cobre, plomo, níquel, mercurio y cadmio son incrementados en el suelo debido a las aplicaciones del lodo a través de los años, estos pueden ser liberados a niveles dañinos para los cultivos, animales y humanos. Mientras algunos de esos metales son micronutrientes esenciales para las plantas, en niveles altos éstos pueden ser dañinos para las plantas, particularmente para esos cultivos que se desarrollan sobre suelos ácidos (suelos con un pH bajo). El cadmio, es un agente cancerígeno sospechoso y junto con el mercurio causan las mayores preocupaciones debido a sus efectos tóxicos sobre los animales y humanos. Del mismo modo, los compuestos orgánicos sintéticos tales como los PCB y dioxinas, causan preocupación acerca de sus impactos sobre la ecología y salud humana.

El grado del riesgo depende directamente de la calidad inicial del lodo, el procesamiento del lodo y como es manejado el suelo enmendado durante y después de la aplicación del lodo.

Los componentes del lodo también son influenciados por otros aspectos tales como el clima (precipitación y temperatura), manejo del suelo (irrigación, drenaje, encalado, fertilización y adición de enmendadores) y composición del lodo. Desde hace tiempo, el éxito de las aplicaciones del lodo sobre los suelos ha sido influenciado por los malos manejos de factores importantes tales como el pH del suelo. Por ejemplo, la asimilación de muchos metales, tales como el cadmio, está relacionada con el pH del suelo. Si el pH cae más abajo del nivel seguro, los metales pesados se liberarán, incrementando la oportunidad de lixiviaciones y la asimilación por las plantas. Además, la contaminación por nutrientes de las aguas superficiales necesita ser monitoreada cuidadosamente. Los olores asociados con el pobre manejo de las aplicaciones del lodo pueden ser una seria preocupación para esos habitantes que viven cerca de los sitios de aplicación.

Una rápida incorporación del lodo y productos del lodo dentro del suelo y la prevención de acumulaciones, puede ayudar a controlar los problemas de los olores.

En general, los investigadores coinciden que los efectos de los compuestos orgánicos, algunos pesticidas y metales no son peligrosos cuando son manejados apropiadamente en niveles regulados. No obstante, ellos advierten que son indispensables estudios adicionales de los compuestos orgánicos y el destino a largo plazo de éstos materiales antes que las aplicaciones ilimitadas del lodo puedan ocurrir satisfactoriamente sobre todos los suelos.

2.3 Características del lodo residual

Determinar la conveniencia del lodo para aplicarlo al suelo, por la caracterización de sus propiedades, es el primer paso indispensable en la planeación y diseño de un sistema

de aplicación de lodo (U.S. EPA, 1995a). La composición del lodo será fundamental en las siguientes decisiones de diseño:

- Sí el lodo puede ser aplicado al suelo a bajos costos.
- Cual práctica de aplicación es la más factible técnicamente.
- La cantidad de lodo que se aplicará por unidad de área, ya sea anualmente o acumulativamente.
- El grado de control de regularidad y los sistemas de monitoreo requeridos.

Las propiedades más importantes del lodo que se necesitan caracterizar son:

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

La composición del lodo depende principalmente de las características del influente del agua residual que entra a las plantas de tratamiento de aguas residuales y de los procesos de tratamiento usados. Entre más industrializada esté una ciudad, tendrá mayores posibilidades de tener un contenido de metales pesados mayor, y será un problema para la aplicación del lodo al suelo.

Los requerimientos para los pretratamientos industriales y los programas de prevención de contaminantes, así como los procesos avanzados de tratamiento en las aguas residuales y lodos, generalmente tenderán a reducir los niveles de contaminantes del lodo final que sale de las plantas de tratamiento.

La Figura 2-8 muestra la generación, los procesos básicos de tratamiento y el uso del agua y lodo residual.

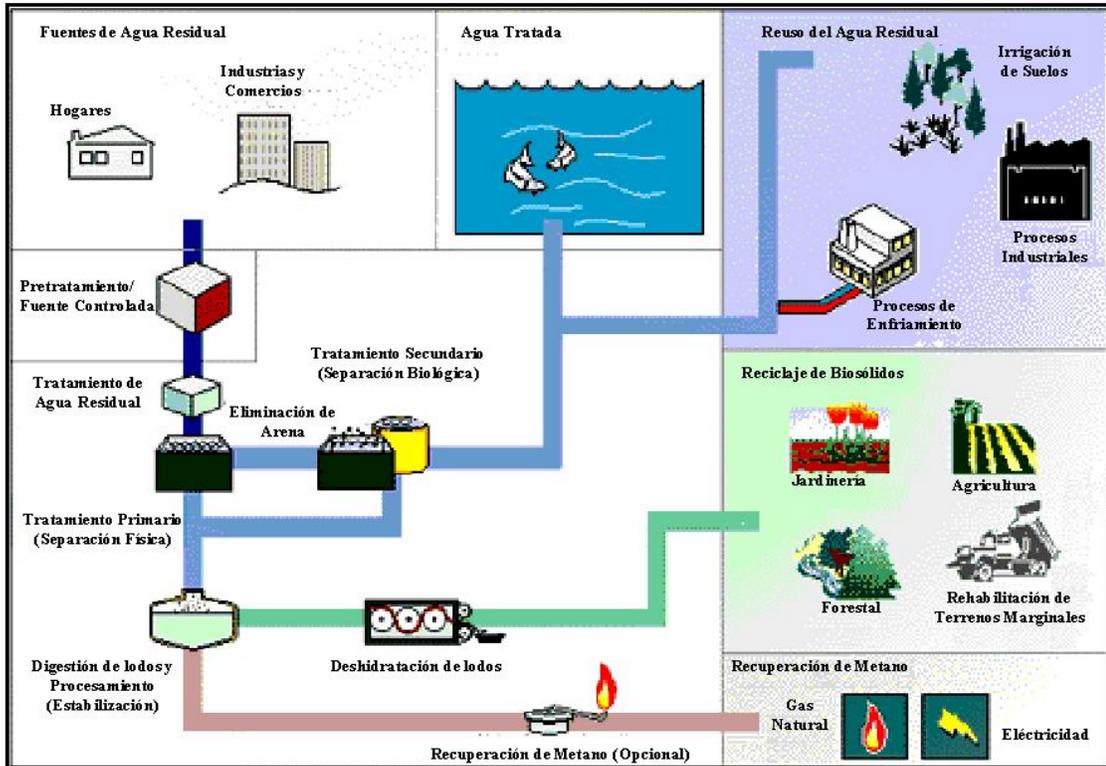


Figura 2-8. Diagrama de generación, procesos básicos de tratamiento y uso del agua y lodo residual. Adaptado de Ostergaard H. B., 1997.

La composición química del lodo puede variar grandemente entre las plantas de tratamiento y también en el tiempo. Esta variabilidad en la composición del lodo, subraya la necesidad de un programa de muestreo firme que aporte una composición estimada confiable del lodo (análisis de un determinado número de muestreos de lodo sobre un período de 2 a 6 meses o más).

2.3.1 Cantidad del lodo residual

La cantidad de lodo que se aplicará al suelo, afectará la evaluación del terreno y el diseño en varios aspectos importantes, incluyendo la superficie de suelo necesaria, tamaño del equipo de transportación, instalaciones de almacenamiento y costos. La cantidad de lodo disponible, también afectará la selección de las prácticas de aplicación (p.e. aplicación a suelos agrícola, forestales, sitios de contacto público o recuperación de terrenos), así como las dosis de aplicación y la agenda de operación.

La cantidad del lodo puede medirse en dos formas: en volumen del lodo húmedo, el cual incluye el contenido de agua y el contenido de sólidos, o en masa de los sólidos secos del lodo. El volumen del lodo es expresado en galones, litros o en metros cúbicos, mientras que la masa usualmente se expresa en términos de peso, en unidades de toneladas métricas. Debido a que el contenido de agua puede ser alto y muy variado, la masa de los sólidos secos del lodo, es usada a menudo para comparar el lodo con las diferentes proporciones de agua (U.S. EPA, 1984).

Los factores importantes que afectan el volumen y masa del lodo, son las fuentes del agua residual y los procesos de tratamiento del agua y lodo residual. Por ejemplo, las contribuciones industriales en las corrientes del agua residual, pueden incrementar significativamente la cantidad de lodo generado de una cantidad dada de agua residual. También, al incrementar el grado de tratamiento del agua residual generalmente incrementa el volumen del lodo residual. Además, como se muestra en el Cuadro 2-2, algunos procesos de tratamiento reducen el volumen del lodo, algunos reducen la masa del lodo y algunos incrementan la masa del lodo mientras mejoran otras características del lodo (U.S. EPA, 1984).

2.3.2 Contenido de sólidos totales

El contenido de sólidos totales (ST) del lodo residual, incluye a los sólidos suspendidos y sólidos disueltos y usualmente es expresado como el porcentaje de los sólidos totales presentes en un lodo residual. Los sólidos totales pueden afectar el potencial de los sistemas de diseño de aplicación del lodo en varios aspectos, incluyendo:

- Tamaño de los sistemas de transportación y almacenamiento. Si el contenido de sólidos es alto, será más bajo el volumen del lodo que se transportará y almacenará debido al bajo contenido de agua que será manejada.
- Modo de transporte. Diferentes tipos de transportación para la aplicación del lodo (pipas, camiones, etc.) serán usados dependiendo del contenido de sólidos del lodo que será aplicado.

- Métodos y equipo de aplicación. Los métodos de aplicación del lodo al suelo (esparcido superficialmente, inyectado o irrigado por aspersión) y los tipos de equipo de aplicación necesarios serán variados dependiendo del contenido de sólidos del lodo.
- Métodos de almacenamiento. Diferentes métodos de almacenamiento serán usados dependiendo del contenido de sólidos (p.e., tanques para el lodo líquido o pilas para el lodo deshidratado).

Cuadro 2-2. Efecto de los procesos de tratamiento del lodo residual sobre las prácticas de aplicación (U.S. EPA, 1984).

Proceso de tratamiento y definición	Efecto sobre el lodo	Efecto sobre las prácticas de aplicación
<p>Espeamiento:</p> <p>Separación por gravedad del agua y sólidos, flotación o centrifugación. (Los espesadores del lodo pueden ser usados como tanques para igualar flujos, para minimizar los efectos de las fluctuaciones de las cantidades de lodo en procesos de tratamiento subsecuentes).</p>	<p>Incrementa la concentración de sólidos en el lodo, debido a la remoción de agua, por medio de esto, baja el volumen del lodo. Puede suministrarse una función mezclada en combinación y mezclar lodo primario y lodo secundario.</p>	<p>Costos de transportación del lodo más bajos para todas las prácticas (agrícolas, forestales, recuperación de terrenos, sitios de contacto público).</p>
<p>Digestión (anaerobia y aerobia):</p> <p>Estabilización biológica del lodo a través de la conversión de un poco de materia orgánica a, agua, bióxido de carbono y metano. (Los digestores pueden ser usados para almacenar lodo para ofrecer mayor flexibilidad a las operaciones de tratamiento y para homogeneizar los sólidos del lodo y para facilitar los procedimientos subsecuentes de manejo.)</p>	<p>Reduce los volátiles y biodegrada el contenido orgánico y la masa del lodo, debido a su conversión de material soluble y gas. Puede reducirse el volumen debido a la concentración de los sólidos. Reduce niveles de patógenos y controla la pudrición y olores.</p>	<p>Reduce la cantidad de lodo.</p>
<p>Estabilización con álcali:</p> <p>Estabilización del lodo mediante la adición de álcali.</p>	<p>Eleva el pH del lodo. Decece temporalmente la actividad biológica. Reduce los niveles de patógenos y controla la putrefactibilidad. Incrementa la masa de los sólidos secos del lodo. Debido a que los efectos del pH son temporales, descomposición, generación de lixiviados, liberación de gas, olores y metales pesados pueden ocurrir a través del tiempo.</p>	<p>El pH alto del lodo estabilizado con cal, tiende a inmovilizar los metales pesados en el lodo, siempre y cuando los niveles del pH sean mantenidos.</p>

Cuadro 2-2. Efecto de los procesos de tratamiento del lodo sobre las prácticas de aplicación (U.S. EPA, 1984) (continuación).

Proceso de tratamiento y definición	Efecto sobre el lodo	Efecto sobre las prácticas de aplicación
<p>Acondicionamiento:</p> <p>Alteración de las propiedades físicas del lodo para facilitar la separación del agua en el lodo. El acondicionamiento puede realizarse de diferentes maneras, por ejemplo, la adición de químicos inorgánicos tales como cal y cloruro férrico; agregando químicos orgánicos tales como polímeros; mezclando lodo digerido con agua y reajustarlo (elutriación); elevando brevemente la presión y temperatura al lodo (tratamiento a calor). El acondicionamiento termal puede causar desinfección.</p>	<p>Mejora las características de deshidratación del lodo. El acondicionamiento puede incrementar la masa de los sólidos secos que serán manejados sin incrementar el contenido orgánico del lodo. El acondicionamiento también puede mejorar la compactibilidad y estabilización del lodo. Generalmente, el lodo tratado con polímeros tiende a ser pegajoso, y menos manejable que otros lodos. Algunos lodos acondicionados son corrosivos.</p>	<p>El lodo tratado con polímeros puede requerir consideraciones especiales de operación para aplicarlos al suelo.</p>
<p>Deshidratación:</p> <p>Separación del agua y sólidos. Los métodos de deshidratación incluyen: filtros de vacío, centrifugadoras, filtros prensa, cintas prensa, lagunas y camas de secado de arena.</p>	<p>Incrementa la concentración de sólidos del lodo mediante la remoción de agua, por medio de esto baja el volumen del lodo. La deshidratación puede incrementar los sólidos del lodo del 15% al 40% para lodo orgánico y 45% o más para algunos lodos inorgánicos. Un poco de nitrógeno y otros materiales solubles son removidos con el agua. Mejora la facilidad de manejo debido a la conversión del lodo líquido a un pastel húmedo. Reduce el combustible requerido para el secado a calor.</p>	<p>Los requerimientos de aplicación son reducidos y disminuyen los costos de transportación para todas las prácticas.</p>
<p>Composteo:</p> <p>Proceso aerobio que incluye la estabilización biológica del lodo en un windrow, pila estática aireada o en un vessel.</p>	<p>Baja la actividad biológica. Puede destruir más patógenos. Degrada el lodo a un material como el humus. Incrementa la masa del lodo debido a la adición de agentes de volumen.</p>	<p>Excelentes propiedades para el acondicionamiento de suelos. Es significativo el almacenamiento que es usualmente usado. Puede contener menos niveles de nutrientes que menos lodo procesado.</p>
<p>Secado a calor:</p> <p>La aplicación de calor mata patógenos y elimina más el contenido de agua.</p>	<p>Desinfecta al lodo. Destruye más patógenos. Baja considerablemente el potencial de olores y actividad biológica.</p>	<p>Reduce grandemente el volumen del lodo.</p>

En general, es menos costoso transportar el lodo con un alto contenido de sólidos (lodo deshidratado) que transportarlo con un bajo contenido de sólidos (lodo líquido). Estos costos ahorrados en transporte deben compararse contra los costos de deshidratación de

lodos. Típicamente, el lodo líquido tiene un contenido de sólidos de 2 a 12% de sólidos, mientras el lodo deshidratado tiene un contenido de sólidos de 12 a 40% de sólidos (incluyendo aditivos químicos). El lodo seco o composteado típicamente tiene un contenido de sólidos encima del 50%.

El contenido de sólidos totales depende, del tipo de lodo residual (primario, secundario o terciario), si el lodo ha sido tratado previo a la aplicación al suelo y cómo fue tratado. Los procesos de tratamiento tales como espesamiento, acondicionamiento, deshidratación, composteo y secado pueden bajar el contenido de agua y así incrementar el porcentaje de sólidos. La eficiencia de esos procesos de tratamiento, de cualquier modo, puede variar substancialmente de un tiempo a otro, produciendo lodo con un contenido de sólidos más bajo que otro anterior. Los sitios de aplicación, por lo tanto, deben diseñarse flexiblemente para adaptar los rangos de las variaciones en el contenido de sólidos en el lodo, que puede ocurrir como un resultado de las variaciones de eficiencia de los procesos de tratamiento del agua y lodo residual. Sin esta flexibilidad, pueden ocurrir problemas de operación en el sitio de aplicación.

2.3.3 Contenido de sólidos volátiles

Los sólidos volátiles del lodo (SV), son compuestos orgánicos que son reducidos cuando el lodo es calentado a 550°C (1,022°F) bajo condiciones de oxidación. El contenido de sólidos volátiles del lodo, da una estimación del contenido del material orgánico. El contenido de sólidos volátiles es comúnmente expresado como el porcentaje de los sólidos totales que son sólidos volátiles. Los sólidos volátiles son un determinante importante de problemas potenciales de olores para los sitios de aplicación. La reducción de los sólidos volátiles es una opción para satisfacer los requerimientos de reducción de atracción de vectores, en E.U.A.. Muchos lodos desestabilizados contienen 75 a 85% de sólidos volátiles base peso seco. Varios procesos de tratamiento, incluyendo digestión anaerobia, digestión aerobia, estabilización con cal y composteo, pueden usarse para reducir el contenido de sólidos volátiles, y así el potencial de olores. Una digestión aerobia, el método más común para estabilización de lodos, generalmente biodegrada cerca del 50% de los sólidos volátiles en un lodo residual.

2.3.4 pH

El pH del lodo puede afectar la producción de los cultivos en los sitios donde es aplicado el lodo, ya que altera el pH del suelo e influencia en la asimilación de metales entre el suelo y la planta. Los niveles de patógenos y el control de vectores, son las mayores razones para ajustar el pH del lodo. Un pH bajo en el lodo (menos de 6.5) promueve lixiviación de metales, mientras un pH alto del lodo (mayor de 11) mata muchas bacterias y, en conjunción con el pH neutro o alto del suelo, puede inhibir el movimiento de metales pesados a través del suelo, Algunas alternativas para la reducción de patógenos incluyen el incremento de los niveles del pH.

2.3.5 Materia orgánica

El nivel relativamente alto de materia orgánica en el lodo, permite al lodo ser usado como un acondicionador de suelos, mejorando las propiedades físicas del suelo (p.e. incrementa la filtración y la capacidad de retención del agua). Las propiedades del lodo para acondicionar suelos son especialmente útiles para la recuperación de terrenos, por ejemplo, para las minas estropeadas.

2.3.6 Patógenos

Los microorganismos causantes de enfermedades conocidos como patógenos, incluyen a las bacterias, virus, protozoos, y huevesillos de helmintos, frecuentemente están presentes en las aguas residuales municipales y en el lodo crudo. Los patógenos pueden representar un peligro para la salud pública, si éstos son transferidos a los cultivos alimenticios sobre los suelos en el cual el lodo es aplicado, contenido en los escurrimientos de los sitios de aplicación a las aguas superficiales, o transportado lejos de los sitios por los vectores tales como insectos, roedores y aves. Por esta razón, EPA especifica los requerimientos para la reducción de patógenos y atracción de vectores que deben cumplirse para el lodo que es aplicado a un suelo. El Cuadro 2-3, menciona los diferentes tipos de patógenos encontrados típicamente en los lodos.

Cuadro 2-3. Principales patógenos en el lodo y agua residual municipal.

Organismo	Síntomas de enfermedad
Bacteria	
<i>Salmonella</i> sp.	Salmonelosis (envenenamiento de alimentos), fiebre tifoidea.
<i>Shigella</i> sp.	Disentería basilaria
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis
<i>Escherichia coli</i> (entero patógena)	Gastroenteritis
Virus Entéricos	
Virus Hepatitis A	Hepatitis infecciosa
Virus Norwalk y Norwalk-like	Gastroenteritis epidémica con diarrea severa
Rotavirus	Gastroenteritis aguda con diarrea severa
Enterovirus	
Poliovirus	Poliomielitis
Virus coxsackie	Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre, escalofrío, diarrea, etc.
Echovirus	Meningitis, parálisis, encefalitis, fiebre, escalofrío, diarrea, etc.
Reovirus	Infecciones respiratorias, gastroenteritis
Astrovirus	Gastroenteritis epidémica
Calicivirus	Gastroenteritis epidémica
Protozoos	
<i>Cryptosporidium</i>	Gastroenteritis
<i>Entamoeba histolytica</i>	Enteritis aguda
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis (incluye diarrea, retorcijones abdominales y pérdida de peso)
<i>Balantidium coli</i>	Diarrea y disentería
<i>Toxoplasma gondi</i>	Toxoplasmosis
Gusanos de helmintos	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Trastornos digestivos y nutricionales, dolor abdominal, vómitos, agitaciones
<i>Ascaris suum</i>	Puede producir síntomas tales como tosidos, dolores de pecho y fiebre
<i>Trichuris trichiura</i>	Dolor abdominal, diarrea, anemia, pérdida de peso
<i>Toxocara canis</i>	Fiebre, molestias abdominales, dolores musculares, síntomas neurológicos
<i>Taenia saginata</i>	Nerviosismo, insomnios, anorexia, dolores abdominales, trastornos digestivos
<i>Taenia solium</i>	Nerviosismo, insomnios, anorexia, dolores abdominales, trastornos digestivos
<i>Necator americanus</i>	Enfermedad de anquilostoma
<i>Hymenolepis nana</i>	Taeniasis

Generalmente, el lodo proyectado para aplicarlo al suelo, es estabilizado por los procesos químicos y biológicos. El Cuadro 2-4 muestra los niveles típicos de algunos patógenos en un lodo desestabilizado y un lodo estabilizado. La estabilización reduce grandemente el número de patógenos en el lodo, incluyendo bacterias, parásitos, protozoos y virus (Sagik *et al.*, 1979), así como el potencial de olores. Sin embargo, aún el lodo estabilizado, usualmente contendrá algunos patógenos; así, EPA exige que especifiquen los procesos que reducen los niveles de patógenos que serán emprendidos antes de la aplicación al suelo y que las restricciones a los sitios para algunos tipos de lodos deben continuarse. Los requerimientos de EPA para la reducción de patógenos y atracción de vectores, sirven para proteger de la contaminación al personal de operación, al público en general, los cultivos destinados para consumo humano, agua subterránea y agua superficial debido a los niveles inaceptables de patógenos. Los requerimientos EPA también están diseñados para asegurar que el recrecimiento de bacterias no ocurra previo al uso o disposición (U.S. EPA, 1992a, 1994).

Cuadro 2-4. Niveles típicos de patógenos en los lodos líquidos digeridos anaerobicamente y lodos desestabilizados.

Patógeno	Concentración típica en los lodos desestabilizados (No./100 mililitros)	Concentración típica en los lodos digeridos anaerobicamente (No./100 mililitros)
Virus	2,500-70,000	100-1,000
Bacteria coliforme fecal ^a	1,000,000,000	30,000-6,000,000
<i>Salmonella</i>	8,000	3-62
<i>Ascaris lumbricoides</i> -helminth	200-1,000	0-1,000

^a Aunque no es patógeno, comúnmente son usados como indicadores.

Los vegetales que crecen en los suelos infectados se contaminan fácilmente. Por ello, es vital conocer la supervivencia de los microorganismos patógenos en los vegetales y en el suelo, para poder evaluar así los problemas a que puede dar lugar un vertido y para controlar la eficacia en la eliminación de gérmenes de los diferentes tratamientos de depuración de las aguas residuales urbanas y lodos.

La supervivencia de los organismos patógenos en suelos, aguas, vegetales o en el aire, puede variar desde días a semanas, o incluso meses, dependiendo de la humedad, de la temperatura del medio y del tipo de organismo.

Las bacterias, los quistes de protozoos y los huevos de helmintos, se adhieren tenazmente a la superficie de las plantas y quedan así protegidos del ambiente externo.

Los factores más importantes son, desde luego, la humedad y la temperatura; la supervivencia es casi siempre máxima ante un contenido óptimo de humedad y a temperaturas adecuadas.

Las plantas pueden contaminarse directamente durante la aplicación del lodo, o indirectamente por contacto con el suelo. Diversos estudios demuestran que las bacterias patógenas humanas, las amibas y los huevos de helmintos, no son capaces de atravesar la superficie limpia de los vegetales sanos, pero pueden entrar fácilmente a través de grietas o heridas que interrumpen sus barreras naturales de defensa.

Es muy difícil limpiar y desinfectar estas plantas, pues los organismos no se eliminan por lavado ordinario. La supervivencia de las bacterias patógenas intestinales en el suelo y en la vegetación depende de diversos factores como pueden ser el tipo de organismo, la temperatura, la materia orgánica, la presencia de otros microorganismos, la humedad, el tipo de suelo o la presencia y cantidad de nutrientes disponibles.

Existen abundantes estudios acerca de la supervivencia de bacterias coliformes; se ha comprobado que las concentraciones de coliformes no guardan relación con la altura de los frutos con respecto al suelo; solamente en aquellos casos en que existe un contacto real con el terreno. Parece claro que las salpicaduras de tierra al caer la lluvia no juegan un papel importante en el transporte de la contaminación a los frutos.

La luz solar reduce el número de organismos. También se ha comprobado que las plantas con hojas múltiples y pliegues profundos en la superficie, dan recuentos de coliformes más altos que las lisas. El periodo máximo de supervivencia varía a veces, dependiendo de factores tales como la densidad de plantas por unidad de superficie (siendo mayor cuanto mayor es dicha densidad), lluvias o riegos abundantes posteriores a la contaminación, etc. Se ha observado que las lluvias intensas no arrastran bacterias, sino que aumentan los recuentos obtenidos en las plantas por infección secundaria.

Las bacterias patógenas se extinguen a números insignificantes (99% se extinguen) en 12 días (*Salmonella* sp.), o 18 días (coliformes fecales) a una temperatura de 15°C. Se ha observado que los coliformes sobreviven más de 34 días en alfalfa, según diversos autores.

También se ha observado que la congelación o el almacenamiento en frío aumenta la supervivencia: en alfalfa mantenida a -17°C los coliformes sobreviven 73 días.

En cuanto a la supervivencia de *Salmonella* y *Shigella* en suelos y vegetales, se cree que es menor, o en todo caso igual, a la observada para coliformes.

Existen pruebas de que las *Salmonellas* y las *Shigellas* soportan bien los fríos invernales tanto en el suelo como en las plantas, y su supervivencia aumenta en este caso (46 días en la superficie del suelo y 70 días en los horizontes profundos). La textura también influye en la rapidez de su desaparición: Las bacterias fecales desaparecen más rápidamente en suelos arenosos que en los francos o en los arcillosos.

A pesar de la aparente buena correlación de los datos de supervivencia de coliformes y *Salmonella*, muchos autores no ven tan claro que la supervivencia de estas últimas sea tan corta. Beard llegó a la conclusión de que existe una fuerte influencia de la humedad relativa y de la luz solar, y también comprobó que la supervivencia es más larga en suelos limpios que en suelos contaminados por residuos.

El *Mycobacterium tuberculosis* puede sobrevivir de uno a tres meses en el agua y hasta seis meses en el suelo; sin embargo, se ha llegado a la conclusión de que deteniendo el vertido de residuos fecales 14 días antes de que el ganado comience a pastar en los campos, no existirá riesgo de infección a través de la hierba.

El *Bacillus anthracis* pierde su virulencia en aguas residuales tras 19 días, pero en los lodos permanece virulento durante 5 semanas.

Los virus comúnmente sobreviven a un máximo de 19 días (aplicación superficial) a 15°C (EPA, 1987; U.S. EPA, 1992b). Los protozoos sobreviven sólo unos días. Las densidades de huevos de helmintos en el lodo aplicado a la superficie de parcelas de pastos son reducidas en más del 90% en 3 o 4 meses; los huevos de helmintos sobreviven más tiempo si el lodo es labrado dentro del suelo (Jackubowski, 1988).

Los huevos de *Ascaris* mueren rápidamente en suelos expuestos al sol, pero son extremadamente resistentes en los vegetales si tienen acceso a la humedad, siendo variables durante más de un mes tras la contaminación. Podrían ser transportados fácilmente en lechuga y otras verduras de crecimiento rápido, a lo que hay que añadir, además, que no se eliminan completamente por la lluvia o mediante un lavado normal. En el suelo se ha comprobado una supervivencia de dos años, si se riega con aguas negras regularmente. En las aguas no se desarrollan en ausencia de oxígeno disuelto.

Los huevos de *Esquistosoma* sobreviven tres semanas en los lodos de depuradoras, y resisten aproximadamente lo mismo en tanques sépticos; la cloración no es eficaz para eliminarlos.

Generalmente, ninguno de esos microorganismos se lixiviará a través del sistema del suelo para contaminar las aguas subterráneas (Edmonds, 1979), pero en su lugar permanecerá en la superficie del suelo para completar su período de supervivencia. Donde ocurre escurrimiento superficial, pueden usarse amortiguadores para filtrar la salida de patógenos y prevenir la entrada dentro de los cuerpos que reciben agua.

Los organismos de mayor preocupación a la salud asociados con la aplicación de aguas y lodos residuales son la *Salmonella*, debido a su predominio y patogenicidad; *Ascaris*, debido a la extrema resistencia del huevo; *Taenia*, debido a la exposición del ganado vacuno y virus, debido a su habilidad para resistir la desactivación y penetrar el suelo, y la dificultad de su monitoreo. A pesar de las preocupaciones, hay poca evidencia para incriminar a la irrigación con aguas residuales tratadas o aplicación de lodo en brotes de enfermedades cuando el tratamiento y la aplicación son realizados de manera cautelosa y controlada.

2.3.7 Nutrientes

Los nutrientes presentes en los lodos tales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), entre otros, son esenciales para el crecimiento de las plantas. El nivel de nutrientes es importante para determinar las dosis de aplicación de lodo. Niveles excesivos de nutrientes debido a las altas dosis de aplicación, pueden resultar en una contaminación ambiental del agua subterránea y superficial y debe ser evitado. EPA (1995a) recomienda que los lodos a granel sean aplicados al suelo en dosis agronómicas para nitrógeno al sitio de aplicación.

El Cuadro 2-5 muestra los niveles típicos de nutrientes presentes en el lodo. Los niveles de nutrientes, particularmente los niveles de nitrógeno, pueden variar significativamente por esta razón los análisis deben realizarse con el lodo actual que será aplicado al suelo. Típicamente, los niveles de nutrientes en el lodo son considerablemente bajos que esos en fertilizantes comerciales. Especialmente potasio, el cual está usualmente a menos del 0.5% (Cuadro 2-5).

Cuadro 2-5. Niveles típicos de nutrientes identificados en el lodo (Sommers, 1977; Furr *et al.*, 1976)^a.

Nutriente	Número de muestreos	Porcentaje ^b		
		Rango	Mediana	Punto medio
N Total	191	< 0.1 - 17.6	3.30	3.90 ^c
NH ₄	103	5x10 ⁻⁴ - 6.76	0.09	0.65
NO ₃	43	2x10 ⁻⁴ - 0.49	0.01	0.05
P	189	< 0.1 - 14.3	2.30	2.50
K	192	0.02 - 2.64	0.30	0.40
Na	176	0.01 - 3.07	0.24	0.57
Ca	193	0.1 - 25.0	3.9	4.9
Fe	165	< 0.1 - 15.3	1.1	1.3

^a Los datos son de numerosos tipos de lodo en 15 estados: Michigan, New Hampshire, Nueva Jersey, Illinois, Minnesota, Ohio, California, Colorado, Georgia, Florida, Nueva York, Pennsylvania, Texas, Washington y Wisconsin.

^b Base sólidos secos.

^c Se asume que el 82% del nitrógeno total es N orgánico. Así: N orgánico+NH₄+NO₃= NT, ó 3.2+.065+0.05=3.90.

De esta manera, fertilizantes complementarios usualmente serán indispensables con el lodo, para sostener un crecimiento vegetativo óptimo.

2.3.7.1 Nitrógeno

El nitrógeno puede estar presente en el lodo en forma inorgánica, ya sea en forma de amonio (NH_4) o en forma de nitrato (NO_3), o en forma orgánica. La forma en que el N está presente en el lodo es un factor importante en la determinación de cuanto nitrógeno está disponible para las plantas, así como el potencial de contaminación de N a las aguas subterráneas. Generalmente, el nitrógeno inorgánico en forma de NO_3 , es la forma más soluble en el agua, y por lo tanto es la forma de más preocupación para la contaminación del agua subterránea debido a su alta movilidad en muchos tipos de suelos.

El nitrógeno inorgánico en la forma de NH_4 , puede fácilmente volatilizarse como amoniaco (NH_3), cuando el lodo es aplicado a la superficie del suelo, mejor dicho incorporado o inyectado, y de esta manera no puede estar disponible para las plantas. El N orgánico puede descomponerse debido a los microorganismos del suelo, o mineralizado a nitrógeno inorgánico, en forma de NH_4 y NO_3 , ya en esta forma el N está disponible para las plantas. Por lo tanto, el N orgánico puede considerarse como una forma de nitrógeno de liberación lenta.

Las concentraciones de nitrógeno orgánico e inorgánico en el lodo son afectadas por el tipo de tratamiento del lodo y los procesos de manejo usados. La mayoría del nitrógeno orgánico en el lodo está asociado con los sólidos del lodo, y así, los niveles del N orgánico no son alterados sensiblemente por los procesos de deshidratación y secado del lodo. En contraste, las formas inorgánicas del N solubles en agua y sus concentraciones, decrecerán dramáticamente durante la deshidratación (camas de secado, centrifugadoras y prensas). Algunos procesos de secado por calor, aire o tratamientos de cal, reducirán el NH_4 debido a la volatilización del NH_3 , pero no afectarán los niveles de NO_3 .

Las condiciones aerobias facilitan la conversión microbial de otras especies de nitrógeno a la forma móvil (NO_3); inversamente, las condiciones anaerobias inhabilitan la conversión de NH_4 a NO_3 debido a la oxidación. Usualmente, cerca del 90% del nitrógeno inorgánico contenido en el lodo está en forma de NH_4 , a menos que las condiciones

aerobias prevalezcan durante el tratamiento del lodo. Para la mayoría de los lodos líquidos colectados en un digestor anaerobio, esencialmente todos los nitrógenos inorgánicos, estarán presentes como NH_4 , constituyendo del 25 al 50% del nitrógeno total. La concentración de NH_4 en la fase líquida del lodo es relativamente constante para una planta de tratamiento específica, aunque los procesos de tratamiento tales como la deshidratación pueden reducir substancialmente el contenido de NH_4 , a menos del 10% del nitrógeno total.

Debido a que el contenido de N inorgánico del lodo está significativamente influenciado por los procedimientos de manejo del lodo, los análisis de N deberán conducirse sobre el lodo que será aplicado al suelo. La cantidad de N inorgánico mineralizado en el suelo es afectada por el grado de procesamiento del lodo (digestión, composteo, etc.) dentro de la planta de tratamiento y generalmente será menor para el lodo bien estabilizado.

El contenido de N orgánico del lodo puede variar del 1 al 10% en base peso seco. Los componentes orgánicos encontrados en el lodo principalmente son aminoácidos, que indican la presencia de materiales proteínicos. Después de la aplicación al suelo, los microbios del suelo descompondrán a los componentes del nitrógeno orgánico del lodo, resultando una liberación de NH_4 , el cual puede ser asimilado por los cultivos o la vegetación (Ryan *et al.*, 1973; Sommers *et al.*, 1972).

2.3.7.2 Fósforo, potasio y otros nutrientes

El lodo contiene concentraciones variadas de otros macro y micro nutrientes requeridos para el crecimiento de las plantas, algunos constituyentes del lodo, tales como fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y fierro (Fe), fácilmente forman compuestos insolubles con los sólidos del lodo y permanecen así en niveles relativamente altos en el lodo (Cuadro 2-5).

Otros constituyentes del lodo, tales como el potasio (K) y el sodio, están solubles en el agua y son descargados con las aguas residuales tratadas, a menos que un proceso especial de tratamiento avanzado, sea usado para removerlos. De los constituyentes

solubles en el agua que permanecen en el lodo, se reducirán más sus concentraciones en el lodo, si el lodo es deshidratado (por centrifugadoras o prensas), mientras que el secado con calor o aire resultará en un incremento de los niveles debido a que esos constituyentes no son volátiles.

2.3.8 Metales

El lodo puede contener cantidades variadas de metales; en concentraciones bajas en el suelo, algunos de esos metales son utilizados como nutrientes o para el crecimiento de las plantas y frecuentemente son agregados por fertilizantes inorgánicos comerciales, tales como el Co, Cu, Fe, Mo y Zn. Pero en altas concentraciones, algunos metales pueden ser tóxicos para los humanos, animales y las plantas (U.S. EPA, 1995a). Basándose en evaluaciones extensivas del riesgo de los metales del lodo, EPA regula 10 metales en el lodo que será aplicado al suelo, éstos son:

- Arsénico
- Cadmio
- Cobre
- Cromo
- Mercurio
- Molibdeno
- Níquel
- Plomo
- Selenio
- Zinc

EPA encontró que otros metales no representan riesgos para la salud y al medio ambiente al aplicarse al suelo de un lugar. La inspección nacional del lodo residual de EPA en 1990 (NSSS) analizó muestreos de 412 contaminantes o análisis de 177 plantas de tratamiento usando por lo menos procesos de tratamiento secundario, incluyendo los 10 metales regulados por la 40 CFR Parte 503 para la aplicación al suelo, mostrados en el Cuadro 2-6.

Basándose en la NSSS, EPA estima que sólo aproximadamente el 2 por ciento (130 plantas de tratamiento) de las 6,300 en Estados Unidos, no cumplirían la regulación de las máximas concentraciones para los metales, el requerimiento mínimo para la aplicación al suelo (U.S. EPA, 1994).

Cuadro 2-6. Concentraciones promedio de metales en el lodo comparado con los límites máximos de concentración (adaptado de U.S. EPA, 1990).

Metal	Concentración promedio (mg/kg, peso seco)	Límites máximos de concentración para metales pesados, Parte 503 (mg/kg, peso seco)
Arsénico	9.9	75
Cadmio	6.94	85
Cobre	741	4,300
Cromo	119	3,000
Mercurio	5.2	57
Molibdeno	9.2	75
Níquel	42.7	520
Plomo	134.4	840
Selenio	5.2	100
Zinc	1,202	7,500

Las concentraciones de metal en el lodo en gran parte dependen del tipo y cantidad de los residuos industriales descargados dentro de los sistemas de tratamiento del agua residual. Debido a que los metales generalmente son insolubles, éstos generalmente están presentes en el lodo en concentraciones altas, que en las aguas residuales, y la deshidratación del lodo tiene un impacto mínimo en la reducción de las concentraciones de metal en el lodo que es destinado para aplicaciones al suelo. El pretratamiento del agua residual industrial descargada dentro de los sistemas residuales han sido efectivos para reducir el contenido de metales, del lodo generado en una planta de tratamiento (U.S. EPA, 1995a).

Según Hue (1996) el contenido de metales pesados es el factor más importante para determinar el uso de lodos. Figura 2-9.

Existen diversas teorías para explicar los mecanismos de retención de metales por el suelo, fundamentalmente referidas a Zn, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Co, y Hg. Estos mecanismos pueden ser reacciones simples o complejas, y las principales son: precipitación, oclusión en otros precipitados, asociación con la superficie del suelo, difusión de fases sólidas en los minerales del suelo, incorporación a los biosistemas y unión a los vertidos residuales; por otra parte, pueden estar presentes los propios metales de los minerales del suelo.

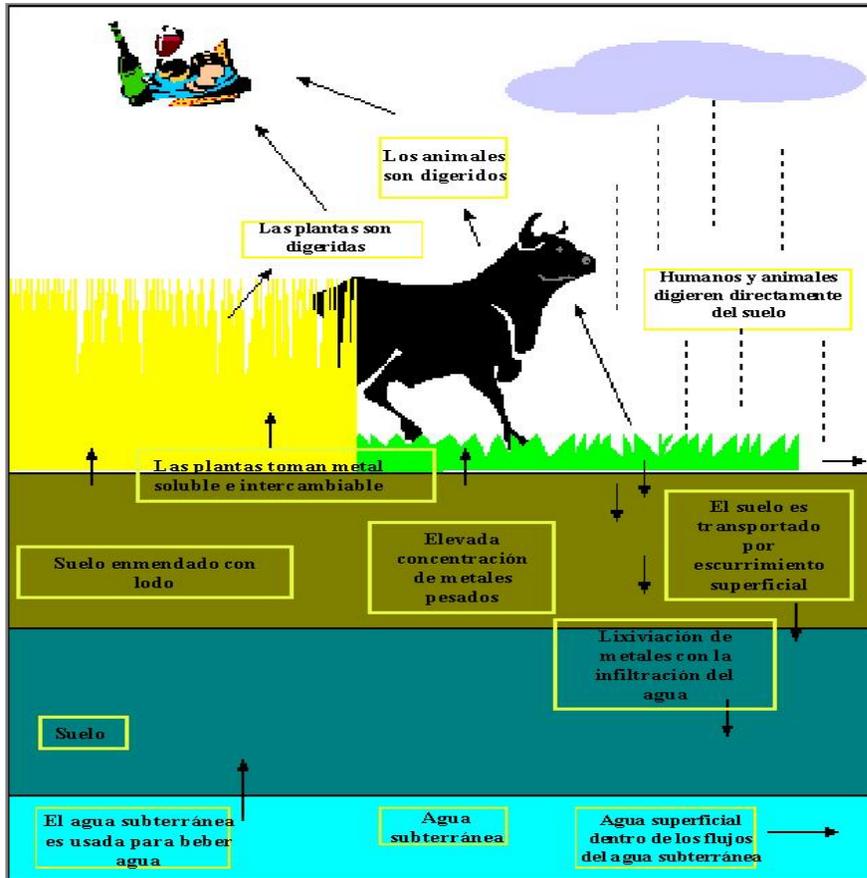


Figura 2-9. Ciclo de los metales en la cadena trófica.
Adaptado de Ostergaard H. B., 1997.

Existen, como es natural, bastantes diferencias entre los mecanismos químicos de asimilación de metales por el suelo, pues muchos factores influyen en ellos, como son el tipo de suelo, el volumen de los vertidos, etc. Ello hace que los procesos de sorción, precipitación, disolución y, en general, cualquier mecanismo de retención, sean complicados y de difícil control (Figura 2-10).

A veces, existe cierto predominio de la precipitación sobre las reacciones de sorción, y esto depende de ciertos factores como son la concentración de metal en la solución del suelo, el pH, la presencia de complejos organo-metálicos y la existencia de pares iónicos. Si se forman precipitados, es porque posiblemente se efectúan una disolución y una sorción superficial cuando la concentración metálica de la solución del suelo disminuye por lavado o por absorción por las cosechas.

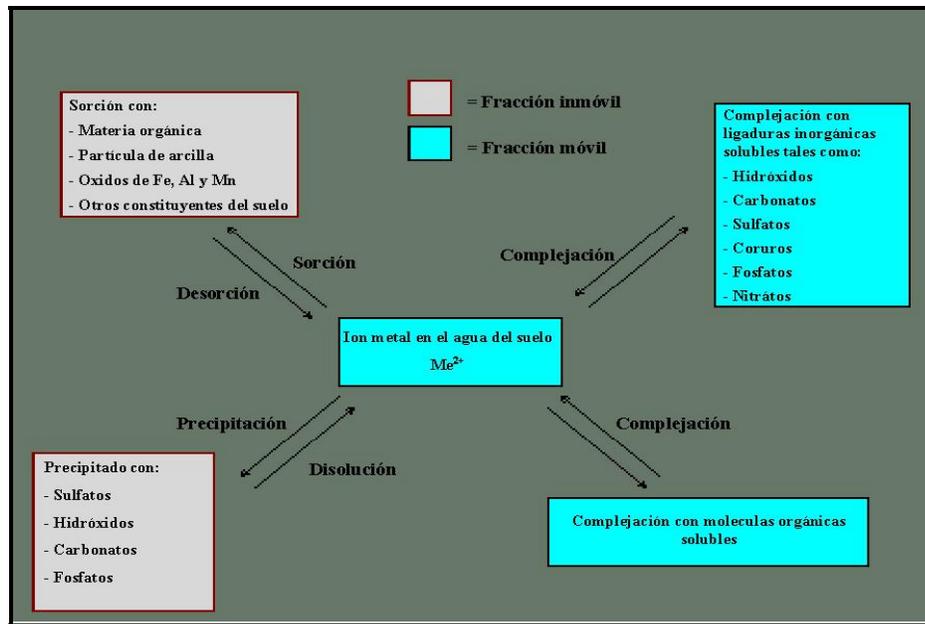


Figura 2-10. Procesos de los metales pesados en el sistema suelo-agua. Adaptado de Ostergaard H. B., 1997.

Las cantidades de metales disponibles están controladas en gran parte por el intercambio iónico. Además posiblemente existen ciertos procesos de adsorción que comprenden uniones covalentes con ciertos grupos funcionales de las superficies de las arcillas. El intercambio de cationes y las quelaciones de la materia orgánica son los principales procesos que facilitan la disponibilidad de los metales.

La acumulación de metales en determinados tejidos u órganos es variable, algunos como por ejemplo el Cr y Pb son bloqueados a nivel radicular, otros, como Cd y Hg son más zootóxicos-fitotóxicos, es decir, pueden acumularse en tejido vegetal hasta concentraciones tóxicas para animales, sin efecto adverso para la planta, por el contrario la elevada fitotoxicidad del Cu, Ni y Zn hacen que el vegetal actúe de barrera de protección frente a la cadena trófica. En general, las hortalizas tienden a asimilarlos con mayor facilidad que las gramíneas, siendo al mismo tiempo más sensibles a la toxicidad las primeras y más tolerantes las segundas.

Con respecto a la preocupación de la salud humana acerca del uso de lodos tratados sobre los cultivos, el cadmio es el metal considerado de mayor preocupación, debido a que se le considera como agente cancerígeno.

2.3.9 Químicos orgánicos

El lodo puede contener también químicos orgánicos sintéticos de las aguas residuales industriales, productos domésticos y pesticidas. La mayoría de los lodos contienen bajos niveles de esos químicos y no representan amenaza significativa para la salud humana y el medio ambiente. EPA (40 CFR Parte 503) no regula los químicos orgánicos en el lodo debido a que los químicos orgánicos de preocupación potencial han sido prohibidos o restringidos para uso en los E.U.A.: no son fabricados en los E.U.; están presentes en los lodos en niveles muy bajos, basados en datos de la NSSS de la EPA en 1990; o debido a que el límite para un contaminante orgánico identificado en la evaluación de riesgos, no se espera que sea excedido en el lodo que es usado o confinado (U.S. EPA, 1992b).

Los químicos orgánicos, cuando son agregado al suelo pueden volatilizarse, descomponerse o ser adsorbido. Consecuentemente, sólo esos que no son volátiles y son relativamente resistentes a la descomposición se acumularán en el suelo.

Se ha insinuado que la mayoría de los compuestos orgánicos tóxicos en los E.U.A. están presentes en los lodos en concentraciones menores de 10.0 mg/kg (Jacobs et al.,1987). Por lo tanto cuando los lodos son aplicados al suelo en dosis que satisfagan las necesidades del N o P y mezclados en la superficie del suelo, las concentraciones de los químicos orgánicos tóxicos en la profundidad 0-15 cm del suelo normalmente no excederá los 0.10 mg/kg.

Los químicos orgánicos de los lodos y aguas residuales pueden destruirse directamente después de la aplicación al suelo por biodegradación, oxidación química y foto-oxidación. Los compuestos orgánicos pueden volatilizarse, inmovilizarse sobre las partículas sólidas por procesos de sorción, o transportados (lixiviados) inalterados a través del perfil del suelo hasta llegar al agua subterránea. En mecanismos más complejos los orgánicos sorbidos pueden subsecuentemente ser degradados química o fotoquímicamente, descompuestos microbianamente, o sorbidos.

2.3.10 Contaminantes peligrosos

El lodo no está incluido en una lista de residuos específicos denominados peligrosos por EPA, ni los datos disponibles sugieren que el lodo manifiesta características de un residuo peligroso, la cual incluye corrosividad, reactividad, explosividad y toxicidad. La naturaleza no peligrosa del lodo, de cualquier modo, no puede ser asumida.

Aunque el lodo concebiblemente puede manifestar explosividad o reactividad, la mayoría de las preocupaciones acerca del lodo están enfocadas en la toxicidad. Poca, si es que la hubiera, el lodo manifestará características de toxicidad. Si, de cualquier modo, los factores están presentes indicando un posible problema de toxicidad (p.e., las plantas de tratamiento reciben cargas importantes de contaminantes respaldados por las pruebas de toxicidad) y las plantas de tratamiento no han actualizado los datos que demuestren que el lodo no es peligroso, es aconsejable para las plantas de tratamiento analizar el lodo en el aspecto tóxico (U.S. EPA, 1990).

La toxicidad, es determinada por el procedimiento de lixiviado para características tóxicas (siglas en inglés TCLP). Estas pruebas pueden usarse para el lodo y material séptico doméstico. En una prueba de toxicidad, las concentraciones de contaminante obtenidas en el procedimiento de lixiviado para características tóxicas, son comparadas con los niveles permitidos de toxicidad. Si las concentraciones de contaminante obtenidas, igualan o exceden esos niveles, los residuos son clasificados como peligrosos. Si un lodo o material séptico doméstico extraído es considerado peligroso, no debe permitirse la aplicación al suelo. Estudios dirigidos por la Oficina de Residuos Sólidos de EPA en 1985-86 encontró que ninguno de los lodos muestreados y analizados mediante el TCLP tuvieron concentraciones que excedían los límites permitidos. Para la mayoría de los contaminantes excepto los metales, los niveles no fueron detectables (U.S. EPA, 1993).

En México, la toxicidad se determina mediante la prueba de extracción para toxicidad (PECT). En la NOM-052-ECOL-1993, se listan los compuestos orgánicos e inorgánicos de mayor preocupación y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, lo cual se determina mediante el PECT.

2.4 Tipos de lodo

2.4.1 Lodo primario

El lodo primario, es el lodo que resulta 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 también los sólidos y sustancias disueltas que estuvieron presentes en el agua residual o fueron agregados durante los procesos de tratamiento del agua residual (U.S. EPA, 1984). Los tratamientos primarios del agua residual remueven los sólidos (lodo) que radican fuera fácilmente.

2.4.2 Lodo secundario

Los tratamientos secundarios del agua residual generalmente involucran un proceso de clarificación primario seguido de un tratamiento biológico y una clarificación secundaria (U.S. EPA, 1990). El lodo generado por procesos de tratamiento secundarios del agua residual, tales como los sistemas biológicos activados y filtros de goteo, tienen un contenido de sólidos bajo (0.5 a 2%) y son difíciles de espesarse y deshidratarse que los lodos primarios.

2.4.3 Lodo terciario

Los lodos terciarios son producidos por procesos de tratamiento avanzados del agua residual, tales como la precipitación química y filtración. Los químicos usados en los procesos de tratamiento avanzados del agua residual, tales como aluminio, fierro, sales, cal o polímeros orgánicos, incrementan la masa del lodo y usualmente el volumen del lodo.

Generalmente, si la cal o polímeros son usados, las características del espesamiento y deshidratación del lodo serán mejores, mientras si fierro o sales de aluminio son usadas, la capacidad de la deshidratación y espesamiento del lodo comúnmente será reducida.

2.5 Efectos de los procesos de tratamiento del agua y lodo residual sobre las características del lodo

Los efectos de los procesos de tratamiento del agua y lodo residual sobre las características del lodo varían dependiendo del proceso de tratamiento empleado, el Cuadro 2-7 muestra los niveles típicos de nutrientes en el lodo a diferentes procesos de tratamiento.

Cuadro 2-7. Niveles típicos de nutrientes en el lodo de diferentes procesos de tratamiento (Sommers, 1977)^a.

Nutriente	Proceso de tratamiento del lodo	No. de muestreos	Rango	Mediana	Promedio
C orgánico (%)	Anaerobio	31	18-39	23.8	27.6
	aerobio	10	27-37	29.5	31.7
	Otro	60	6.5-48	32.5	32.6
	Todos	101	6.5-48	30.4	31.0
N total (%)	Anaerobio	85	0.5-17.6	4.2	5.0
	Aerobio	38	0.5-7.6	4.8	4.9
	Otro	68	<0.1-10.0	1.8	1.9
	Todos	191	<0.1-17.6	3.3	3.9
NH ₄ (mg/kg)	Anaerobio	67	120-67,600	1,600	9,400
	Aerobio	33	30-11,300	400	950
	Otro	3	5-12,500	80	4,200
	Todos	103	5-67,600	920	6,540
NO ₃ (mg/kg)	Anaerobio	35	2-4,900	79	520
	Aerobio	8	7-830	180	300
	Otro	3	-	-	780
	Todos	45	2-4,900	149	490
P total (%)	Anaerobio	86	0.5-14.3	3.0	3.3
	Aerobio	38	1.1-5.5	2.7	2.9
	Otro	65	<0.1-3.3	1.0	1.3
	Todos	189	<0.1-14.3	2.3	2.5
K (%)	Anaerobio	86	0.02-2.64	0.30	0.52
	Aerobio	37	0.08-1.10	0.39	0.46
	Otro	69	0.02-0.87	0.17	0.20
	Todos	192	0.02-2.64	0.30	0.40
Na (%)	Anaerobio	73	0.01-2.19	0.73	0.70
	Aerobio	36	0.03-3.07	0.77	1.11
	Otro	67	0.01-0.96	0.11	0.13
	Todos	176	0.01-3.07	0.24	0.57
Ca (%)	Anaerobio	87	1.9-20.0	4.9	5.8
	Aerobio	37	0.6-13.5	3.0	3.3
	Otro	69	0.12-25.0	3.4	4.6
	Todos	193	0.1-25.0	3.9	4.9

^a Las concentraciones y los porcentajes de composición están en base a sólidos secos.

^b Otros, incluye enlagunado, primario terciario y lodos no especificados. Todos, significa datos para todos los tipos de lodo.

La integración de los procesos de tratamiento del lodo para uso sobre suelos agrícolas exige consideración de los efectos de los procesos de tratamiento sobre la calidad del lodo. La deshidratación, composteo, secado y alcalinización del lodo reduce la cantidad de nitrógeno disponible para las plantas en los lodos. Por lo tanto, es importante tomar en cuenta estas pérdidas de N cuando se tiene pensado aplicar lodo a los suelos agrícolas, sobre todo, cuando se planea satisfacer las necesidades de N de los cultivos por medio de lodos. En la Figura 2-11 se presentan los diferentes procesos de tratamiento de los lodos antes de su utilización agrícola.

El lodo siempre es tratado virtualmente por un proceso de estabilización previo a la aplicación al suelo. La estabilización reduce el volumen del lodo crudo entre 25 a 40% mucho debido a los sólidos volátiles que son degradados a bióxido de carbono, metano u otros productos finales. Esta descomposición de la materia orgánica en el lodo y la subsecuente liberación de bióxido de carbono, amonio, sulfuro de hidrogeno y fosfato, da como resultado bajos niveles de carbón orgánico, nitrógeno, azufre y fósforo en el lodo estabilizado que entró a la unidad de estabilización. Los procesos de estabilización incluyen la digestión aerobia, anaerobia y composteo, entre otros. La cantidad actual del lodo estabilizado producido en una planta de tratamiento depende de los parámetros operacionales (temperatura, tiempo de retención, preparación, etc.) de los procesos de estabilización usados (U.S. EPA, 1979).

El composteo del lodo resulta en más reducción de los constituyentes orgánicos. Si el lodo es mezclado con un agente de volumen (aserrín) durante el composteo para facilitar la aireación y rápida estabilización, algunos de los agentes de volumen permanecerán en la composta (aún si es cribado), resultando en una dilución de los componentes del lodo (metales, nutrientes, etc.). La actividad biológica extensiva que ocurre durante el composteo, da como resultado más reducción en el contenido de N orgánico, C y S del lodo, decreciendo en el siguiente orden: lodo crudo, primario o residuo activado, digerido y composteado.

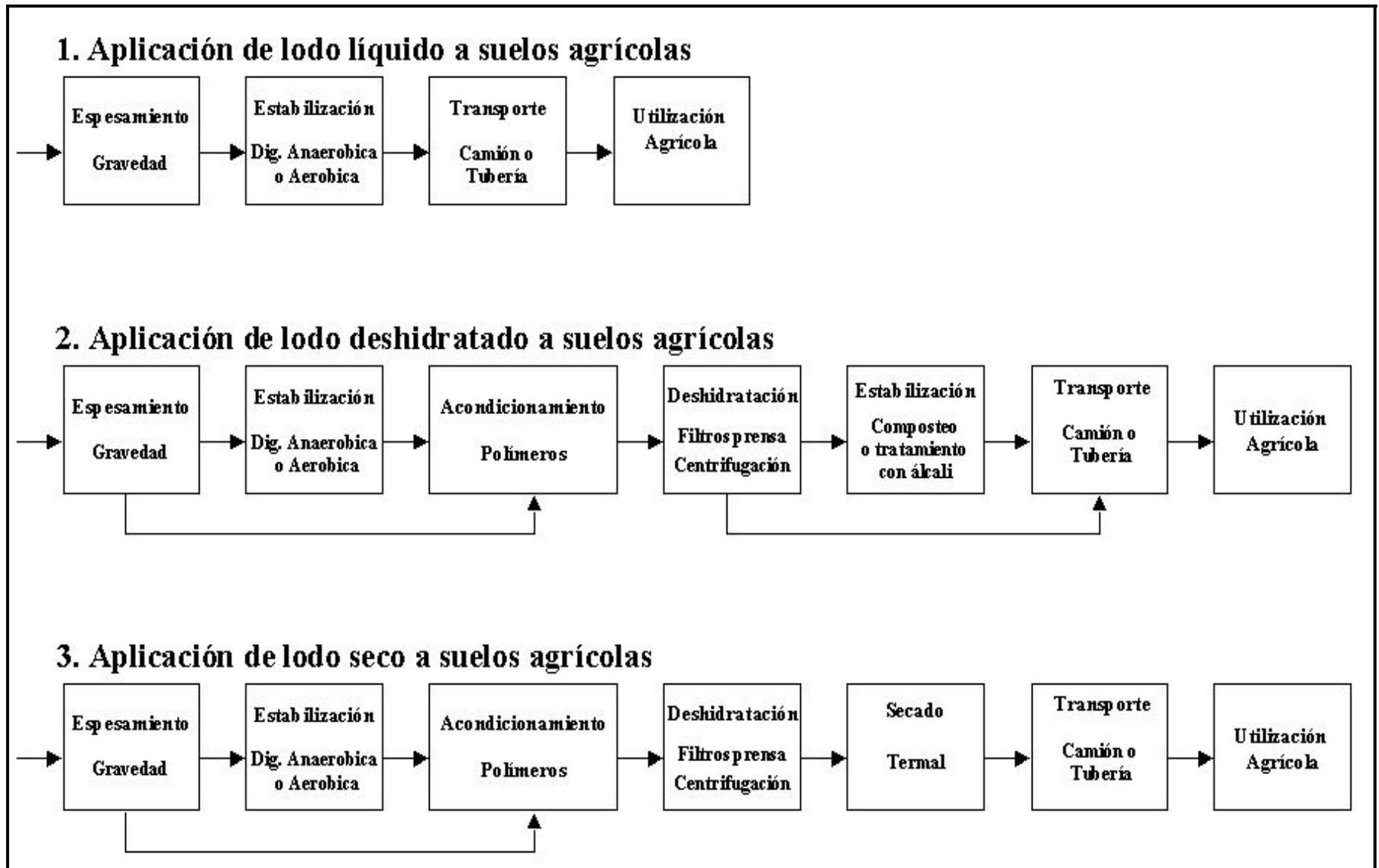


Figura 2-11. Procesos de tratamiento del lodo residual antes de su utilización agrícola.

Los procesos de tratamiento del agua y lodo residual, frecuentemente incluyen la adición de cloruro férrico, aluminio, cal o polímeros. La concentración de esos elementos agregados incrementan su concentración en el lodo resultante, además, los componentes agregados pueden tener otros efectos indirectos sobre la composición del lodo. Por ejemplo, precipitados de aluminio tales como los hidróxidos de aluminio, los cuales pueden subsecuentemente adsorber fósforo y co-precipitar con los metales pesado tales como el cadmio. La cal (óxido de calcio o hidróxido de calcio) usada como un agente estabilizador precipitará finalmente en el lodo como carbonato de calcio, la cual puede retener fósforo y metales. La adición de cal puede resultar en pérdidas de amoníaco mediante la volatilización (U.S. EPA, 1995a).

2.6 Factores a considerar en la selección de terrenos para la aplicación de lodos

2.6.1 Clima

Los datos de análisis climáticos son una consideración importante para la selección de terrenos. Lluvia, temperatura, evapotranspiración y viento pueden ser factores climáticos importantes, afectando la aplicación del lodo, selección de la práctica de aplicación, manejo del terreno y costos (U.S. EPA, 1995a). El Cuadro 2-8 menciona los posibles impactos de algunas regiones climáticas en la aplicación de lodo al suelo.

Cuadro 2-8. Impactos posibles de las regiones climáticas sobre la aplicación de lodo.

Impacto	Región climática		
	Caliente/Arido	Caliente/húmedo	Frío/húmedo
Tiempo de operación	Todo el año	Estacional	Estacional
Costos de operación	Bajos	Altos	Altos
Requerimientos de almacenamiento	Menores	Mayor	Mayor
Posible aumento de sales	Alto	Bajo	Moderado
Posible lixiviación	Bajo	Alto	Moderado
Posible escurrimiento	Bajo	Alto	Alto

2.6.2 Topografía

La topografía influye en el movimiento del agua superficial y subsuperficial, la cual afecta la cantidad de suelo erosionado y escurrimiento superficial conteniendo lodo aplicado. La topografía también puede indicar el tipo de suelo que puede encontrarse en un terreno.

Los terrenos en partes altas y pendientes inclinadas típicamente están bien drenados, bien aireados y usualmente poco profundos. Pero la pendiente inclinada, excepto sobre suelos permeables, incrementa la posibilidad de escurrimiento superficial del lodo. Los suelos en terrenos cóncavos y poco profundos frecuentemente son pobremente aireados y pueden estar saturados de agua durante una parte del año. Los suelos entre esos dos extremos usualmente tendrán propiedades intermedias con respecto al drenaje y escurrimiento. La aplicación de lodo a pendientes inclinadas (de 30 a 50%) en áreas forestales puede ser posible bajo condiciones específicas (p.e. pendientes amortiguadas apropiadamente con buen suelo forestal y vegetación, dependiendo del tipo de suelo, vegetación y lodo residual) si puede demostrarse que los riesgos del escurrimiento son bajos.

La inclinación, longitud y forma de la pendiente influyen el coeficiente de escurrimiento de un terreno. El rápido escurrimiento superficial de agua acompañada por erosión de suelo puede erosionar la mezcla de suelo y lodo y transportarlos a las aguas superficiales. Por lo tanto, frecuentemente se estipulan las pendientes máximas permisibles para las aplicaciones de lodo bajo varias condiciones considerando las propiedades físicas del lodo, las técnicas de aplicación y la velocidad de aplicación. Como guía general, los límites sugeridos son presentados en el Cuadro 2-9.

Cuadro 2-9. Pendientes recomendadas para la aplicación de lodo.

Pendiente	Comentario
0-3%	Ideal; no preocupa el escurrimiento o erosión del lodo líquido o deshidratado.
3-6%	Aceptable para aplicar superficialmente el lodo líquido o deshidratado; poco riesgo de erosión.
6-12%	La inyección del lodo líquido es requerida en muchos casos, excepto en cuencas de drenaje cerradas y/o áreas con control extensivo de escurrimiento. La aplicación superficial del lodo deshidratado usualmente es aceptable.
12-15%	Ninguna aplicación de lodo sin control efectivo del escurrimiento; la aplicación superficial del lodo deshidratado es aceptable, pero se recomienda una incorporación inmediata.
Más del 15%	Las pendientes mayores del 15% sólo son adecuadas para terrenos con buena permeabilidad (bosques), donde la longitud de la pendiente es corta y/o la pendiente es una parte menor del total del área de aplicación.

2.6.3 Suelos y geología

El material geológico parental y la textura de los suelos son uno de los muchos aspectos importantes de la selección de terrenos porque influye en la permeabilidad, infiltración y drenaje.

Con el apropiado diseño y operación, el lodo puede aplicarse exitosamente a cualquier suelo prácticamente. De cualquier modo, los suelos con alta permeabilidad (arenosos), suelos altamente impermeables (arcillas; a través de la adición del material orgánico del lodo puede ayudar a reducir la impermeabilidad), o suelos pobremente drenados pueden representar requerimientos especiales. Por lo tanto, los sitios con tales condiciones generalmente deben dárseles poca prioridad durante el proceso preliminar de selección de terrenos. El Cuadro 2-10 Resume las guías típicas para suelos convenientes.

Cuadro 2-10. Limitaciones del suelo para la aplicación del lodo a los terrenos agrícolas en Wisconsin (Keeney *et al.*, 1975).

Características del suelo que afectan el uso de lodo	Grado de limitación del suelo		
	Insignificante	Moderado	Severo
Pendiente ^a	Menos del 6%	6 al 12%	Más del 12%
Profundidad al nivel estático del manto freático	Más de 1.2 m	0.6 a 1.2 m	Menos de 1 m
Inundación o encharcamiento	Ninguna	Ninguna	Ocasional a frecuente ^b
Profundidad al estrato rocoso	Más de 1.2 m	0.6 a 1.2 m	Menos de 0.60 m
Permeabilidad del estrato más restrictivo a más de un metro de profundidad	0.24 a 0.8 cm/hr	0.8 a 2.4 cm/hr 0.08 a 0.24 cm/hr	Menos de 0.08 cm/hr Más de 2.4 cm/hr
Capacidad de asimilación de agua disponible	Más de 2.4 cm	1.2 a 2.4 cm	Menos de 1.2 cm

^a La pendiente es un factor importante en la determinación del escurrimiento que probablemente pueda ocurrir. Muchos suelos de 0 a 6% de pendiente tendrán un escurrimiento lento o muy lento; los suelos con 6 a 12% de pendiente generalmente tienen un escurrimiento medio; y los suelos con pendientes mayores generalmente tienen un escurrimiento rápido o muy rápido.

^b La aplicación al suelo puede dificultarse en condiciones bajo inundación o encharcamiento.

2.6.3.1 Permeabilidad e infiltración del suelo

La permeabilidad (una propiedad determinada por el espacio poroso del suelo, tamaño, forma y distribución) se refiere a la facilidad con la cual el agua y el aire son transmitidos a través del suelo. Los suelos con textura fina generalmente poseen baja o muy baja permeabilidad, mientras la permeabilidad de suelos con textura granular es de

moderadamente rápida a muy rápida. Un suelo con textura media, tales como los migajones o migajón-arenoso tienden a tener una permeabilidad moderada a lenta.

2.6.3.2 Drenaje del suelo

Los suelos clasificados como (1) muy pobremente drenados, (2) pobremente drenados, o (3) algo pobremente drenados por el Servicio de Conservación de Suelos de E.U., pueden ser convenientes para la aplicación del lodo si se implementa control del escurrimiento. Los suelos clasificados como (1) moderadamente bien drenados, (2) bien drenados o (3) algo excesivamente drenados generalmente son convenientes para la aplicación de lodo. Típicamente, un suelo bien drenado es por lo menos moderadamente permeable.

2.6.3.3 pH del suelo y requerimientos para ajustar el pH

Es aconsejable que los suelos tratados con lodo sean mantenidos en un pH de 6.5 o más para minimizar la asimilación de metales por los cultivos. Al menos un repaso de la literatura sobre cómo influencia el pH del suelo la asimilación de metales, indica que la recomendación de un pH de 6.5 debe ser reconsiderada para la cadena alimenticia de los suelos agrícolas, basado sobre reportes que indican un adecuado control de la asimilación de metales a un pH de 6.0 (Sommers *et al.*, 1987). Un apropiado manejo del pH del suelo también es importante para la buena disponibilidad de nutrientes y el crecimiento del cultivo.

El control del pH del suelo también ha sido practicado rutinariamente en esas áreas de los E.U. donde se producen cultivos leguminosos (alfalfa, clavo de especia, frijol, etc.). La tendencia de incrementar el desarrollo de los granos (maíz y pequeños granos) ha resultado en grandes usos de fertilizantes comerciales, los cuales generan acidez que pueden decrecer el pH del suelo.

Mantener el pH del suelo entre 6.5 y 7.0 frecuentemente es deseable para la óptima disponibilidad de los nutrientes esenciales para las plantas, los suelos encalados no siempre logran el desarrollo deseado del cultivo. Por ejemplo, excelentes producciones de maíz, soya y trigo pueden obtenerse en un pH de 5.5 a 6.0. Muchos suelos contienen carbonato de calcio, el cual mantiene naturalmente un pH de casi 8.3. Para esos tipos de suelos, la deficiencia de elementos traza en vez de la toxicidad son una mayor preocupación. Por lo tanto, el mejor consejo es involucrar pericia agronómica para ayudar a manejar el pH del suelo a los niveles recomendados para los suelos y cultivos.

El pH es amortiguado por los coloides inorgánicos y orgánicos. Así, éste no incrementará inmediatamente después de las aplicaciones de cal, y no decrecerá rápidamente después de la aplicación de lodo o fertilizantes. Si el pH del suelo es menor que el nivel deseado, una prueba del requerimiento de cal puede realizarse para estimar la cantidad de cal agrícola requerida para ajustar el pH.

2.6.4 Geohidrología

Para la preselección preliminar de los terrenos, es recomendable que la siguiente información de agua subterránea para el área de aplicación sea considerada:

- Profundidad al agua subterránea (incluyendo los niveles históricos más altos y bajos).
- Una estimación de los patrones de flujo del agua subterránea.

Cuando un terreno o terrenos específicos han sido seleccionados para la aplicación de lodo, puede ser necesario una investigación de campo detallada para determinar dicha información.

Generalmente, mayor profundidad al agua subterránea, es más deseable en un sitio para la aplicación de lodo. El lodo no puede colocarse donde hay potencial por contacto directo con el agua subterránea. El espesor de un material no consolidado sobre un manto freático constituye la profundidad efectiva del suelo. La profundidad deseable del suelo

puede variar de acuerdo con las características del lodo, textura del suelo, pH del suelo, método de aplicación del lodo y dosis de aplicación. El Cuadro 2-11 resume los criterios recomendables para las diferentes prácticas de aplicación.

El tipo y condición del material consolidado sobre el manto freático también es de mayor importancia para los sitios donde se requiere de altas dosis de aplicación de lodo. La roca fracturada puede permitir lixiviaciones de movimiento rápidos. Un estrato rocoso no fracturado a profundidades poco profundas restringirán el movimiento del agua, con el potencial para monticular agua subterránea, flujo lateral subsuperficial o drenaje pobre. La roca de caliza es de preocupación particular donde puede existir sinkholes. Los sinkholes, es como la roca fracturada, pueden acelerar el movimiento de lixiviados al agua subterránea. De esta manera, los sitios posibles con agua potable subterránea en áreas que tienen un estrato rocoso fracturado, roca no fracturada con poca profundidad o con caliza sinkholes deben evitarse.

Cuadro 2-11. Profundidades recomendadas para el agua subterránea.

Tipo de terreno	Acuífero de agua potable^a	Acuífero excluido^b
Agrícola	1-2 m	0.5 m
Forestal	2 m ^c	0.7 m
Recuperación de terrenos	1-2 m	0.5 m

^a Pueden tener otros requerimientos las profundidades al agua subterránea.

^b Las profundidades son para asegurar trafabilidad de la superficie, no para proteger el agua subterránea; los acuíferos excluidos no son usados para agua potable.

^c La época de altos niveles y/o niveles de agua menores de 1 m usualmente no son preocupantes.

2.6.5 Hidrología

El número, tamaño, y naturaleza de los cuerpos de agua superficiales en o cercanos a un sitio posible de aplicación son factores significantes en la selección del terreno, debido a la posible contaminación por eventos de escurrimiento o inundación del terreno. Las áreas sujetas a frecuentes inundaciones tienen severas limitaciones para la aplicación de lodo. Las estructuras de control de inundaciones pueden construirse para proteger a un sitio de aplicación contra las inundaciones, pero tales estructuras pueden ser costosas.

2.6.6 Uso y disponibilidad del suelo

El uso del suelo prevaleciente frecuentemente ejerce una influencia significativa sobre la selección del terreno, así como en la aprobación de una práctica de aplicación de lodo. Es necesario determinar el uso actual y el uso futuro en la evaluación del área requerida y disponible para la aplicación del lodo.

El patrón del uso actual del suelo ayudará a identificar las áreas donde la aplicación del lodo al suelo puede aceptarse. En el caso de los terrenos agrícolas, a una mayor área, las prácticas agrícolas prevalecientes determinan la aceptabilidad de la aplicación a suelos agrícolas. Pequeñas propiedades de terreno en una comunidad agrícola pueden limitar la aplicación a este tipo de terrenos. Un área dedicada casi exclusivamente a la producción de cultivos para consumo humano, restringe los períodos cuando el lodo es aplicado al suelo. Las áreas con una mezcla de cultivos en hilera, pequeños granos, cultivos de heno y pastos pueden permitir la aplicación del lodo a través de muchos años, dependiendo de los ciclos agrícolas.

2.6.7 Selección del cultivo y requerimientos de nutrientes

Los cultivos producidos en un área influenciarán la calendarización y los métodos de aplicación de lodo. Utilizando los sistemas de producción ya existentes usualmente será una ventaja, ya que esos cultivos se han desarrollado debido a las condiciones del suelo, clima y económicas. Debido a que las aplicaciones del lodo típicamente están limitadas por los requerimientos de N del cultivo, los cultivos que usan mucho nitrógeno, tales como los forrajes, maíz y soya, minimizarán las cantidades de suelo necesario y los costos asociados con la transportación y aplicación de lodo. De cualquier modo, aplicando lodo para satisfacer las necesidades de los cultivos agregará excesos de fósforo, y eventualmente las dosis pueden reducirse para manejar los excesos de las adiciones de fósforo. Por lo tanto, no sólo es buena práctica usar campos con una mezcla de cultivos, sino el prudente manejo de un programa de aplicación de lodo que continuamente identificará áreas adicionales de suelo que puedan estar disponibles en reserva.

Las recomendaciones de fertilización para los cultivos están basados en los nutrientes requeridos para lograr una producción deseada del cultivo que se producirá y la capacidad del suelo para suministrar los nutrientes recomendados a las plantas. Las cantidades de fertilizante de N, P y K requeridos para lograr una producción determinada del cultivo, generalmente se determinan experimentalmente. La respuesta del cultivo de acuerdo con los nutrientes del fertilizante agregado, ha sido relacionada con los niveles de P, K, Mg y varios de los elementos pesados esenciales (Zn, Cu, Fe y Mn) del suelo analizado. La medición exacta del N disponible para las plantas en el suelo es difícil y también dependiente del clima.

2.7 Estimación de la dosis de aplicación de lodo para sitios agrícolas de acuerdo a EPA

Para determinar las dosis anuales de aplicación de lodo, EPA recomienda usar datos sobre la composición del lodo para calcular la máxima dosis de aplicación basándose en lo siguiente: 1) necesidades de N del cultivo, 2) necesidades de P del cultivo y 3) límites de contaminante de la 40 CFR Parte 503. En muchos casos, la dosis actual de aplicación será seleccionada de las siguientes dos posibilidades:

- La dosis anual agronómica puede utilizarse para suministrar las necesidades de N recomendadas hasta que los límites de carga acumulada de contaminante de la Parte 503 para metal sean alcanzados, a menos que el lodo cumpla con los límites de concentración de contaminante del Cuadro 3 de la Parte 503, en tal caso, las cargas acumulativas de metal no será necesario monitorearlas. (en algunos casos, este método puede resultar en una acumulación excesiva de P en el suelo, la cual puede aumentar el potencial para que el P entre a los arroyos y lagos a través de la erosión del suelo).
- Algunas veces, la dosis anual puede estar limitada a una dosis donde el P del lodo es igual al P recomendado en la fertilización o al P removido por el cultivo. El N puede aplicarse en menos cantidades que las necesitadas por el cultivo. Esta dosis de P puede realizarse siempre y cuando no exceda la dosis agronómica para N o cualquier límite de carga acumulada de contaminante para metales de la Parte 503.

2.7.1 Dosis agronómica y límites para metales pesados de EPA (40 CFR Parte 503)

EPA recomienda que el lodo sea aplicado al suelo en dosis que sea igual o menor que la dosis agronómica del N (la dosis que suministrará la cantidad de N requerido por el cultivo o vegetación, minimizando la cantidad de N que pasa a través de la zona radicular y entra al agua subterránea). Los requerimientos adicionales de la Parte 503 incluyen:

- El lodo no puede aplicarse al suelo a menos que las concentraciones de metales pesados en el lodo sean menores que los límites máximos de concentraciones de la Parte 503. Cuadro 2-12.
- El lodo deberá cumplir: 1) los límites de concentración de contaminante especificados en el Cuadro 3 de la Parte 503 ó 2) límites de carga acumulada de contaminante para el lodo a granel ó los límites anuales de carga de contaminante para el lodo embolsado. Cuadro 2-12. Si el lodo cumple los límites de concentración de contaminante ó los límites anuales de carga de contaminante, la Parte 503 no exige que las cargas de metal sean monitoreadas.

Cuadro 2-12. Límites para metales pesados de la Parte 503, para la aplicación de lodo al suelo.

Contaminante	Límites máximos de concentración (mg/kg) ^{a,b}	Límites de concentración de contaminante (mg/kg) ^{a,c}	Límites de carga acumulada de contaminante (kg/ha)	Límites de carga de contaminante anual kg/ha - para un periodo de 365 días
Arsénico	75	41	41	2.0
Cadmio	85	39	39	1.9
Cobre	4,300	1,500	1,500	75
Cromo	3,000	1,200	3,000	150
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	18 ^d	18 ^d	- ^d
Níquel	420	420	420	21
Plomo	840	300	300	15
Selenio	100	36 ^d	100	5.0
Zinc	7,500	2,800	2,800	140
Aplicable a:	Todos los lodos que son aplicados al suelo	Lodo a granel y lodo embolsado ^e	Lodos a granel	Lodo embolsado ^e
De la Parte 503	Cuadro 1, Sección 503.13	Cuadro 3, Sección 503.13	Cuadro 2, Sección 503.13	Cuadro 4, Sección 503.13

^a Base peso seco (b.p.s.).

^b Todos los lodos muestreados deben cumplir las máximas concentraciones, como mínimo, para que puedan aplicarse al suelo (valores instantáneos).

^c Promedios mensuales.

^d EPA está reexaminando esos límites.

^e El lodo embolsado que es vendido o dado en bolsas o en otros contenedores para la aplicación al suelo.

- El lodo también deberá cumplir las alternativas exigidas para la reducción de patógenos y las opciones para la reducción de atracción de vectores.

2.7.2 Cálculo basado en Nitrógeno

No todo el N en el lodo está disponible inmediatamente para las plantas, ya que algunos están presentes como N orgánico, en tejidos de células microbianas y en otros compuestos orgánicos. El N orgánico deberá descomponerse a formas minerales o inorgánicas, tales como NH_4 y NO_3 , antes de que pueda ser usado por las plantas. Por lo tanto, la disponibilidad del N orgánico para las plantas depende de la descomposición microbiana de los materiales orgánicos en el suelo (por ejemplo lodo, estiércol, residuos vegetales, materia orgánica del suelo, etc.).

La porción del N orgánico del lodo que es mineralizado en un suelo depende de varios factores, los cuales influyen la inmovilización y mineralización de las formas orgánicas del N (Bartholomew, 1965; Harmsen and van Schreven, 1955; Smith and Peterson, 1982; Sommers and Giordano, 1984).

La estimación del N mineralizado usando una serie de descomposición no es precisa, ya que el N disponible actual dependerá de la composición del N orgánico, el grado del tratamiento o estabilización del lodo antes de la aplicación al suelo, clima, condiciones del suelo y otros factores. Otro método para predecir la disponibilidad del N es modelar (matemáticamente) la transformación del N en el suelo. De cualquier modo, todavía no ha sido encontrada la modelación adecuada para dar más que una estimación general del N disponible (Schepers and Fox, 1989). Sin embargo, las estrategias de manejo deberán intentar balancear la adición del N disponible para las plantas, suministrado por la aplicación al suelo de materiales orgánicos como el lodo, con las necesidades del cultivo. De lo contrario, los excesos de NO_3 pueden lixiviarse dentro del agua subterránea por precipitación o pobre manejo del agua de riego (Keeney, 1989).

El N disponible para las plantas, o el ND, suministrado por el lodo está influenciado por varios factores. Inicialmente, la cantidad del N total en el lodo y las concentraciones de

NO₃, NH₄ y N orgánico (los cuales juntos hacen el N total) deberán de determinarse. Comúnmente, las concentraciones del N orgánico son estimadas substrayendo las concentraciones del NO₃ y NH₄ del N total, por lo tanto, N orgánico = N total – (NO₃ + NH₄). El NH₄ y el NO₃ agregados por el lodo son considerados disponibles para las plantas para utilizarse como NH₄ y NO₃, semejante a los agregados por las sales de los fertilizantes u otras fuentes de esas formas mineralizadas del N.

La disponibilidad del N orgánico del lodo depende del tipo de tratamiento o estabilización que recibió el lodo. El lodo digerido anaerobicamente normalmente tendrá altos niveles de NH₄ y muy poco NO₃, mientras el lodo digerido aerobicamente tendrá altos niveles de NO₃ por comparación. El composteo y la digestión anaerobia realizan grandes estabilizaciones de los componentes de carbón orgánico que la digestión aeróbica o activación de residuos. A mayor la estabilización, menor es el factor de mineralización de los compuestos de carbono (conteniendo formas orgánicas el lodo) y menores las cantidades de N orgánico liberado para las plantas.

La diferencia entre los diferentes tipos de lodo puede observarse en el Cuadro 2-13 los cuales muestran un promedio de mineralización del primero al cuarto año siguiendo una aplicación de lodo (Sommers *et al.*, 1981).

Cuadro 2-13. Factores de mineralización (K_{min}) para diferentes lodos (Adaptado de Sommers *et al.*, 1981).

Tiempo después de la aplicación del lodo (años)	Fracción (K _{min}) [*] del N orgánico mineralizado de los siguientes lodos:			
	Primario desestabilizado	Digerido aerobicamente	Digerido anaerobicamente	Composteo
0-1	0.40	0.30	0.20	0.10
1-2	0.20	0.15	0.10	0.05
2-3	0.10	0.08	0.05	- [†]
3-4	0.05	0.04	-	-

* Fracción del N orgánico del lodo aplicado inicialmente, o restante en el suelo, que será mineralizado durante el intervalo de tiempo señalado. Los valores de K_{min} están dados sólo como ejemplos y pueden ser totalmente diferente para diferentes lodos, suelos y climas. Por lo tanto, deberán usarse de preferencia datos del sitio específico o los mejores juicios relacionados con la dinámica del N en el sistema suelo-planta.

[†] Una vez que el factor de mineralización es menor del 3% (0.03) no produce ganancias de ND arriba del obtenido normalmente de la mineralización de la materia orgánica del suelo. Por lo tanto los créditos adicionales para el N residual del lodo no necesitará calcularse.

Esos valores, de cualquier modo, son sólo promedios y pueden variar significativamente debido a las diferencias en las características del lodo, suelo y clima (por ejemplo, temperatura y precipitación). Por ejemplo, asumiendo que una humedad adecuada está disponible para la descomposición microbial, aumentos en la temperatura incrementarán la actividad de los microorganismos. Por lo tanto, los factores de mineralización son típicamente altos en los meses de verano que en los meses de invierno. debido a esas diferencias, el cálculo de la dosis agronómica deberá hacerse sobre un sitio específico base.

La cantidad de ND también será afectada por la cantidad de NH_4 perdida por la volatilización del amoníaco (NH_3). Las pérdidas de volatilización del amoníaco, cuando estiércol de animal o lodo es aplicado al suelo, han sido reconocidas (Adriano *et al.*, 1974; Beauchamp *et al.*, 1978, 1982; Brunke *et al.*, 1988; Hall and Ryden, 1986; Hoff *et al.*, 1981; Laurer *et al.*, 1976; Rank *et al.*, 1988; Reddy *et al.*, 1979; Terman, 1979; Vallis *et al.*, 1982). Actualmente estimar el grado de esta pérdida es difícil, de cualquier modo, la variabilidad en las condiciones climáticas dictan que tan rápido ocurre la volatilización.

Además de las condiciones climáticas, el método de aplicación del lodo, el período de tiempo en que el lodo permanece sobre la superficie del suelo previo a la incorporación y el pH del lodo (conteniendo cal), también influenciarán el potencial de pérdidas por volatilización. Un pH alto en el lodo o suelo facilitará la conversión de NH_4 a NH_3 , resultando en una pérdida de N a la atmósfera. Entre más tiempo permanezca el lodo en la superficie del suelo y esté sujeto a condiciones secas, mayor es el riesgo de pérdidas de volatilización del NH_3 .

Con la inyección del lodo líquido, poco NH_3 deberá perderse por volatilización, excepto posiblemente sobre suelos de textura granular (arenosos). Las pérdidas por volatilización, de cualquier modo, deberán considerarse para el lodo líquido aplicado superficialmente y que es incorporado después y para el lodo deshidratado aplicado superficialmente y que es incorporado después o permanece sobre la superficie. Este N

perdido necesariamente debe ser considerado, o la cantidad de ND reportada a los agricultores, así como el aplicado inicialmente, serán sobrestimados.

Por esa razón, el Cuadro 2-14 puede servir como guía para estimar el NH_4 perdido como NH_3 . Indicando primero, que esos factores de volatilización pueden no ser los más adecuados para un sitio específico, de esta manera, los valores deberán obtenerse de agencias estatales o universidades que son más específicas para una localidad particular.

Cuadro 2-14. Perdidas de volatilización de NH_4 como NH_3 .

Tipo de lodo y método de aplicación	Factor de volatilización del NH_3, K_{vol}
Líquido y aplicado superficialmente	0.50
Líquido e inyectado dentro del suelo	1.0
Deshidratado y aplicado superficialmente	0.50

Teniendo esos factores en mente, un determinado número de pasos pueden usarse para determinar la dosis agronómica (basada en el ND):

1. Determinar la dosis recomendada de fertilización de N para el cultivo y el nivel de producción estimada sobre el suelo que recibirá la aplicación de lodo. (ya que los cultivos leguminosos pueden fijar su propio nitrógeno, estos usualmente no tienen una recomendación de fertilización para N. Los cultivos leguminosos, de cualquier modo, utilizan el N que es aplicado como fertilizante, estiércol o lodo, de esta manera el N removido por el cultivo puede usarse para estimar los requerimientos de N para esos cultivos).
2. Sustraer anticipadamente los créditos de N de las dosis de fertilización recomendadas, debido a otras fuentes de N tales como las siguientes:
 - a. Nitrógeno residual dejado por cultivos leguminosos anteriores (las leguminosas tienen la habilidad de fijar el N del aire, y variados niveles de N serán dejados en el suelo cuando las leguminosas sean remplazadas por otros cultivos; las universidades pueden dar los créditos apropiados que pueden usarse para un sitio particular).

- b. Cualquier N que haya sido aplicado o sea aplicado durante el crecimiento del cultivo por fertilizantes, estiércoles u otras fuentes que estén disponibles para las plantas.
- c. Cualquier N que este previsto agregarse por el agua de riego y que será aplicado durante el crecimiento del cultivo.
- d. Cualquier N orgánico residual restante de aplicaciones previas de lodo. Discutido así anteriormente, el Cuadro 2-13 lista los promedios de los factores de mineralización. Experiencias en el tiempo han demostrado que cuando las dosis agronómicas del lodo son usadas, ningún ND arriba del normalmente obtenido de la materia orgánica del suelo es esperado después de 3-4 años. Por lo tanto, calcular los créditos del ND para una aplicación de lodo más allá del tercer año no es recomendado, porque esas cantidades son insignificantes.
- e. El N orgánico residual restante de aplicaciones anteriores de estiércol de animal deberán estimarse. El N liberado de aplicaciones previas de estiércol pueden estimarse de una manera similar como para las aplicaciones de lodo (paso 2.d).
- f. El N residual combinado ya presente en el suelo o el disponible esperado para el uso de los cultivos, puede algunas veces estimarse por análisis de nitrato del suelo (por ejemplo, el N inorgánico dejado en aplicaciones previas de fertilizante, estiércoles, lodo, etc.; o créditos dados por la mineralización de la materia orgánica del suelo y residuos de cultivos leguminosos). Los análisis de nitratos del suelo pueden usarse para estimar las cantidades de NH_3 que pueden estar presentes de previas aplicaciones de fertilizantes de N, estiércoles, lodos, mineralización de N de cultivos leguminosos y materia orgánica del suelo. Pero debido a que el NH_3 puede perderse por lixiviación, los análisis de nitrato del suelo deberán usarse con cuidado en los climas húmedos y semi-húmedos.

Si un análisis del nitrato del suelo es usado para determinar las contribuciones del N residual, entonces las estimaciones para los pasos 2a, 2d y 2e no deberán incluirse.

3. Agregar cualquier pérdida anticipada de N debido a desnitrificación, inmovilización o fijación química del NH_4 por arcillas minerales micaceous (conteniendo mica) (sólo si está aprobado). La desnitrificación [la pérdida de NH_3 como (N_2) o en gases de óxido nitroso (N_2O)] e inmovilización (las pérdidas del NO_3 o NH_4 por incorporación dentro de los compuestos orgánicos de la biología del suelo) pueden ocurrir en el suelo. Para los suelos que contienen arcillas minerales de mica hidratadas, algunos NH_4 pueden llegar a fijarse dentro de los cristales de esas sales en espacios normalmente ocupados por K^+ . Si esto ocurre, el NH_4 no está disponible para las plantas a menos que ocurra un deterioro en el mineral para que pueda liberarse el NH_4 .

Las fuentes de NO_3 y NH_4 pueden ser de fertilizantes, estiércoles, así como de aplicaciones de lodo. Si en la dosis de fertilización recomendadas se usan promedios de pérdidas debido a la desnitrificación e inmovilización biológica o fijación del NH_4 , un crédito separado de esos procesos deberá usarse para este paso. Por lo tanto, la adición anticipada de esas pérdidas no debe hacerse a menos que este justificada.

4. Determinar el ajuste de la dosis de fertilización del N substrayendo el N total disponible existente, el anticipado y las fuentes planeadas del requerimiento total del cultivo. Si una pérdida de N disponible por desnitrificación, inmovilización o fijación de NH_4 es justificada, esta pérdida anticipada debe agregarse a la diferencia obtenida, para obtener un ajuste final de la dosis de fertilización del N.
5. Determinar el ND/ton de lodo base peso seco (b.p.s) para el primer año de aplicación usando la siguiente ecuación:

$$ND = NO_3 + K_{vol}(NH_4) + K_{min}(NO) \quad (1)$$

Donde:

ND = Nitrógeno disponible en kg/ton de lodo b.p.s.

NH₄ = Contenido de amonio en el lodo en kg/ton de lodo b.p.s.

NO₃ = Contenido de nitrato en el lodo en kg/ton de lodo b.p.s.

NO = Contenido de nitrógeno orgánico en el lodo, se puede estimar de la siguiente manera NO = Nitrógeno total-(NH₄+ NO₃), en kg/ton de lodo b.p.s.

K_{vol} = Factor de volatilización, o fracción del NH₄ que no se pierde como gas NH₃ a la atmósfera.

K_{min} = Factor de mineralización o fracción de NO convertido a ND.

6. Dividir la dosis de fertilización de N ajustada (paso 4) por el ND/ton de lodo b.p.s. (paso 5) para obtener la dosis agronómica de N en ton b.p.s./ha.

2.7.3 Cálculo basado en fósforo

La mayoría del fósforo en el lodo está presente en forma de compuestos inorgánicos. Mientras la mineralización de las formas orgánicas del P ocurren durante la descomposición de la materia orgánica del lodo, las reacciones inorgánicas del P son de gran importancia cuando se consideran adiciones de P con lodo. A causa del predominio del P inorgánico, el contenido de P en el lodo es considerado que casi el 50% está disponible para las plantas como el P normalmente aplicado a los suelos con fertilizantes comerciales (super fosfato triple, fosfato diamónico, etc.). Las necesidades de P del cultivo para su crecimiento son determinadas del análisis de la fertilidad del suelo para el P disponible y la producción del cultivo. La dosis agronómica del P para aplicarse al suelo puede determinarse por la siguiente ecuación:

$$\text{Dosis agronómica para P} = P_{\text{req}} \div P_2O_5 \text{ disponible} \quad (2)$$

Donde:

Dosis agronómica para P = ton lodo b.p.s./ha

P_{req} = Dosis de fertilización del P para el cultivo, o la cantidad de P removida por el cultivo, en kg/ha.

P₂O₅ disponible = 0.5 x (P₂O₅ total/ton b.p.s.), en kg/ton b.p.s.

P_2O_5 total/ton b.p.s. = %P en el lodo x 10 x 2.3^{*}, en kg/ton b.p.s.

* 2.3 es el factor para convertir kg de P a kg de P_2O_5 (la relación de los pesos atómicos del P_2O_5 : P, 142:62).

2.7.4 Cálculo basado en los límites de contaminante

La literatura pertinente a las adiciones de elementos (metales) pesados o traza al sistema suelo-planta por aplicaciones de lodo es extensa, y varias referencias importantes pueden ser una fuente de una discusión más profunda

El posible riesgo asociado con las adiciones de elementos pesados radica principalmente en su acumulación en los suelos, los cuales pueden: 1) inducir condiciones de toxicidad para las plantas y 2) resultar en un incremento la asimilación de elementos pesados dentro de la cadena alimenticia.

Los límites de contaminante establecidos por EPA en la 40 CFR Parte 503 protegen la salud humana y el medio ambiente de efectos adversos anticipados razonablemente de los contaminantes que pueden estar presentes en el lodo.

Debido a que la mayoría de los lodos probablemente tendrán concentraciones de contaminantes que no exceden los límites de concentración de contaminante de la Parte 503, los límites de carga de contaminante no serán un factor en la determinación de las dosis de aplicación para esos lodos.

Para otros lodos que tienen concentraciones de contaminante que exceden uno o más de los límites de concentración de contaminante de la Parte 503, los límites de carga acumulada de contaminante (LCAC) mostrados en el Cuadro 2-12 deberán cumplirse; los LCAC pueden eventualmente ser los factores limitantes para las dosis anuales de aplicación de lodo (en vez de las dosis agronómicas).

Para los lodos que cumplen con los LCAC de la Parte 503, dos ecuaciones son útiles para manejar las cargas de contaminante a los suelos. La primera ecuación puede usarse para estimar la cantidad máxima total de lodo que se permitirá aplicar al suelo, basándose en los LCAC y en las concentraciones de contaminantes en el lodo consideradas inicialmente:

$$\text{Máximo lodo permitido} = \text{LCAC} \div 0.001 \text{ (ppm de contaminante)} \quad (3)$$

Donde:

Máximo lodo permitido = Máxima carga de lodo que puede aplicarse al suelo, ton b.p.s./ha.

LCAC = Límites de carga acumulada de contaminante, kg/ha.

ppm de contaminante = mg de contaminante contenido por kg de lodo peso seco.

Después de hacer estos cálculos para cada uno de los 10 contaminantes regulados por la Parte 503, el valor más bajo del lodo deberá usarse como la cantidad máxima permitida de lodo que se aplicará para un sitio en particular.

Una segunda ecuación, puede usarse para determinar la carga de contaminante individual agregada por cada dosis de aplicación de lodo:

$$\text{Kg de contaminante/ha} = \text{dosis de lodo (ton b.p.s./ha)} \times 0.001 \text{ (ppm de contaminante)} \quad (4)$$

Un registro acumulativo de cada aplicación individual, es entonces guardada para cada suelo que recibe lodo y que está cumpliendo los LCAC. Cuando la cantidad acumulada de cualquier contaminante regulado alcanza su LCAC, ningún lodo LCAC puede ser aplicado.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Características y localización de las plantas de tratamiento

Los Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D. (SADM), para el saneamiento de las aguas residuales del Area Metropolitana de Monterrey cuenta con tres plantas de tratamiento (Norte, Noreste y Dulces Nombres) descargando dichas aguas el Río Pesquería. En el Cuadro 3-1 se presentan las características principales y en la Figura 3-1 la localización de dichas plantas.

Cuadro 3-1. Características principales de las plantas: Norte, Noreste y Dulces Nombres.

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

La metodología aplicada en el presente estudio comprendió cinco etapas:

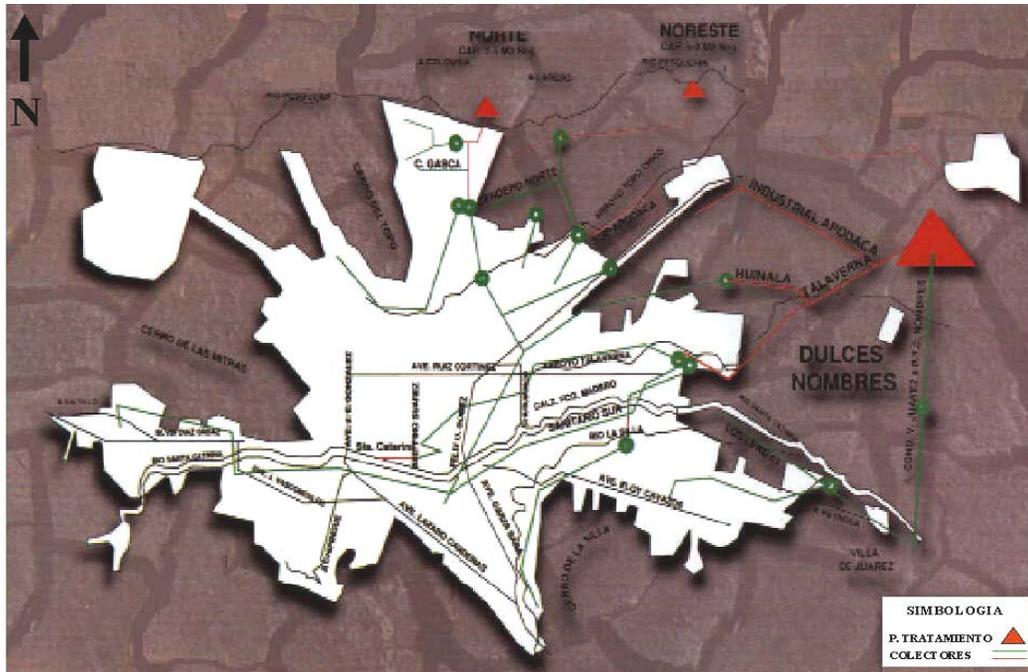


Figura 3-1. Localización de las plantas de tratamiento de aguas residuales: Norte, Noreste y Dulces Nombres. Nuevo León.

3.2 Primera etapa:

Caracterización preliminar CRETIB para determinar la peligrosidad del lodo de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales de Monterrey, N.L. de acuerdo a su: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico infeccioso según la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993 que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al medio ambiente.

3.2.1 Corrosividad

Se refiere a la facilidad que tienen algunos residuos para corroer los materiales comunes, o su capacidad para disolver contaminantes tóxicos. Cuadro 3-2.

Cuadro 3-2. Parámetros que determinan si un residuo es corrosivo.

Parámetro	Unidades	Límite
pH	pH	2 < pH < 12.5
Corrosión del acero al carbón (SAE 1020)	mm/año	6.35

3.2.2 Reactividad

Los residuos se consideran peligrosos por su reactividad si durante su manejo rutinario, tienden a reaccionar de manera espontánea o vigorosa con el aire o el agua, o tienden a ser inestables por golpes o calor, y generar gases tóxicos o humos. Cuadro 3-3.

Cuadro 3-3. Parámetros que determinan si un residuo es peligroso debido a su reactividad.

Parámetro	Unidades	Límite
Reactividad en condiciones normales (25°C y 1 atmósfera)	Positivo/negativo	
Reacción en agua (25°C y 1 atmósfera)	Positivo/negativo	
Contenido de cianuros	mg HCN/kg	250
Contenido de sulfuros	mg H ₂ S/kg	500
Reacción con soluciones ácidas/básicas (25°C y 1 atmósfera)	Positivo/negativo	
Producción de radicales libres	Positivo/negativo	

3.2.3 Explosividad

Se refiere a la capacidad que tienen los residuos para producir una reacción o descomposición detonante o explosiva. Cuadro 3-4.

Cuadro 3-4. Parámetros que determinan a un residuo peligroso debido a su explosividad.

Parámetro	Unidades
Constante de explosividad \geq dinitrobenceno	Positivo/negativo
Reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm ² de presión	Positivo/negativo

3.2.4 Toxicidad

La toxicidad es la capacidad que tienen algunos residuos para liberar sustancias tóxicas en cantidades suficientes que representen un grave peligro para la salud humana y el medio ambiente. La toxicidad se determina por medio de la prueba de extracción para toxicidad. En los Cuadros 3-5, 3-6 y 3-7 se presentan los principales compuestos inorgánicos y orgánicos de mayor preocupación.

Cuadro 3-5. Compuestos inorgánicos de mayor preocupación.

Parámetro	Unidades	Límite
Arsénico	mg/L	5.0
Bario	mg/L	100.0
Cadmio	mg/L	1.0
Cromo Hexavalente	mg/L	5.0
Mercurio	mg/L	5.0
Níquel	mg/L	0.20
Plata	mg/L	5.0
Plomo	mg/L	5.0
Selenio	mg/L	1.0

Cuadro 3-6. Compuestos orgánicos no volátiles de mayor preocupación.

Parámetro	Unidades	Límite
Acrilonitrilo	mg/L	5.0
Clordano	mg/L	0.03
o-cresol	mg/L	200.0
m-cresol	mg/L	200.0
p-cresol	mg/L	200.0
Acido 2,4-diclorofenoxiacético	mg/L	10.0
2,4-dinitrotolueno	mg/L	0.13
Endrin	mg/L	0.02
Heptacloro (y su epóxido)	mg/L	0.008
Hexacloroetano	mg/L	3.0
Lindano	mg/L	0.4
Metoxicloro	mg/L	10.0
Nitrobeneno	mg/L	2.0
Pentaclorofenol	mg/L	100.0
2,3,4,6-tetraclorofenol	mg/L	1.5
Toxafeno	mg/L	0.5
2,4,5-triclorofenol	mg/L	400.0
2,4,6-triclorofenol	mg/L	2.0
Acido 2,4,5-triclorofenoxiacético (silvex)	mg/L	1.0

Cuadro 3-7. Compuestos orgánicos volátiles de mayor preocupación.

Parámetro	Unidades	Límite
Benceno	mg/L	0.5
Eter bis (2-cloro etílico)	mg/L	0.05
Clorobenceno	mg/L	100.0
Cloroformo	mg/L	6.0
Cloruro de metileno	mg/L	8.6
Cloruro de vinilo	mg/L	0.2
1,2-diclorobenceno	mg/L	4.3
1,4-diclorobenceno	mg/L	7.5
1,2-dicloroetano	mg/L	0.5
1,1-dicloroetileno	mg/L	0.7

Cuadro 3-7. Compuestos orgánicos volátiles de mayor preocupación (continuación).

Parámetro	Unidades	Límite
Disulfuro de carbono	mg/L	14.4
Fenol	mg/L	14.4
Hexaclorobenceno	mg/L	0.13
Hexaclorobutadieno	mg/L	0.5
Isobutanol	mg/L	36.0
Etil metil cetona	mg/L	200.0
Piridina	mg/L	5.0
1,1,2,2-tetracloroetano	mg/L	1.3
1,1,1,2-tetracloroetano	mg/L	10.0
Tetracloruro de carbono	mg/L	0.5
Tetracloroetileno	mg/L	0.7
Tolueno	mg/L	14.4
1,1,1-tricloroetano	mg/L	30.0
1,1,2-tricloroetano	mg/L	1.2
Tricloroetileno	mg/L	0.5

3.2.5 Inflamabilidad

La inflamabilidad se refiere a los residuos que representan un peligro de incendio durante su manejo rutinario. Cuadro 3-8.

Cuadro 3-8. Parámetros que determinan si un residuo es peligroso por su inflamabilidad.

Parámetro	Unidades	Límite
Contenido de alcohol	% volumen	24
Punto de inflamación	°C	60
Capacidad de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25° y a 1.03 kg/cm ²)	Positivo/negativo	

3.2.6 Biológico infeccioso

Refiriéndose al contenido de bacterias, virus u otros microorganismos con capacidad de infección, así como al contenido de toxinas producidas por microorganismos que causen efectos nocivos a los seres vivos.

3.3 Segunda etapa:

Selección de los lodos que tienen aptitud para usarse como fertilizantes y/o mejorador de suelos según las normas de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) 40 CFR Parte 503 (Estándares para el uso y disposición de lodos residuales, que establecen los requerimientos para la aplicación al suelo de los lodos residuales) y considerando criterios de salinidad para las zonas áridas y semiáridas.

3.3.1 Contenido de metales pesados

Se analizaron los diez metales pesados de mayor preocupación y regulados bajo la 40 CFR Parte 503. Cuadro 3-9.

Cuadro 3-9. Metales regulados bajo la 40 CFR Parte 503 y límites permisibles para la aplicación de lodo al suelo.

Metal	Límites máximos de concentración (mg/kg)^{a,b}	Límites de concentración de contaminante (mg/kg)^{a,c}
Arsénico	75	41
Cadmio	85	39
Cobre	4,300	1,500
Cromo	3,000	1,200
Mercurio	57	17
Molibdeno	75	18
Níquel	420	420
Plomo	840	300
Selenio	100	36
Zinc	7,500	2,800
Aplicable a:	Todos los lodos que son aplicados al suelo	Lodo a granel y lodo embolsado ^e
De la Parte 503	Tabla 1, Sección 503.13	Tabla 3, Sección 503.13

^a Base peso seco.
^b Todos los lodos deben cumplir las máximas concentraciones, como mínimo, para que puedan aplicarse al suelo.
^c Promedios mensuales.

3.3.2 Contenido de químicos orgánicos sintéticos

Se analizaron los químicos orgánicos sintéticos identificados en la evaluación de riesgos de EPA (1995b). Cuadro 3-10.

Cuadro 3-10. Químicos orgánicos identificados en la evaluación de riesgos de EPA y límites permisibles para la aplicación de lodo al suelo.

Parámetro	Unidades	Límite EPA
Aldrin/ Dieldrin (Total)	mg/kg ps*	2.7
Benceno	mg/kg ps	16,000
Benzopireno	mg/kg ps	15
Zclordano	mg/kg ps	86
DDD/DDE/ DDT (total)	mg/kg ps	120
Fluoruro	mg/kg ps	730
Heptacloro	mg/kg ps	7.4
Hexaclorobenceno	mg/kg ps	29
Hexaclorobutadieno	mg/kg ps	600
Lindano	mg/kg ps	84
N-Nitrosodimetilamina	mg/kg ps	2.1
Pentaclorofenol	mg/kg ps	30
PCB's	mg/kg ps	4.6
Toxafeno	mg/kg ps	10
Tricloroetileno	mg/kg ps	10,000

* miligramos de contaminante por kilogramo de lodo base peso seco

3.3.3 Contenido de microorganismos

Se analizó el contenido de microorganismos contenidos en los lodos tales como bacterias, virus y helmintos, comparándose contra los límites permisibles de EPA. Cuadro 3-11.

Cuadro 3-11. Límites permisibles o aceptables de microorganismos contenidos en los lodos para la aplicación al suelo, reportados por la EPA.

Microorganismos	EPA	
	Clase A	Clase B
Coliformes Totales		
Coliformes Fecales	< 1,000 NMP/gr de sólido total (peso seco)	2,000,000 CFU ó NMP/gr de sólido total (peso seco)
<i>Salmonella</i> sp.	< 3 NMP/4 gr de sólido total (peso seco)	a

^a Información no disponible.

NMP: Número más probable

CFU: Colonias contadas

3.3.4 Contenido de sales

Conductividad eléctrica.

3.3.5 Clasificación de los lodos de las plantas de tratamiento de agua residual en base a los rangos establecidos para metales pesados por la EPA

3.3.6 Selección de los lodos que tienen aptitud agrícola en base a las normas de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos

3.4 Tercera etapa:

Determinación de la factibilidad del uso de los lodos de acuerdo a: clima, topografía, geología, hidrología: subterránea y superficial, edafología, y patrones de cultivo de los municipios siguientes: Apodaca, General Zuazua, Marín y Pesquería, N.L.

3.4.1 Clima

Clasificación climática, temperatura media mensual y precipitación media mensual.

3.4.2 Topografía

Pendiente y topoforma.

3.4.3 Geología

Tipos de roca y suelo.

3.4.4 Hidrología

3.4.4.1 Hidrología subterránea: calidad y uso del agua subterránea, nivel estático, tipo y condición del material consolidado.

3.4.4.2 Hidrología superficial: cuerpos de agua superficiales.

3.4.5 Edafología

Grupos y unidades de suelo, textura, estructura, profundidad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, pH, permeabilidad, infiltración, drenaje interno y contenido de metales pesados.

3.4.6 Cultivo

Patrones de cultivo, época de siembra, época de cosecha y demanda de nutrientes de los cultivos.

3.5 Cuarta etapa:

Estimación de: nutrientes y materia orgánica contenidos en el lodo, dosis de aplicación, superficie requerida para aplicar los lodos y número de años que puede utilizarse el lodo seleccionado como suplemento parcial de fertilizantes.

3.5.1 Contenido de N, P y K disponibles para las plantas y materia orgánica

3.5.2 Estimación de las dosis de aplicación de lodo en base a nitrógeno y superficie de suelo que se requeriría para aplicar el lodo seleccionado y generado en un año

3.5.3 Estimación de la máxima carga de lodo que se puede aplicar por unidad de superficie en base al contenido de metales pesados

3.5.4 Número de años que puede utilizarse el lodo como suplemento parcial de fertilizantes

3.6 Quinta etapa:

Análisis económico para determinar el posible ahorro económico con el uso del lodo como suplemento parcial de fertilizantes o mejorador de suelos, en los procesos de

tratamiento y disposición del lodo, así como en los costos derivados por el uso de fertilizantes comerciales usados en la producción de los cultivos.

3.6.1 Posible ahorro en los costos del tratamiento y disposición de lodos

3.6.2 Posible ahorro en los costos derivados por el uso de fertilizantes comerciales usados en la producción de los cultivos

3.6.3 Posible ahorro anual

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Primera Etapa

Caracterización preliminar CRETIB para determinar la peligrosidad del lodo de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales de Monterrey, N.L. de acuerdo a su: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico infeccioso según la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993 que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al medio ambiente.

Los análisis del CRETIB fueron realizados por los laboratorios siguientes: Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey e Investigación y Desarrollo Químico, S.A. de C.V. La revisión de dichos análisis comprenden los meses de febrero, marzo, mayo, julio, septiembre y noviembre de los años de 1995, 1996, 1997 y 1998. No todos los parámetros de cada una de las pruebas del CRETIB reportan resultados, ya que los laboratorios mencionan que no existe metodología oficial al respecto o simplemente consideran que no se aplica la prueba a ciertos parámetros del CRETIB debido al origen y naturaleza del lodo, por lo que algunas pruebas del CRETIB sólo se enfocan a ciertos parámetros.

4.1.1 Planta Dulces Nombres

4.1.1.1 Corrosividad

En el Cuadro 4-1 se presentan los resultados de corrosividad para el lodo de esta planta contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993. Los valores reportados de pH indican que ninguno rebasa el límite superior de 12.5 y tampoco ninguno se encuentra

por debajo del límite inferior de 2, el resultado de mayor valor es de 8.78 y el de menor valor es de 7.30. La corrosión del acero no fue analizada para ninguno de los casos.

4.1.1.2 Reactividad

Los análisis realizados de la reactividad para esta planta, están enfocados al contenido de cianuros y sulfuros. Para el caso del contenido de sulfuros ningún resultado rebasa el límite máximo de 500 mg H₂S/kg el valor más alto es de 107 mg H₂S/kg. Los resultados que indican el contenido de cianuros tampoco rebasan el límite máximo de 250 mg HCN/kg, en general los valores son menores a los 10 mg HCN/kg. Sólo se reporta un resultado que indica que el lodo: no presenta reactividad en condiciones normales (25°C y 1 atmósfera); no reacciona con el agua en condiciones normales y no reacciona con soluciones ácidas/básicas en condiciones normales. No se analizó si el lodo produce radicales libres.

4.1.1.3 Explosividad

Los dos parámetros que determinan si el lodo es explosivo no se analizaron debido a que los laboratorios reportan que no existe metodología oficial al respecto. Cuadro 4-3.

4.1.1.4 Toxicidad

Los resultados de toxicidad obtenidos mediante la prueba de extracción para toxicidad, de los principales compuestos inorgánicos, orgánicos no volátiles y orgánicos volátiles de mayor preocupación y listados en la NOM-052-ECOL-1993, se presentan en los Cuadros 4-4, 4-5 y 4-6. Los valores de toxicidad para los compuestos inorgánicos son menores a los límites que marca la norma. Los compuestos orgánicos no volátiles: clordano, ácido 2,4-diclorofenoxiacético, endrin, heptacloro, lindano, metoxicloro, toxafeno, ácido 2,4,5-Triclorofenoxipropiónico (silvex) sólo se analizaron en dos ocasiones los cuales no rebasan los límites permisibles de la norma, los resultados para los demás compuestos orgánicos no volátiles tampoco rebasan los límites de la norma. Los valores reportados para los compuestos orgánicos volátiles son menores a los límites permisibles.

Cuadro 4-1. Resultados de corrosividad del lodo de la planta Dulces Nombres contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Parámetro	Resultado 9-1996	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 7-1997	Resultado 9-1997	Resultado 11-1997	Resultado 2-1998	Límite máximo
pH	7.30	8.43	7.93	8.44	8.04	7.48	8.46	8.78	7.63	2<pH<12.5
Corrosión del acero al carbón (SAE 1020)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	6.35 mm/año

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-2. Resultados de reactividad del lodo de la planta Dulces Nombres contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Parámetro	Resultado 9-1996	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 7-1997	Resultado 9-1997	Resultado 11-1997	Resultado 2-1998	Límite máximo
Reactividad en condiciones normales (25°C y 1 atmósfera)	Negativo	*	*	*	*	*	*	*	*	
Reacción en agua (25°C y 1 atmósfera)	Negativo	*	*	*	*	*	*	*	*	
Sulfuros (H ₂ S) (mg/kg)	107.00	< 50.0	< 50.0	< 50.0	< 50.0	< 50.0	< 50.0	< 50.0	< 50.0	500.00
Cianuros (HCN) (mg/kg)	< 10.00	< 0.50	< 0.50	< 0.50	4.20	< 0.50	< 0.50	< 0.50	< 0.50	250.00
Reacción con soluciones ácidas/ básicas (25°C y 1 atmósfera)	Negativo	*	*	*	*	*	*	*	*	
Producción de radicales libres	*	*	*	*	*	*	*	*	*	

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-3. Resultados de explosividad del lodo de la planta Dulces Nombres.

Parámetro	Resultado 9-1996	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 7-1997	Resultado 9-1997	Resultado 11-1997	Resultado 2-1998
Constante de explosividad ≥ dinitrobenzeno	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm ² de presión	*	*	*	*	*	*	*	*	*

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-4. Resultados de toxicidad para compuestos inorgánicos del lodo de la planta D. N. contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Compuesto	Resultado 9-1996 (mg/L)	Resultado 11-1996 (mg/L)	Resultado 2-1997 (mg/L)	Resultado 3-1997 (mg/L)	Resultado 5-1997 (mg/L)	Resultado 7-1997 (mg/L)	Resultado 9-1997 (mg/L)	Resultado 11-1997 (mg/L)	Resultado 2-1998 (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
Arsénico	< 0.005	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.025	5.0
Bario	< 0.150	< 1.00	< 1.00	< 1.00	< 1.00	< 1.00	< 1.00	< 1.00	< 1.00	100.0
Cadmio	< 0.020	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.10	< 0.10	< 0.05	< 0.05	1.0
Cromo Hexavalente	< 0.010	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	5.0
Mercurio	< 0.050	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.20
Níquel	0.900	1.34	0.71	1.28	1.69	0.64	0.43	1.28	0.76	5.0
Plata	< 0.100	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.21	< 0.10	< 0.10	5.0
Plomo	< 0.100	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.08	< 0.08	5.0
Selenio	< 0.005	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.12	< 0.05	< 0.05	< 0.04	< 0.025	1.0

Cuadro 4-5. Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos no volátiles del lodo de la planta D. N. contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Compuesto	Resultado 9-1996 (mg/L)	Resultado 11-1996 (mg/L)	Resultado 2-1997 (mg/L)	Resultado 3-1997 (mg/L)	Resultado 5-1997 (mg/L)	Resultado 7-1997 (mg/L)	Resultado 9-1997 (mg/L)	Resultado 11-1997 (mg/L)	Resultado 2-1998 (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
Acilonitrilo	N.D.	< 0.50	< 0.50	< 0.50	< 0.50	< 0.50	< 0.50	< 0.50	< 0.50	5.0
Clordano	N.D.	*	*	*	*	*	*	<0.00020	*	0.03
o-Cresol	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	200.0
m-Cresol	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.175	< 0.005	0.023	0.042	200.0
p-Cresol	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.175	< 0.005	0.023	0.042	200.0
Acido 2,4-Diclorofenoxiacético	N.D.	*	*	*	*	*	*	< 0.1	*	10.0
2,4-Dinitrotolueno	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.13
Endrin	N.D.	*	*	*	*	*	*	<0.00002	*	0.02
Heptacloro (y su epóxido)	N.D.	*	*	*	*	*	*	0.000084	*	0.008
Hexacloroetano	N.D.	< 0.16	< 0.16	< 0.16	< 0.16	< 0.16	< 0.16	< 0.16	< 0.16	3.0
Lindano	N.D.	*	*	*	*	*	*	< L.P.C.	*	0.4
Metoxicloro	N.D.	*	*	*	*	*	*	<0.00002	*	10.0
Nitrobeneno	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	2.0
Pentaclorofenol	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	100.0
2,3,4,6-Tetraclorofenol	N.D.	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	1.5
Toxafeno	N.D.	*	*	*	*	*	*	<0.00040	*	0.5
2,4,5-Triclorofenol	N.D.	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	400.0
2,4,6-Triclorofenol	N.D.	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	2.0
Acido 2,4,5-Triclorofenoxipropionico (silvex)	N.D.	*	*	*	*	*	*	0.415	*	1.0

N.D.= No detectado; * Parámetro no analizado; L.P.C. = Limite práctico de cuantificación.

Cuadro 4-6. Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos volátiles del lodo de la planta D. N. contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Compuesto	Resultado 9-1996 (mg/L)	Resultado 11-1996 (mg/L)	Resultado 2-1997 (mg/L)	Resultado 3-1997 (mg/L)	Resultado 5-1997 (mg/L)	Resultado 7-1997 (mg/L)	Resultado 9-1997 (mg/L)	Resultado 11-1997 (mg/L)	Resultado 2-1998 (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
Benceno	N.D.	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.5
Eter bis (2-Cloro etílico)	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.05
Clorobenceno	N.D.	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	100.0
Cloroformo	N.D.	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	6.0
Cloruro de metileno	N.D.	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	8.6
Cloruro de vinilo	N.D.	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	0.2
1,2-Diclorobenceno	N.D.	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	4.3
1,4-Diclorobenceno	N.D.	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	7.5
1,2-Dicloroetano	N.D.	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.5
1,1-Dicloroetileno	N.D.	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15	0.7
Disulfuro de carbono	N.D.	< 0.13	< 0.13	< 0.13	< 0.13	< 0.13	< 0.13	< 0.13	< 0.13	14.4
Fenol	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	14.4
Hexaclorobenceno	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.13
Hexaclorobutadieno	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.5
Isobutanol	N.D.	< 4.50	< 4.50	< 4.50	< 4.50	< 4.50	< 4.50	< 4.50	< 4.50	36.0
Etil metil cetona	N.D.	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	200.0
Piridina	N.D.	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	5.0
1,1,2,2-Tetracloroetano	N.D.	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	1.3
1,1,1,2-Tetracloroetano	N.D.	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	10.0
Tetracloruro de carbono	N.D.	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.5
Tetracloroetileno	N.D.	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.7
Tolueno	N.D.	< 0.08	< 0.08	0.14	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	14.4
1,1,1-Tricloroetano	N.D.	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	30.0
1,1,2-Tricloroetano	N.D.	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	1.2
Tricloroetileno	N.D.	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.5

N.D.= No detectado.

4.1.1.5 Inflamabilidad

Los resultados de inflamabilidad en general indican que no se aplica esta prueba debido al origen y naturaleza de la muestra. Sólo un resultado indica que el lodo no contiene alcohol y que el punto de inflamación es mayor a 60°C. Cuadro 4-7.

Cuadro 4-7. Resultados de inflamabilidad del lodo de la planta Dulces Nombres.

Fecha	RESULTADOS		
	Contenido de alcohol (% volumen)	Punto de inflamación (°C)	Capacidad para provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25°C y a 1.03 kg/cm ²)
9-1996	NCA	> 60	*
11-1996	NA	NA	NA
2-1997	NA	NA	NA
3-1997	NA	NA	NA
5-1997	NA	NA	NA
7-1997	NA	NA	NA
9-1997	NA	NA	NA
11-1997	NA	NA	NA
2-1998	*	*	*
Límite	24	<60	

NA: no aplicable por el origen y naturaleza de la muestra.

NCA: no contiene alcohol.

* Parámetro no analizado.

4.1.1.6 Biológico infeccioso

No se reportan resultados para el biológico infeccioso, ya que en los resultados del CRETIB se indica que no existe metodología oficial al respecto.

4.1.2 Planta Norte

4.1.2.1 Corrosividad

En el Cuadro 4-8 se presentan los resultados de corrosividad del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993. Para el caso en donde el pH determina si el lodo es corrosivo, los valores reportados indican que ninguno rebasa el límite superior de 12.5 y tampoco ninguno se encuentra por debajo del límite inferior de 2,

el resultado de mayor valor es de 8.83 y el de menor valor es de 6.61. Además se presentan cuatro resultados que indican la corrosión al acero, los cuales no rebasan el límite que establece la norma.

4.1.2.2 Reactividad

En general, los análisis realizados para la reactividad, están enfocados al contenido de cianuros, sulfuros y a la reactividad que tiene el lodo con las soluciones ácidas/básicas. Los resultados indican que el contenido de sulfuros y cianuros son menores a los límites permisibles. Además indican que no reacciona con soluciones ácidas o básicas en condiciones normales (25°C y 1 atmósfera). También hay tres resultados indicando que el lodo no reacciona en condiciones normales ni con el agua. No se analizó si el lodo produce radicales libres. Cuadro 4-9.

4.1.2.3 Explosividad

De los ocho resultados reportados para la prueba de explosividad, cuatro indican que no presenta características de un residuo explosivo por tener una constante de explosividad menor al dinitrobenceno y no ocasionar reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm² de presión. Los demás resultados mencionan que no existe metodología oficial al respecto, por lo que no fueron analizados. Cuadro 4-10.

4.1.2.4 Toxicidad

Los resultados de toxicidad obtenidos mediante la prueba de extracción para toxicidad, para los principales compuestos inorgánicos, orgánicos no volátiles y orgánicos volátiles de mayor preocupación y listados en la NOM-052-ECOL-1993 se presentan en los Cuadros 4-11, 4-12 y 4-13. Los valores de toxicidad para los compuestos inorgánicos, orgánicos no volátiles y orgánicos volátiles son menores a los límites que establece la NOM-052-ECOL-1993.

Cuadro 4-8. Resultados de corrosividad del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Parámetro	Resultado 2-1996	Resultado 9-1996	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 9-1997	Resultado 2-1998	Límite máximo
pH	6.61	7.09	7.43	8.83	8.13	8.33	8.47	8.44	2<pH<12.5
Corrosión del acero al carbón (SAE 1020) mm/año	*	*	*	*	0.191	0.265	0.0878	0.027	6.35 mm/año

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-9. Resultados de reactividad del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Parámetro	Resultado 2-1996	Resultado 9-1996	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 9-1997	Resultado 2-1998	Límite máximo
Reactividad en condiciones normales (25°C y 1 atmósfera)	Negativo	Negativo	Negativo	*	*	*	*	*	
Reacción en agua (25°C y 1 atmósfera)	Negativo	Negativo	Negativo	*		*	*	*	
Sulfuros (H ₂ S) (mg/kg)	< 10.00	< 10.00	< 10.00	< 50.00	< 5	< 5	< 5	< 5	500.00
Cianuros (HCN) (mg/kg)	< 10.00	< 10.00	< 10.00	< 0.50	< 0.03	0.0995	< 0.03	< 0.03	250.00
Reacción con soluciones ácidas/ básicas (25°C y 1 atmósfera)	Negativo	Negativo	Negativo	*	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	
Producción de radicales libres	*	*	*	*	*	*	*	*	

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-10. Resultados de explosividad del lodo de la planta Dulces Nombres.

Parámetro	Resultado 2-1996	Resultado 9-1996	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 9-1997	Resultado 2-1998
Constante de explosividad ≥ dinitrobenzeno	*	*	*	*	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm ² de presión	*	*	*	*	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-11. Resultados de toxicidad para compuestos inorgánicos del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Compuesto	Resultado 2-1996 (mg/L)	Resultado 9-1996 (mg/L)	Resultado 11-1996 (mg/L)	Resultado 2-1997 (mg/L)	Resultado 3-1997 (mg/L)	Resultado 5-1997 (mg/L)	Resultado 9-1997 (mg/L)	Resultado 2-1998 (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
Arsénico	< 0.005	< 0.005	< 0.010	< 0.05	< 0.05	< 0.014	< 0.014	< 0.015	5.0
Bario	< 0.150	< 0.150	< 0.150	< 1.00	0.241	0.1	0.168	0.057	100.0
Cadmio	< 0.020	< 0.020	< 0.040	< 0.05	0.006	< 0.002	0.015	< 0.002	1.0
Cromo Hexavalente	< 0.010	< 0.010	< 0.10	< 0.15	< 0.064	< 0.5	< 0.023	< 0.05	5.0
Níquel	< 0.10	< 0.10	1.0	1.62	1.79	0.603	0.428	0.948	5.0
Mercurio	< 0.005	< 0.005	< 0.010	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.20
Plata	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.10	< 0.05	< 0.006	< 0.054	< 0.025	5.0
Plomo	< 0.100	< 0.100	< 0.200	< 0.15	0.033	0.034	< 0.026	0.039	5.0
Selenio	< 0.002	< 0.005	< 0.010	< 0.05	< 0.05	< 0.053	< 0.053	< 0.041	1.0

Cuadro 4-12. Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos no volátiles del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Compuesto	Resultado 2-1996 (mg/L)	Resultado 9-1996 (mg/L)	Resultado 11-1996 (mg/L)	Resultado 2-1997 (mg/L)	Resultado 3-1997 (mg/L)	Resultado 5-1997 (mg/L)	Resultado 9-1997 (mg/L)	Resultado 2-1998 (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
Acrilonitrilo	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.50	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	5.0
Clordano	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.001	0.03
o-Cresol	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	200.0
m-Cresol	N.D.	N.D.	N.D.	0.15	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	200.0
p-Cresol	N.D.	N.D.	N.D.	0.15	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	200.0
Acido 2,4-diclorofenoxiacético	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	10.0
2,4-Dinitrotolueno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.13
Endrin	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0004	< 0.002	0.02
Heptacloro (y su epóxido)	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.00001	< 0.00001	< 0.00024	< 0.0001	0.008
Hexacloroetano	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.16	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	3.0
Lindano	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.00001	0.00048	< 0.00001	< 0.0001	0.4
Metoxicloro	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.00001	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0005	10.0
Nitrobeneno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	2.0
Pentaclorofenol	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	100.0
2,3,4,6-Tetraclorofenol	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.020	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	1.5
Toxafeno	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.001	0.5
2,4,5-Triclorofenol	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.004	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	400.0
2,4,6-Triclorofenol	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.004	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	2.0
Acido 2,4,5-triclorofenoxiacético (silvex)	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1.0

N.D.= No detectado; * Parámetro no analizado.

Cuadro 4-13. Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos volátiles del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Compuesto	Resultado 2-1996 (mg/L)	Resultado 9-1996 (mg/L)	Resultado 11-1996 (mg/L)	Resultado 2-1997 (mg/L)	Resultado 3-1997 (mg/L)	Resultado 5-1997 (mg/L)	Resultado 9-1997 (mg/L)	Resultado 2-1998 (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
Benceno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.05	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.5
Eter bis (2-cloro etílico)	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.05
Clorobenceno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.10	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	100.0
Cloroformo	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.10	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.04	6.0
Cloruro de metileno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.06	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	8.6
Cloruro de vinilo	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.03	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.2
1,2-Diclorobenceno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.20	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	4.3
1,4-Diclorobenceno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.20	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	7.5
1,2-Dicloroetano	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.10	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.5
1,1-Dicloroetileno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.15	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.7
Disulfuro de carbono	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.13	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	14.4
Fenol	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	14.4
Hexaclorobenceno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.13
Hexaclorobutadieno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.5
Isobutanol	N.D.	N.D.	N.D.	< 4.50	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	36.0
Etil metil cetona	N.D.	N.D.	N.D.	< 1.0	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	200.0
Piridina	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.020	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	5.0
1,1,2,2-Tetracloroetano	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.20	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	1.3
1,1,1,2-Tetracloroetano	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.10	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	10.0
Tetracloruro de carbono	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.10	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.5
Tetracloroetileno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.10	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.7
Tolueno	N.D.	N.D.	N.D.	0.38	< 0.02	< 0.02	0.06	< 0.02	14.4
1,1,1-Tricloroetano	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.10	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	30.0
1,1,2-Tricloroetano	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.10	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	1.2
Tricloroetileno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.10	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.5

N.D.= No detectado

4.1.2.5 Inflamabilidad

La prueba de inflamabilidad se enfocó principalmente al punto de inflamación en la cual cuatro resultados indican que no se aplica la prueba debido al origen y naturaleza de la muestra y los demás indican que el punto de inflamación es mayor de 60°C. En cuanto al contenido de alcohol sólo hay tres resultados que indican que el lodo no contiene alcohol. La capacidad para provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25°C y a 1.03 kg/cm²) no fueron determinados. Cuadro 4-14.

4.1.2.6 Biológico infeccioso

Cuatro resultados del biológico infeccioso indican que el lodo de esta planta si contiene microorganismos con capacidad de infección, tales como las bacterias Salmonella y Shigella, además de contener coliformes fecales. Cuadro 4-15.

4.1.3 Planta Noreste

4.1.3.1 Corrosividad

La prueba de corrosividad se enfocó principalmente a la determinación del pH del lodo, los valores reportados muestran que ninguno rebasa el límite superior de 12.5 y tampoco ninguno se encuentra por debajo del límite inferior de 2, el resultado de mayor valor es de 8.39 y el de menor valor es de 6.28. Sólo se reportan dos resultados que indican la corrosión al acero, los cuales no rebasan el límite que establece la norma (Cuadro 4-16).

4.1.3.2 Reactividad

De acuerdo a los resultados de la prueba de reactividad para el lodo de la planta Noreste se tiene que: el lodo no reacciona en condiciones normales (25°C y 1 atmósfera); no reacciona con el agua en condiciones normales y no reacciona con soluciones ácidas/básicas en condiciones normales. El contenido de sulfuros y cianuros en el lodo son

menores a los límites permisibles. Además hay cuatro resultados que indican que no produce radicales libres. Cuadro 4-17.

4.1.3.3 Explosividad

Para esta prueba sólo hay cuatro resultados que indican que el lodo no presenta características de un residuo explosivo por tener una constante de explosividad menor al dinitrobenzeno y no ocasionar reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm² de presión. Los demás resultados mencionan que no existe metodología oficial al respecto, por lo que no fueron analizados. Cuadro 4-18.

4.1.3.4 Toxicidad

Los resultados de toxicidad obtenidos mediante la prueba de extracción para toxicidad para los compuestos inorgánicos, orgánicos no volátiles y orgánicos volátiles de mayor preocupación son menores a los límites de la NOM-052-ECOL-1993. Cuadros 4-19, 4-20 y 4-21.

4.1.3.5 Inflamabilidad

En general en la prueba de inflamabilidad se indica que el lodo no contiene alcohol; también se tiene que el punto de inflamación es mayor a los 60°C, aunque también se menciona que no se aplica la prueba debido al origen y naturaleza de la muestra. Sólo se tienen dos resultados que indican que el lodo no tiene capacidad para provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25° y a 1.03 kg/cm²). Cuadro 4-22.

4.1.3.6 Biológico infeccioso

En general los resultados de la prueba del biológico infeccioso indican que el lodo de esta planta si contiene microorganismos con capacidad de infección, tales como Salmonella, Shigella, E. coli, Staphylococcus, Huevos de helminto y además contiene coliformes fecales. Cuadro 4-23.

Cuadro 4-14. Resultados de inflamabilidad del lodo de la planta Norte contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Parámetro	Resultado 2-1996	Resultado 9-1996	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 9-1997	Resultado 2-1998	Límite
Contenido de alcohol (% volumen)	NCA	NCA	NCA	*	*	*	*	*	24
Punto de inflamación (°C)	> 60	> 60	> 60	NA	> 70	NA	NA	NA	<60
Capacidad de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25° y a 1.03 kg/cm ²)	*	*	*	*	*	*	*	*	

NCA: no contiene alcohol; * Parámetro no analizado; NA: no aplicable por el origen y naturaleza de la muestra.

Cuadro 4-15. Resultados de la prueba del biológico infeccioso del lodo de la planta Norte.

Parámetro	Resultado 2-1996	Resultado 11-1996	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 9-1997	Resultado 2-1998
Coliformes totales	*	*	4600 NMP/100 ml	*	> 1 600 000 NMP/100 ml	13.6*10 ⁸ UFC/gr	4.86*10 ⁸ UFC/gr	*
Coliformes fecales	*	*	4600 NMP/100 ml	*	> 1 600 000 NMP/100 ml	12*10 ⁸ UFC/gr	1.0*10 ⁷ UFC/gr	*
Enterobacter	*	*	Negativo	*				*
Salmonella	*	*	Positivo	*	Positivo	Positivo	Positivo	*
Shigella	*	*	Negativo	*	Positivo en 10 g	Negativo	Negativo	*

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-16. Resultados de corrosividad del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Parámetro	Resultado 7-1995	Resultado 9-1995	Resultado 11-1995	Resultado 2-1996	Resultado 3-1996	Resultado 5-1996	Resultado 7-1996	Resultado 9-1996	Límite máximo
pH	7.34	6.28	7.53	7.77	7.54	7.72	7.21	7.14	2<pH<12.5
Corrosión del acero al carbón (SAE 1020)	*	0.420	0.321	*	*	*	*	*	6.35 mm/año

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-16. Resultados de corrosividad del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993 (continuación).

Parámetro	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 7-1997	Resultado 9-1997	Resultado 11-1997	Resultado 2-1998	Límite máximo
pH	7.05	8.39	7.20	*	7.75	7.14	7.37	7.24	2<pH<12.5
Corrosión del acero al carbón (SAE 1020)	*	*	*	*	*	*	*	*	6.35 mm/año

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-17. Resultados de reactividad del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Parámetro	Resultado 7-1995	Resultado 9-1995	Resultado 11-1995	Resultado 2-1996	Resultado 3-1996	Resultado 5-1996	Resultado 7-1996	Resultado 9-1996	Límite máximo
Reactividad en condiciones normales (25°C y 1 atmósfera)	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	
Reacción en agua (25°C y 1 atmósfera)	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	
Sulfuros (H ₂ S) (mg/kg)	< 0.1	< 15	< 15	70.1	< 10.0	50.0	89.0	< 10.0	500.00
Cianuros (HCN) (mg/kg)	< 0.1	< 0.01	< 0.03	< 10.0	< 10.0	< 10.0	< 10.0	< 10.0	250.00
Reacción con soluciones ácidas/ básicas (25°C y 1 atmósfera)	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	
Producción de radicales libres	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	*	*	*	*	

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-17. Resultados de reactividad del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993 (continuación).

Parámetro	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 7-1997	Resultado 9-1997	Resultado 11-1997	Resultado 2-1998	Límite máximo
Reactividad en condiciones normales (25°C y 1 atmósfera)	Negativo	Negativo	Negativo	*	*	*	*	*	
Reacción en agua (25°C y 1 atmósfera)	Negativo	Negativo	Negativo	*	*	*	*	*	
Sulfuros (H ₂ S) (mg/kg)	< 10.0	< 10.0	< 10.0		< 50.0	< 50.0	< 50.0	< 50.0	500.00
Cianuros (HCN) (mg/kg)	< 10.0	< 10.0	< 10.0	*	< 20.0	< 20.0	< 20.0	< 20.0	250.00
Reacción con soluciones ácidas/ básicas (25°C y 1 atmósfera)	Negativo	Negativo	Negativo	*	*	*	*	*	
Producción de radicales libres	*	*	*	*	*	*	*	*	

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-18. Resultados de explosividad del lodo de la planta Noreste.

Parámetro	Resultado 7-1995	Resultado 9-1995	Resultado 11-1995	Resultado 2-1996	Resultado 3-1996	Resultado 5-1996	Resultado 7-1996	Resultado 9-1996
Constante de explosividad ≥ dinitrobenzeno	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	*	*	*	*
Reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm ² de presión	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	*	*	*	*

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-18. Resultados de explosividad del lodo de la planta Noreste (continuación).

Parámetro	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 7-1997	Resultado 9-1997	Resultado 11-1997	Resultado 2-1998
Constante de explosividad \geq dinitrobenzeno	*	*	*	*	*	*	*	*
Reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm ² de presión	*	*	*	*	*	*	*	*

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-19. Resultados de toxicidad para compuestos inorgánicos del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Compuesto	Resultado 7-1995 (mg/L)	Resultado 9-1995 (mg/L)	Resultado 11-1995 (mg/L)	Resultado 2-1996 (mg/L)	Resultado 3-1996 (mg/L)	Resultado 5-1996 (mg/L)	Resultado 7-1996 (mg/L)	Resultado 9-1996 (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
Arsénico	0.008	< 0.05	< 0.05	< 0.001	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	5.0
Bario	0.260	0.411	1.050	0.260	< 0.120	< 0.150	< 0.150	< 0.150	100.0
Cadmio	0.002	< 0.002	0.019	0.003	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	1.0
Cromo Hexavalente	0.048	< 0.005	< 0.01	0.061	< 0.005	< 0.010	< 0.010	< 0.010	5.0
Níquel	0.031	0.033	0.055	0.039	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	5.0
Mercurio	< 0.001	< 0.01	< 0.01	< 0.001	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.20
Plata	0.001	< 0.05	< 0.05	0.008	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	5.0
Plomo	< 0.001	< 0.025	< 0.025	0.011	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	5.0
Selenio	0.010	< 0.05	< 0.05	< 0.003	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	1.0

Cuadro 4-19. Resultados de toxicidad para compuestos inorgánicos del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993 (continuación).

Compuesto	Resultado 11-1996 (mg/L)	Resultado 2-1997 (mg/L)	Resultado 3-1997 (mg/L)	Resultado 5-1997 (mg/L)	Resultado 7-1997 (mg/L)	Resultado 9-1997 (mg/L)	Resultado 11-1997 (mg/L)	Resultado 2-1998 (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
Arsénico	< 0.010	< 0.010	< 0.010	*	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010	5.0
Bario	< 0.150	< 1.000	< 1.000	*	< 1.000	< 1.000	< 1.000	< 1.000	100.0
Cadmio	< 0.040	< 0.040	< 0.040	*	< 0.040	< 0.040	< 0.040	< 0.040	1.0
Cromo Hexavalente	< 0.100	< 0.100	< 0.100	*	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	5.0
Níquel	< 0.200	< 0.200	< 0.200	*	< 0.200	< 0.200	< 0.200	< 0.200	5.0
Mercurio	< 0.010	< 0.010	< 0.010	*	< 0.005	< 0.005	< 0.01	< 0.01	0.20
Plata	< 0.100	< 0.100	< 0.100	*	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	5.0
Plomo	< 0.200	< 0.200	< 0.200	*	< 0.200	< 0.200	< 0.200	< 0.200	5.0
Selenio	< 0.010	< 0.010	< 0.010	*	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010	1.0

* Parámetro no analizado.

Cuadro 4-20. Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos no volátiles del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Compuesto	Resultado 7-1995 (mg/L)	Resultado 9-1995 (mg/L)	Resultado 11-1995 (mg/L)	Resultado 2-1996 (mg/L)	Resultado 3-1996 (mg/L)	Resultado 5-1996 (mg/L)	Resultado 7-1996 (mg/L)	Resultado 9-1996 (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
Acrilonitrilo	< 0.01	< 0.01	< 0.02	< 0.01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5.0
Clordano	< 0.002	< 0.0002	< 0.00002	< 0.002	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.03
o-Cresol	< 0.001	< 0.005	< 0.005	< 0.001	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	200.0
m-Cresol	< 0.001	< 0.005	< 0.005	< 0.001	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	200.0
p-Cresol	< 0.001	< 0.005	< 0.005	< 0.001	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	200.0
Acido 2,4-diclorofenoxiacético	< 0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.05	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	10.0
2,4-Dinitrotolueno	< 0.03	< 0.005	< 0.005	< 0.03	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.13
Endrin	< 0.006	< 0.00001	< 0.00001	< 0.006	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.02
Heptacloro (y su epoxido)	< 0.003	< 0.00001	< 0.00001	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.008
Hexacloroetano	< 0.003	< 0.005	< 0.005	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3.0
Lindano	< 0.003	0.00031	< 0.00001	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.4
Metoxicloro	< 0.003	< 0.00001	0.00007	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	10.0
Nitrobeneno	< 0.05	< 0.005	< 0.005	< 0.05	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.0
Pentaclorofenol	< 0.01	< 0.005	< 0.005	< 0.01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	100.0
2,3,4,6-Tetraclorofenol	< 0.01	< 0.005	< 0.005	< 0.01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.5
Toxafeno	< 0.001	0.00080	< 0.00005	< 0.001	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5
2,4,5-Triclorofenol	< 0.01	< 0.005	< 0.005	< 0.01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	400.0
2,4,6-Triclorofenol	< 0.01	< 0.005	< 0.005	< 0.01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.0
Acido 2,4,5-triclorofenoxiacético (silvex)	< 0.05	*	< 0.1	< 0.05	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.0

N.D.= No detectado.

* Parámetro no analizado.

Cuadro 4-20. Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos no volátiles del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993. (continuación).

Compuesto	Resultado 11-1996 (mg/L)	Resultado 2-1997 (mg/L)	Resultado 3-1997 (mg/L)	Resultado 5-1997 (mg/L)	Resultado 7-1997 (mg/L)	Resultado 9-1997 (mg/L)	Resultado 11-1997 (mg/L)	Resultado 2-1998 (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
Acilonitrilo	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.50	< 0.50	< 0.50	< 0.50	5.0
Clordano	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03
o-Cresol	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	200.0
m-Cresol	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	200.0
p-Cresol	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	200.0
Acido 2,4-diclorofenoxiacético	N.D.	N.D.	N.D.	*	*	*	*	< 0.5	10.0
2,4-Dinitrotolueno	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.13
Endrin	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.0016	< 0.0016	< 0.0016	< 0.0016	0.02
Heptacloro (y su epoxido)	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.0016	< 0.0016	< 0.0016	< 0.0016	0.008
Hexacloroetano	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	3.0
Lindano	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.0016	< 0.0016	< 0.0016	< 0.0016	0.4
Metoxicloro	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.0016	< 0.0016	< 0.0016	< 0.0016	10.0
Nitrobeneno	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	2.0
Pentaclorofenol	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	100.0
2,3,4,6-Tetraclorofenol	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	1.5
Toxafeno	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.5
2,4,5-Triclorofenol	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	400.0
2,4,6-Triclorofenol	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	2.0
Acido 2,4,5-triclorofenoxiacético (silvex)	N.D.	N.D.	N.D.	*	*	*	*	< 0.5	1.0

N.D.= No detectado.

* Parámetro no analizado.

Cuadro 4-21. Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos volátiles del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Compuesto	Resultado 7-1995 (mg/L)	Resultado 9-1995 (mg/L)	Resultado 11-1995 (mg/L)	Resultado 2-1996 (mg/L)	Resultado 3-1996 (mg/L)	Resultado 5-1996 (mg/L)	Resultado 7-1996 (mg/L)	Resultado 9-1996 (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
Benceno	*	< 0.02	< 0.02	< 0.002	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5
Eter bis (2-cloro etílico)	*	< 0.005	< 0.005	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.05
Clorobenceno	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	100.0
Cloroformo	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	6.0
Cloruro de metileno	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	8.6
Cloruro de vinilo	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.2
1,2-Diclorobenceno	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4.3
1,4-Diclorobenceno	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	7.5
1,2-Dicloroetano	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5
1,1-Dicloroetileno	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.7
Disulfuro de carbono	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	14.4
Fenol	*	< 0.005	< 0.005	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	14.4
Hexaclorobenceno	*	< 0.005	< 0.005	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.13
Hexaclorobutadieno	*	< 0.005	< 0.005	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5
Isobutanol	*	< 0.02	0.048	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	36.0
Etil metil cetona	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	200.0
Piridina	*	< 0.005	< 0.005	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5.0
1,1,2,2-Tetracloroetano	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.3
1,1,1,2-Tetracloroetano	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	10.0
Tetracloruro de carbono	*	< 0.02	0.032	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5
Tetracloroetileno	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.7
Tolueno	*	0.004	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	14.4
1,1,1-Tricloroetano	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	30.0
1,1,2-Tricloroetano	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.2
Tricloroetileno	*	< 0.02	< 0.02	< 0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5

* Parámetro no analizado.

N.D.= No detectado.

Cuadro 4-21. Resultados de toxicidad para compuestos orgánicos volátiles del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993 (continuación).

Compuesto	Resultado 11-1996 (mg/L)	Resultado 2-1997 (mg/L)	Resultado 3-1997 (mg/L)	Resultado 5-1997 (mg/L)	Resultado 7-1997 (mg/L)	Resultado 9-1997 (mg/L)	Resultado 11-1997 (mg/L)	Resultado 2-1998 (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
Benceno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	0.5
Eter bis (2-cloro etílico)	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.115	< 0.115	< 0.115	< 0.115	0.05
Clorobenceno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.115	< 0.115	< 0.115	< 0.115	100.0
Cloroformo	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	0.030	< 0.042	< 0.042	< 0.042	6.0
Cloruro de metileno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	0.050	< 0.022	< 0.022	< 0.022	8.6
Cloruro de vinilo	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	0.2
1,2-Diclorobenceno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	4.3
1,4-Diclorobenceno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.205	< 0.205	< 0.205	< 0.205	7.5
1,2-Dicloroetano	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.5
1,1-Dicloroetileno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	0.7
Disulfuro de carbono	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.119	< 0.119	< 0.119	< 0.119	14.4
Fenol	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	14.4
Hexaclorobenceno	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.13
Hexaclorobutadieno	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.5
Isobutanol	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	36.0
Etil metil cetona	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	0.185	< 0.850	< 0.850	< 0.850	200.0
Piridina	N.D.	N.D.	N.D.	*	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	5.0
1,1,2,2-Tetracloroetano	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	1.3
1,1,1,2-Tetracloroetano	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	10.0
Tetracloruro de carbono	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.110	< 0.110	< 0.110	< 0.110	0.5
Tetracloroetileno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	0.7
Tolueno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	14.4
1,1,1-Tricloroetano	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	30.0
1,1,2-Tricloroetano	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	1.2
Tricloroetileno	N.D.	N.D.	N.D.	< 0.02	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	0.5

N.D.= No detectado; * Parámetro no analizado.

Cuadro 4-22. Resultados de inflamabilidad del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993.

Parámetro	Resultado 7-1995	Resultado 9-1995	Resultado 11-1995	Resultado 2-1996	Resultado 3-1996	Resultado 5-1996	Resultado 7-1996	Resultado 9-1996	Límite máximo
Contenido de alcohol (% volumen)	*	*	*	*	NCA	NCA	NCA	NCA	24
Punto de inflamación	> 60	> 60	> 80	*	> 60	> 60	> 60	> 60	60
Capacidad de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25° y a 1.03 kg/cm ²)	Negativo	*	*	Negativo	*	*	*	*	

* Parámetro no analizado; NCA: no contiene alcohol.

Cuadro 4-22. Resultados de inflamabilidad del lodo de la planta Noreste contra los límites de la NOM-052-ECOL-1993 (continuación).

Parámetro	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 7-1997	Resultado 9-1997	Resultado 11-1997	Resultado 2-1998	Límite máximo
Contenido de alcohol (% volumen)	NCA	NCA	NCA	*	*	*	*	*	24
Punto de inflamación	> 60	> 60	> 60	*	NA	NA	NA	NA	60
Capacidad de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25° y a 1.03 kg/cm ²)	*	*	*	*	*	*	*	*	

NCA: no contiene alcohol; * Parámetro no analizado; NA: no aplicable por el origen y naturaleza de la muestra.

Cuadro 4-23. Resultados de la prueba del biológico infeccioso del lodo de la planta Noreste.

Parámetro	Resultado 7-1995	Resultado 9-1995	Resultado 11-1995	Resultado 2-1996	Resultado 3-1996	Resultado 5-1996	Resultado 7-1996	Resultado 9-1996
Coliformes totales	*	910, 000 UFC/g	890, 000 UFC	*	*	*	*	*
Coliformes fecales	*	255, 000 UFC/g	71 UFC	*	*	*	*	*
Salmonella	Negativo/20g	Negativo	Negativo	Negativo/20g	*	*	*	*
Shigella	*	*	Negativo		*	*	*	*
E. coli	840 UFC/g	*	*	300, 000 UFC/g	*	*	*	*
Staphylococcus	<100 UFC/g			<100 UFC/g				

* Parámetro no analizado

Cuadro 4-23. Resultados de la prueba del biológico infeccioso del lodo de la planta Noreste (continuación).

Parámetro	Resultado 11-1996	Resultado 2-1997	Resultado 3-1997	Resultado 5-1997	Resultado 7-1997	Resultado 9-1997	Resultado 11-1997	Resultado 2-1998
Coliformes totales	*	210 NMP/g	*	22 x 10 ⁸ UFC/g	> 11, 000 NMP/g	> 110, 000 NMP/g	*	240 NMP/g
Coliformes fecales	*	36 NMP/g	*	15.4 x 10 ⁷ UFC/g	30 NMP/g	1,100 NMP/g	*	28 NMP/g
Enterobacter	*	Negativo	*		Negativo	Negativo	*	*
Salmonella	*	Negativo/25g	*	Positivo	Negativo/25g	Negativo/25g	*	Negativo
Shigella	*	Negativo	*	Negativo	Negativo (col/g)	Negativo/25g	*	Negativo
E. coli	*	*	*	Positivo	Positivo	Positivo	*	*
Huevos de helminto	*	*	*	100/g	*	*	*	*

* Parámetro no analizado

De acuerdo a los resultados de los parámetros que se analizaron para cada una de las pruebas del CRETIB, en los lodos de las tres plantas de tratamiento, se puede decir en general, que dichos lodos presentan las siguientes características:

- | | |
|-------------------------|---|
| 1) Corrosividad | No es corrosivo. |
| 2) Reactividad | No es reactivo. |
| 3) Explosividad | No es explosivo. |
| 4) Toxicidad | No es tóxico. |
| 5) Inflamabilidad | No es Inflamable. |
| 6) Biológico infeccioso | Si contiene microorganismos con capacidad de infección. |

Los lodos de las plantas de tratamiento pueden considerarse como no tóxicos, por no rebasar los límites que establece la NOM-052-1993. Aunque no se especifique claramente en la norma, un listado o un límite que regule tanto a los microorganismos de mayor preocupación así como la densidad de éstos, conforme a la norma dichos lodos pueden clasificarse como peligrosos, ya que contienen microorganismos con capacidad de infección.

El lodo residual no está incluido en una lista de residuos específicos denominados peligrosos por EPA, ni los datos disponibles sugieren que el lodo manifiesta características de un residuo peligroso, la cual incluye corrosividad, reactividad, explosividad y toxicidad. De cualquier modo, la naturaleza no peligrosa del lodo, no puede ser asumida (EPA, 1995). Aunque el lodo concebiblemente puede manifestar explosividad o reactividad, la mayoría de las preocupaciones acerca de los lodos residuales municipales están enfocadas en la toxicidad. De acuerdo a EPA (1995) el lodo puede que manifieste características de toxicidad, pero ésta sería en poca escala.

EPA regula el contenido de microorganismos en los lodos que se aplican a los suelos en la 40 CFR Parte 503 (Estándares para el uso y disposición de lodos residuales), que a diferencia de la NOM-052-1993, ésta sólo establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al medio ambiente.

4.2 Segunda etapa

Selección de los lodos que tienen aptitud para usarse como fertilizantes y/o mejorador de suelos según las normas de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) 40 CFR Parte 503 (Estándares para el uso y disposición de lodos residuales, que establecen los requerimientos para la aplicación al suelo de los lodos residuales) y considerando criterios de salinidad para las zonas áridas y semiáridas.

4.2.1 Metales pesados contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento contra los límites permisibles de EPA para la aplicación de lodo al suelo

De acuerdo a los resultados de los análisis de las muestras de lodo tomadas el 24 de marzo y el 16 de mayo de 1997, se tiene lo siguiente:

- a) Las concentraciones de metales pesados del lodo de la planta Noreste son menores a los límites máximos de concentración y a los límites de concentración (para lodos con bajo contenido de metales o clasificados como “lodos limpios” en cuanto a metales) de EPA. Cuadro 4-24. Por lo tanto, el lodo de esta planta cumple con los requerimientos de EPA para metales pesados, para la aplicación de lodo a los suelos.
- b) Los lodos residuales de la planta Dulces Nombres y Norte tienen concentraciones de metales pesados que rebasan los límites de concentración de EPA para lodos con bajo contenido de metales. Las concentraciones del Cr, Mo y Zn en el lodo de la Planta Dulces Nombres rebasan los límites de concentración para lodos con bajo contenido de metales. En la Planta Norte el Cd, Cr y Mo son los metales que tienen concentraciones que rebasan los límites de concentración para lodos con bajo contenido de metales. Cuadro 4-24.
- c) Las concentraciones reportadas para el Pb y el Zn de la planta Dulces Nombres y Norte rebasan los límites máximos de concentración de EPA para la aplicación al suelo de

lodos residuales. Cuadro 4-24. EPA exige que los límites máximos de concentración deben cumplirse como mínimo para permitirse la aplicación de lodo al suelo, si uno o más de los límites máximos para los diez metales regulados por EPA, son excedidos, no puede permitirse la aplicación del lodo a los suelos (EPA, 1995a).

Cuadro 4-24. Metales contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento de agua residual, y límites permisibles de EPA para la aplicación de lodo al suelo (mg de metal/kg de lodo seco)¹.

Metal	Dulces Nombres		Norte		Noreste		Límites permisibles	
	3/24/97	5/16/97	3/24/97	5/16/97	3/24/97	5/16/97	Límite Máximo de Concentración	Límite de Concentración (lodo limpio)
As	9.7	7.4	7.1	4.7	3.5	1.9	75	41
Cd	8.9	5.1	40*	46*	2.3	7.3	85	39
Cr	1,110	1,290*	1,780*	1,750*	168	139	3,000	1,200
Cu	808	689	1,170	1,100	165	166	4,300	1,500
Hg	9.5	6	4.7	5.7	5.1	0.7	57	17
Mo	20*	18*	20*	17	4.5	4.6	75	18
Ni	282	341	296	186	22	29	420	420
Pb	1,700**	2,360**	3,620**	3,540**	231	226	840	300
Se	3.3	1.9	5.1	1.2	5.2	5.9	100	36
Zn	9,250**	6,290*	10,700**	7,930**	1,960	1,990	7,500	2,800

¹ Resultados de muestras de lodo tomadas el 24 de marzo de 1997 y el 16 de mayo de 1997.

* Valores que rebasan los límites de concentración de metal para lodo limpio.

** Valores que rebasan los límites máximos de concentración para metales.

Estos límites fueron desarrollados para evitar aplicaciones al suelo de lodos con altas concentraciones de metales pesados, que al acumularse en cantidades excesivas pueden resultar dañinos para las plantas, animales, humanos y medio ambiente, sino se tiene un control adecuado.

Por lo anterior, el lodo de la planta Noreste es recomendable aplicarse a los suelos, ya sea como fuente de nutrientes o como mejorador de suelo siempre y cuando mantenga uniforme sus concentraciones de metales y no exceda los límites establecidos para metales pesados, además de cumplir con los requerimientos para químicos orgánicos y microorganismos patógenos. No debe permitirse la aplicación al suelo de los lodos de la planta Dulces Nombres y Norte, para evitar su contaminación que pueda resultar nocivo para plantas, animales, humanos y medio ambiente.

Un tratamiento de los lodos para eliminar metales puede elevar aun más los costos del tratamiento de éstos. Lodos con altas concentraciones de metales, son un problema que generalmente se tiene en las ciudades más industrializadas, como es el caso de Monterrey, N.L. Para disminuir el contenido de contaminantes en los lodos, lo más recomendado sería atacar el problema desde sus orígenes, exigiendo a la industria que mejore o limite las concentraciones de contaminantes incluyendo metales y químicos orgánicos en las aguas residuales que son descargados a los sistemas de drenaje municipal.

En E.U.A., la industria además de cumplir con los requerimientos de pretratamiento de las aguas residuales que son descargadas a los sistemas de drenaje, participan en forma voluntaria en programas diseñados para reducir o eliminar contaminación como un esfuerzo conjunto de la industria y el gobierno. Debido a esto, la calidad del lodo ha mejorado continuamente sobre los años, y muchos legisladores, investigadores y gerentes de las plantas de tratamiento creen que los requerimientos de pretratamiento y los programas de prevención de contaminación han sido factores importantes para lograr este mejoramiento. Por ejemplo, los niveles de cadmio, cromo y plomo han disminuido desde el decenio de 1970 significativamente, demostrado así, por datos de la EPA en 1982 en el Estudio Urbano Número 40 (U.S. EPA, 1982) y en 1990 por la NSSS (Shimp *et al.*, 1994).

4.2.2 Químicos orgánicos sintéticos contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento contra los límites permisibles de EPA.

Actualmente EPA (40 CFR Parte 503) no regula los químicos orgánicos en el lodo debido a que establece que los químicos orgánicos de preocupación potencial han sido prohibidos o restringidos para uso en los E.U.A. no son fabricados en los E.U.A.; están presentes en los lodos en niveles muy bajos y no representan amenaza significativa para la salud humana y el medio ambiente, basados en datos de la NSSS de la EPA en 1990 en la cual se derivó la regulación 40 CFR Parte 503; o debido a que el límite para un contaminante orgánico identificado en la evaluación de riesgos, no se espera que sea excedido en el lodo que es usado o confinado (U.S. EPA, 1992b).

Se compararon las concentraciones de químicos orgánicos sintéticos contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento contra los límites establecidos en la evaluación de riesgos realizado por EPA en la cual se sometieron a estudio 12 compuestos orgánicos.

De los compuestos orgánicos comparados, solamente la concentración de benzopireno en el lodo de la Planta Dulces Nombres excede el nivel máximo permisible de la EPA, para las demás plantas se reportan bajas concentraciones. Cuadro 4-25.

Cuadro 4-25. Químicos orgánicos sintéticos contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento contra los límites recomendados de la EPA (mg/kg ps)¹.

Compuesto	LPC	Dulces Nombres		Norte		Noreste		Límite EPA
		3/24/97	5/16/97	3/24/97	5/16/97	3/24/97	5/16/97	
Aldrin/ Dieldrin (total)	0.005	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.7
Benceno	0.006	0.074	0.118	0.145	0.350	0.031	ND	16,000
Benzopireno	0.4	32*	23*	0.1	ND	0.1	ND	15
Clordano	0.005	0.148	0.071	0.093	0.047	0.067	0.047	86
DDD/ DDE /DDT (total)	0.025	0.182	ND	0.048	ND	0.074	ND	120
Heptacoloro	0.005	ND	ND	ND	ND	ND	ND	7.4
Hexaclorobenceno	0.005	0.079	0.043	0.639	0.268	0.0055	0.037	29
Hexaclorobutadieno	0.8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	600
N-Nitrosodimetilamina	-	-	-	-	-	-	-	2.1
Pentaclorofenol	0.8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	30
PCB	0.5	1.6	3.0	1.5	1.5	1.9	4.2	4.6
Tricloroetileno	0.011	0.021	ND	0.045	0.030	0.015	ND	10,000

¹ Resultados de muestras de lodo tomadas el 24 de marzo de 1997 y el 16 de mayo de 1997.

LPC: límite práctico de cuantificación; ND: no detectado; - Parámetro no analizado.

* Valores que rebasan los límites permisibles de EPA.

Aunque el PCB (bifenilos policlorados) no rebasa el límite establecido en la evaluación de riesgos, su concentración en las tres plantas de tratamiento rebasa el promedio de PCB total contenido en lodos municipales de E.U.A., para lo cual Jacobs et al. (1987) y Mumma et al. (1988) reportan concentraciones totales de PCB menores de 0.5 mg/kg. La NSSS (National Sewage Sludge Survey) reafirma lo anterior (EPA, 1990); donde se obtuvo una concentración promedio de 0.2 mg/kg.

La NRC (National Research Council, 1996) recomendó a EPA no excluir de la 40 CFR Parte 503 a los químicos orgánicos, ya que éstos aún son encontrados en los lodos de las plantas de tratamiento de los E.U.A. Por lo tanto, si en un futuro el lodo fuera usado con

finés agrícolas, es indispensable monitorear las concentraciones del benzopireno, PCB y demás compuestos orgánicos tóxicos.

4.2.3 Microorganismos contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento contra los límites permisibles de EPA

En general, los microorganismos encontrados en los lodos de las plantas de tratamiento son: coliformes totales, coliformes fecales, *Salmonella*, *Shigella*, *Escherichia coli* y helmintos (*Ascaris* y *Toxocara*). Los lodos de las tres plantas de tratamiento rebasan los límites permisibles de coliformes fecales para lodos Clase A, dicha clase tiene un recuento de patógenos casi indetectable y generalmente no tienen ninguna restricción cuando estos se aplican a los suelos. Por lo tanto, este lodo pertenece a un lodo Clase B los cuales deben estar sometidos a ciertas restricciones cuando estos se aplican a los suelos, para proteger el medio ambiente y la salud pública. Cuadro 4-26.

La supervivencia de los organismos patógenos en suelos, aguas, vegetales o en el aire, puede variar desde días a semanas, meses o incluso años, dependiendo de la humedad, de la temperatura del medio y del tipo de organismo.

En cuanto a la supervivencia de *Salmonella* y *Shigella* en suelos y vegetales, se cree que es menor, o en todo caso igual, a la observada para coliformes (18-38 días). La *Escherichia coli*, sobrevive de 15-30 días en la superficie del suelo. Los huevos de *Ascaris* mueren rápidamente en suelos expuestos al sol, pero son extremadamente resistentes en los vegetales si tienen acceso a la humedad. En el suelo se ha comprobado una supervivencia hasta de 7 años, si se riega constantemente con aguas negras. Las densidades de huevos de helmintos en el lodo aplicado a la superficie de parcelas de pastos son reducidas en más del 90% en 3 o 4 meses; los huevos de helmintos sobreviven más tiempo si el lodo es labrado dentro del suelo (Jackubowski, 1988).

Por lo tanto, es recomendable usar el lodo Clase B sobre cultivos cuya parte comestible o de interés no toque la superficie del suelo. Tales cultivos pueden incluir al maíz, algodón, sorgo, trigo, cebada, avena, etc.

Cuadro 4-26. Microorganismos presentes en los lodos de las tres plantas de tratamiento contra los límites permisibles o aceptables de microorganismos de la EPA para la aplicación al suelo de lodos residuales de EPA¹.

Microorganismo	Dulces Nombres		Norte		Noreste		Límite EPA	
	3/24/97	5/16/97	3/24/97	5/16/97	3/24/97	5/16/97	Clase A	Clase B
Coliformes totales	223,918 NMP/g	220,543 NMP/g	147,222 NMP/g	248,633 NMP/g	1,313,432 NMP/g	>300,000 NMP/g	a	a
Colif. fecales	35,623 NMP/g	69,486 NMP/g	27,777 NMP/g	106,557 NMP/g	354,477 NMP/g	>300,000 NMP/g	< 1,000 NMP/gr de sólido total (peso seco)	2,000,000 NMP/gr de sólido total (peso seco)
Salmonella	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	< 3 NMP/4 gr de sólido total (peso seco)	a
Shigella	*	*	Presente	Ausente	*	Ausente	a	a
E. coli	*	*	*	*	*	Presente	a	a
P. Nemátodos	Ausentes	Ausente	Ausentes	Ascaris	Ausentes	Toxocara Ascaris	a	a
P. Céstodos	Presente	Presente	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes	a	a
Huevos de Helminto	*	*	*	*	*	100/g	a	a

¹ Resultados de muestras de lodo tomadas el 24 de marzo de 1997 y el 16 de mayo de 1997.

NMP/g: Número más probable/gramo de sólido total (peso seco)

* Parámetro no analizado

a Información no disponible.

4.2.4 Salinidad

En el Cuadro 4-27 se presentan los valores para conductividad eléctrica de los análisis realizados para el lodo de la planta Noreste en abril y mayo de 1997 (para la planta Dulces Nombres y Norte no se tienen resultados).

Comparando el lodo con los suelos clasificados como normales o ligeramente salinos se tiene que éste tienen una salinidad baja ya que presenta una salinidad de los suelos normales. Por lo tanto, el riesgo de que el lodo aumente la salinidad en el suelo será mínimo.

Es recomendable tomar en cuenta la salinidad del lodo, sobre todo en las regiones áridas o de poca precipitación, ya que ésta al encontrarse en grandes cantidades en los suelos puede impedir la germinación y el óptimo desarrollo de los cultivos, además puede causar la dispersión del suelo, reducir la velocidad de infiltración y aireación del suelo causando cambios en su estructura que hacen más difícil su labranza.

EPA (1995a) menciona que otros constituyentes del lodo, tales como el potasio y el sodio, están solubles en el agua y son descargados con las aguas residuales tratadas, y que los constituyentes solubles en el agua que permanecen en el lodo, se reducirán más sus concentraciones en el lodo, si el lodo es deshidratado (por centrifugadoras o prensas), mientras que el secado con calor o aire resultará en un incremento de los niveles debido a que esos constituyentes no son volátiles.

Cuadro 4-27. Salinidad del lodo de la planta Noreste comparado con un suelo normal y un suelo ligeramente salino.

PARAMETRO	LODO PLANTA NORESTE				SUELO NORMAL	SUELO LIGERAMENTE SALINO
	4-24-97	5-14-97	5-23-97	5-23-97		
C.E. mmhos/cm (en sup 1:5)	1.8	1.8	2.3	2.2	< 4	4-8

4.2.5 Clasificación de los lodos de las plantas de tratamiento de agua residual en base a los rangos establecidos para metales pesados por la EPA

En el Cuadro 4-28 se presenta la comparación de las concentraciones de metales pesados contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento versus los rangos de metales pesados contenidos en los lodos de varios tipos de agua reportados por la EPA.

Cuadro 4-28. Metales contenidos en los lodos de las plantas de tratamiento y en los lodos de varios tipos de agua residual reportados por la EPA (mg de metal/kg de lodo seco)¹.

Metal	Dulces Nombres	Norte	Noreste	Rangos de datos de la EPA	Doméstica	Doméstica e Industrial	Industrial
Ag	-	-	-	0 - 960	7 - 100	20 - 300	200 - 1,680
As	8.55	5.9	2.7	10 - 50	-	-	-
B	-	-	-	200 - 1,430	50 - 400	-	-
Ba	-	-	-	0 - 3,000	600 - 1,000	700 - 1,350	2,600 - 6,400
Be	-	-	-	-	<10 - <100	<10 - <100	<40 - <100
Cd	7	43	4.8	0 - 1,100	<10 - <400	90 - 240	40 - 200
Co	20.5	17.2	5.9	0 - 800	20 - <400	400 - 500	<40 - 500
Cr	1,200	1,765	153.5	22 - 30,000	50 - 200	260 - 2,650	1,240 - 2,700
Cu	748.5	1,135	165.5	45 - 16,030	95 - 700	960 - 2,300	1,640 - 4,700
Hg	7.75	5.2	2.9	0 - 89	1 - 11.2	2.6 - 5.0	0.6 - 3
Mn	-	-	-	100 - 8,800	100 - 300	500 - 6,100	640 - 6,100
Ni	311.5	241	25.5	0 - 2,800	110 - 400	0 - 900	440 - 2,800
Pb	2,030	3,580	228.5	80 - 26,000	<200 - <500	760 - 2,790	1,280 - 8,300
Sr	-	-	-	0 - 2,230	100 - 200	100 - 1,600	80 - 2,100
Se	2.6	3.15	5.55	10 - 180	-	-	-
V	-	-	-	0 - 2,100	<500 - 1,000	<200 - 500	1,000 - 2,000
Zn	7,770	9,315	1,975	51 - 28,360	1,000 - 1,800	800 - 4,600	3,200 - 14,000

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

Fuente: Adaptación de Burchard y a: Jack, 1981.

De acuerdo a la clasificación de los lodos residuales de la EPA, que se basa en las concentraciones de metales pesados, se tiene que:

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

- b) El lodo de la planta Norte, debido a su contenido de Cd, Pb y Zn, es característico de lodo de agua residual tipo industrial. Las concentraciones de Cr y Cu en el lodo de la planta Norte, se acercan más a la clasificación de lodo de agua tipo doméstico mezclado con industrial.
- c) Los lodos de la planta Noreste son característicos de lodos procedentes de agua residual tipo domestico mezclado con industrial debido a la concentración de Zn. Los demás metales pesados contenidos en los lodos de esta planta presentan concentraciones que se acercan más a la clasificación de lodos provenientes de agua tipo domestico.

4.2.6 Selección de los lodos para uso agrícola en base a las normas de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA)

En base a los estándares para el uso y disposición de lodos residuales de la EPA (40 CFR Parte 503) y de los resultados de los análisis de las muestras de lodo tomadas el 24 de marzo y el 16 de mayo de 1997, se tienen que:

El lodo de la planta Dulces Nombres no cumple con los estándares de EPA, ya que tiene altas concentraciones de Pb y el Zn los cuales rebasan los límites máximos de concentración permisibles para metales. Además el lodo de esta planta tiene concentraciones de benzopireno que rebasan los niveles recomendados para este compuesto para los lodos que son aplicados al suelo. Por lo tanto, el lodo de esta planta no puede aplicarse a los suelos.

Al igual que el lodo de la planta Dulces Nombres, el lodo de la planta Norte no cumple con los estándares de EPA, ya que tiene altas concentraciones de Pb y el Zn que rebasan los límites máximos de concentración permisibles para metales. Por lo que el lodo de esta planta tampoco es recomendable aplicarse a los suelos.

El lodo de la planta Noreste tiene buenas aptitudes para uso agrícola, ya que cumple con los límites máximos permisibles para metales y químicos orgánicos sintéticos. Además

el lodo de esta planta cumple con los límites que clasifican a los lodos como limpios o con bajas concentraciones de metales. En cuanto a patógenos el lodo de esta planta corresponde a un lodo Clase B, el cual puede aplicarse al suelo con algunas restricciones. La salinidad en este lodo es baja ya que tiene una conductividad eléctrica semejante a la de un suelo normal. Por lo tanto, el lodo más apto para uso agrícola como fertilizante o mejorador de suelo es el lodo de la planta Noreste.

4.3 Tercera etapa

Determinación de la factibilidad del uso de los lodos de acuerdo a: clima, topografía, geología, hidrología: subterránea y superficial, edafología, y patrones de cultivo de los municipios siguientes: Apodaca, General Zuazua, Marín y Pesquería, N.L.

4.3.1 Clima

Los tipos de clima que predominan en el área de estudio (Apodaca, General Zuazua, Marín y Pesquería) de acuerdo a la clasificación climática de Köppen modificada por García (1976) son: clima (A)Cx', el cual es un clima semicálido subhúmedo con lluvia escasa todo el año y el clima BS₁(h'), que es un clima semiseco muy cálido y cálido con lluvia escasa todo el año.

El clima (A)Cx', se presenta principalmente en los municipios de Pesquería, Marín y General Zuazua. El clima BS₁(h'), se presenta principalmente en los municipios de Apodaca y General Zuazua. Figura 4-1.

El clima semicálido subhúmedo con lluvia escasa todo el año [(A)Cx'], se caracteriza por tener un porcentaje de lluvia invernal mayor de 18, un índice de precipitación medio anual entre 500 y 800 mm y una temperatura media anual mayor de 22°C. En septiembre se registra la máxima precipitación mensual, con rangos de 110 a 150 mm, en los meses de febrero y marzo se presenta la mínima, que oscila entre 10 y 20 mm.

En el mes de julio y agosto se presentan las temperaturas medias mensuales más altas, que van de 28 a 30°C; en tanto que la menor se observa en enero y diciembre, con valores entre 13 y 15°C. Cuadro 4-29.

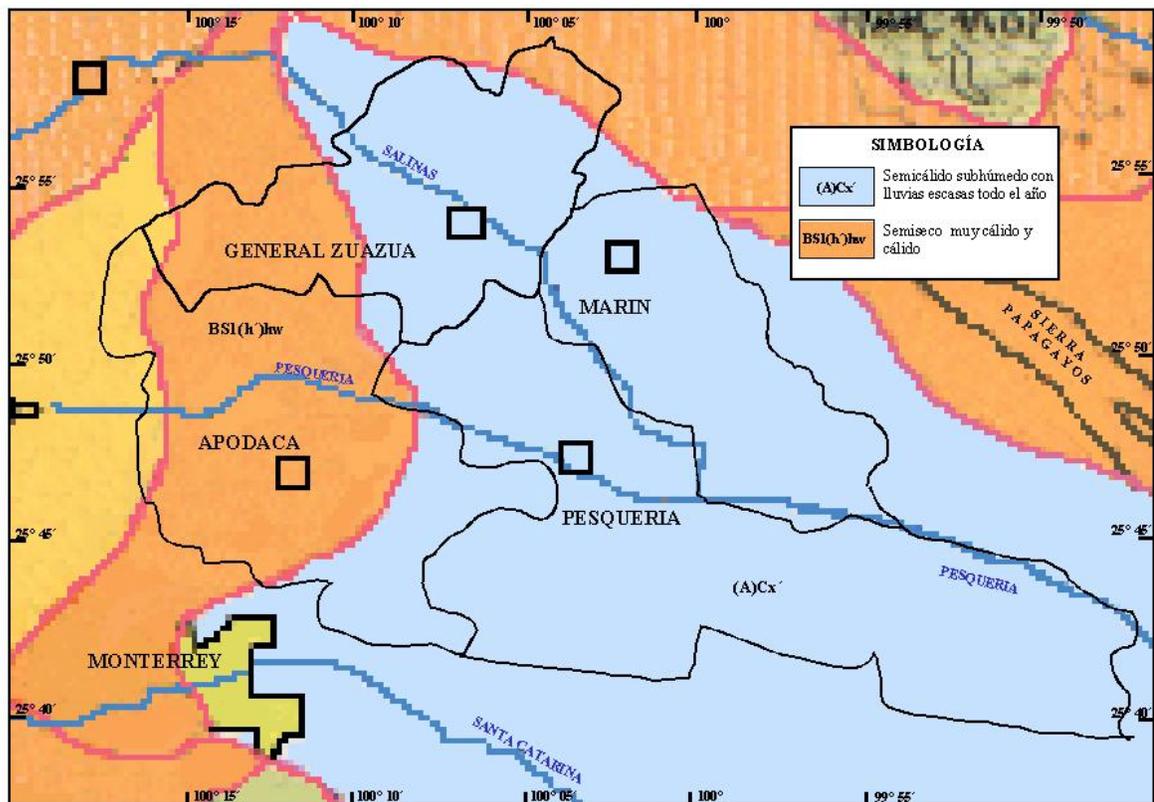


Figura 4-1. Tipos de clima que predominan en el área de estudio de acuerdo a la clasificación climática de Köppen modificada por García (1976).

El clima $BS_1(h')$ (semiseco muy cálido y cálido con lluvia escasa todo el año) se caracteriza por tener un porcentaje de lluvia invernal mayor de 18, su índice de lluvia media anual fluctúa entre 500 y 600 mm y el de la temperatura mayor de 21°C. En septiembre se registra la máxima precipitación mensual, con un rango que va de 110 a 130 mm, y en marzo se presenta la mínima que oscila entre 10 y 16 mm. En los meses de julio y agosto la temperatura media más alta varía entre 27 y 32°C; mientras que en enero se presentan las mínimas que fluctúan entre 13 y 14°C. Cuadro 4-29.

Los vientos dominantes en el municipio de Apodaca provienen del oeste y sureste. En invierno predominan los vientos del norte que se agudizan en enero y febrero. En

General Zuazua, la dirección de los vientos en general, es de sur a este en verano y de norte a este en invierno. Para el municipio de Marín los vientos predominantes son de norte a sur y para Pesquería la dirección de los vientos, en general, es de noreste a suroeste.

Cuadro 4-29. Temperatura y precipitación media mensual y anual de las estaciones del área de estudio.

Estación:	Apodaca		Marín		La Arena Pesquería		Sta. M. la Floreña Pesquería	
Mes	Temp. Media (°C)	Prec. Media (mm)	Temp. Media (°C)	Prec. Media (mm)	Temp. Media (°C)	Prec. Media (mm)	Temp. Media (°C)	Prec. Media (mm)
Enero	13.0	16.6	13.3	33.6	13.1	26.3	15.3	30.5
Febrero	14.6	20.4	15.5	15.2	15.9	17.3	17.0	13.8
Marzo	18.9	15.2	19.7	14.2	20.2	19.0	20.5	10.4
Abril	22.7	32.8	23.4	31.3	24.2	31.3	25.0	25.6
Mayo	25.1	58.2	26.1	62.5	27.2	66.3	26.8	39.8
Junio	26.8	70.4	27.8	62.6	29.2	78.7	27.9	82.4
Julio	27.2	50.6	28.1	43.1	29.9	63.5	29.5	34.4
Agosto	27.5	70.9	28.2	71.3	29.7	93.5	29.7	55.6
Septiembre	25.1	122.8	25.6	94.3	27.2	132.0	27.2	113.7
Octubre	21.0	52.2	22.3	37.3	23.6	58.3	23.7	64.1
Noviembre	17.2	19.2	17.5	15.7	18.2	21.4	19.2	12.7
Diciembre	14.0	22.6	14.2	30.3	14.9	19.4	15.5	23.5
Media Anual	21.1	552.0	21.8	511.6	22.8	621.9	23.1	506.5

En los climas cálidos y secos o con bajas precipitaciones anuales se tienen algunas ventajas comparado con los climas húmedos, ya que la aplicación de los lodos puede realizarse prácticamente todo el año, debido a que no se tienen problemas de inundamientos por las altas precipitaciones que se registran en los climas húmedos, además la posible lixiviación a las aguas subterráneas de alguno de los componentes del lodo de preocupación (metales, químicos orgánicos sintéticos y microorganismos) será menor en los climas secos que en los climas con altas precipitaciones. Otra ventaja que se tiene en los climas secos es que los requerimientos de almacenamiento del lodo son menores en los climas secos que en los climas con altas precipitaciones, debido a que en éstos últimos se tiene que esperar a los períodos o estaciones de baja precipitación o períodos secos que minimicen el potencial de inundamientos y escurrimientos superficiales, para poder aplicar los lodos.

Una de las desventajas que se tienen en los climas secos o con baja precipitación, es que hay posibilidad de un aumento de sales en los terrenos enmendados con lodo, debido a que la lixiviación de las sales es baja. La salinidad en los terrenos enmendados va a depender principalmente del grado de salinidad y del tipo de sal que se tenga en los lodos, del tipo de tratamiento del lodo, dosis de aplicación de los lodos y de los manejos que se le den a dichos suelos.

Por lo tanto en las áreas de poca precipitación e irrigadas, los constituyentes del lodo tales como las sales solubles y el boro (B) deben considerarse cuando se determinan las dosis de aplicación de lodo. Altas concentraciones de salinidad en las capas arables pueden impedir la germinación y el rápido desarrollo de la semilla. Excesiva salinidad puede causar dispersión del suelo, reducir la velocidad de infiltración y la aireación del suelo causando cambios en la estructura del suelo que hace más difícil la labranza del suelo (Jacobs *et al.*, 1993).

4.3.2 Topografía

En general, entre el 60 al 70% de la superficie total del área de estudio, tiene pendientes naturales que van de 0.5 a 1%; el resto de la superficie total tiene pendientes que van de 1 a 5% aproximadamente, además existen lomas o elevaciones de poca importancia principalmente en Marín y General Zuazua, que tienen pendientes que van de 10-20% aproximadamente (Figura 4-2; INEGI, 1980).

Las pendientes ideales para aplicar los lodos a los suelos, principalmente cuando éstos se esparcen superficialmente, son aquellas que están por debajo del 6%, ya sea en forma líquida o deshidratada. A pendientes mayores, puede requerirse de equipo especial para incorporarlos en los suelos mediante inyección (lodo líquido), aunque la inyección comúnmente se realiza en suelos con pendientes que van de 0 a más del 15%. En los terrenos con pendientes por debajo del 6%, se tiene la ventaja que pueden aplicarse los lodos (deshidratados) con equipo similar al usado para aplicar los estiércoles, sin necesidad de utilizar equipo especial y costoso para inyectar o aplicar superficialmente los lodos líquidos.

Figura 4-2. Plano topográfico del área de estudio.

* ver archivo: plano topográfico.ppt (en disco #3)

La inclinación, longitud y forma de la pendiente influyen el coeficiente de escurrimiento de un terreno. El rápido escurrimiento superficial de agua acompañada por erosión de suelo puede erosionar la mezcla de suelo-lodo y transportarlos a las aguas superficiales. Por lo tanto el riesgo de que se presenten escurrimientos superficiales con mezcla suelo-lodo será bajo en aquellos terrenos con pendiente de 0.5 a 1%.

Los terrenos agrícolas del área de estudio tienen pendientes aceptables para aplicar los lodos, debido principalmente a que están situados sobre terrenos planos y generalmente son nivelados a pendientes menos del 1% para la irrigación de los mismos. Por lo tanto, la topografía no será un factor limitante para aplicar los lodos sobre estos terrenos, excepto si se quisiera aplicar con otros fines (reforestación o rehabilitación) sobre el lomerío que se encuentra sobre dicha área de estudio principalmente en General Zuazua y Marín.

4.3.3 Geología

Según INEGI (1988), los tipos de roca que se encuentran en el área de estudio son rocas sedimentarias del tipo Lutita del Cretácico Superior [Ks (lu)] y del tipo Conglomerado del Plioceno [Tpl (cg)]. Figura 4-3

La Lutita del Cretácico Superior [Ks (lu)], según INEGI (1988) es una unidad integrada por lutitas calcáreas fisiles, de colores gris claro y oscuro, café y verde en estratos delgados y medianos. Presenta intercalaciones de yeso en hojuelas, vetillas de calcita y de yeso; además nódulos de hematita; localmente, presenta margas de textura micrítica con intraclastos y algunas areniscas calcáreas que forman lentes (punto de verificación número 15, situado en Marín).

Esta unidad representa a la Formación Méndez, su contacto inferior es concordante con las rocas calcáreo-arcillosas del Cretácico Superior; mientras que el superior es discordante con la unidad arcillo-arenosa del Paleoceno, o con los conglomerados pliocénicos. La unidad se caracteriza por formar lomeríos suaves intensamente disectados conforme a patrones de drenaje arborescentes.

El Conglomerado del Plioceno [Tpl (cg)], según INEGI (1988), es una unidad constituida de clastos redondeados de caliza, pedernal y arenisca, con cementante carbonatado y arenoso, el tamaño de los clastos varía entre 3 a 25 cm, inclusive; generalmente son derivados de rocas carbonatadas, el grado de cementación varía de pobre a bien cementado, en ocasiones está cubierto por una capa de caliche y tiene morfología de mesetas y lomeríos.

El suelo de los cuatro municipios desde el punto de vista geológico, es de tipo Aluvial del Cuaternario, los cuales se caracterizan por ser depósitos aluviales y fluviales, constituidos por gravas, arenas y arcillas sin consolidar, su espesor es posible sea de varios cientos de metros, constituyen planicies con clásticos finos o abanicos aluviales al pie de las sierras donde los clastos se presentan gruesos, son frecuentes los clastos de caliza, arenisca y pedernal (punto de verificación número 18, situado en Pesquería). Figura 4-3.

Es recomendable aplicar el lodo sobre el material aluvial, debido a que éstos generalmente tienen un espesor aceptable (mayor de 1 metro), se encuentran a varios metros del manto freático, contienen en la parte superior del suelo partículas coloidales de origen arcilloso los cuales pueden retener los químicos inorgánicos y orgánicos, además de disminuir la lixiviación de éstos.

El tipo y condición del material consolidado sobre el manto freático también es de mayor importancia para los sitios donde se requiere de altas dosis de aplicación de lodo. La roca fracturada puede permitir lixivitaciones de compuestos tóxicos o microorganismos. La roca de caliza también es de preocupación ya que puede tener un grado de cementación muy pobre o fracturamientos, lo cual, también acelera el movimiento de lixiviados al agua subterránea. Un estrato rocoso no fracturado a poca profundidad restringirá el movimiento del agua, con el potencial para monticular agua subterránea, flujo lateral subsuperficial o drenaje pobre.

Es posible que la estructura de las rocas sedimentarias del tipo lutita del Cretácico Superior, localizadas en los cuatro municipios presente fracturas, el riesgo de una

Figura 4-3. Plano geológico del área de estudio.

* ver archivo: plano geológico.ppt (en disco #3)

contaminación de las aguas subterráneas aumenta si no están cubiertas por un suelo con espesor y propiedades edafológicas recomendadas. El conglomerado al igual que la lutita presenta poco espesor de suelo que los hace inadecuados para recibir lodos. Por lo tanto, si no se conoce bien la condición del material consolidado, debe evitarse la aplicación de lodo sobre los terrenos con roca del tipo lutita y conglomerado, para prevenir una contaminación de las aguas subterráneas, además generalmente se encuentran en el área de estudio formando lomeríos que podrían dificultar la aplicación de los lodos debido a la topografía que presentan.

4.3.4 Hidrología

4.3.4.1 Hidrología subterránea

En el área de estudio se identificaron cuatro unidades geohidrológicas: material no consolidado con posibilidades altas; material consolidado con posibilidades bajas; material no consolidado con posibilidades medias y material consolidado con posibilidades medias. Las unidades están definidas tomando en cuenta las características físicas de las rocas y de los materiales granulares así como estructurales y geomorfológicas (Figura 4-4; INEGI, 1981).

- a) El material no consolidado con posibilidades altas, está constituido de depósitos aluviales de composición areno-arcillosa que rellenan, por lo general, estructuras sinclinales, tienen permeabilidad alta.

Los acuíferos que se explotan son libres existiendo en esta unidad gran cantidad de norias con niveles y gastos variables, la calidad del agua varía de dulce (menos de 525 mg STD/L) a salada (más de 1,400 mg STD/L), los niveles estáticos son de diez metros en promedio y los usos principales son domésticos y pecuarios.

- b) El material consolidado con posibilidades bajas, la constituye principalmente lutita del Cretácico superior, presenta estratificación en capas delgadas y fisilidad. Este material se presenta fuertemente plegado y puede presentar fallas y fracturas que en consecuencia le dan permeabilidad variable.

- c) El material no consolidado con posibilidades medias, está formada de depósitos aluviales areno-arcillosos cuya permeabilidad es media, asimismo presenta en menor porción, conglomerados mal cementado con permeabilidad media, el espesor de estos sedimentos es variable.

Los acuíferos presentes son de tipo libre y se explotan mediante pozos o norias, los niveles estáticos observados varían de 1 a 37 metros. La calidad del agua generalmente es tolerable (525-1,400 mg STD/L) y salada, el uso que se le da es el pecuario, doméstico y agrícola.

- d) El material consolidado con posibilidades medias, está constituido por lutitas de edad Cretácica, compactada, con fracturamiento moderado y permeabilidad media. La profundidad promedio de los niveles estáticos es de diez metros y el agua es de calidad tolerable.

Debe evitarse aplicar lodo sobre los materiales consolidados, ya que éstos pueden tener fracturas que ocasionen una contaminación de las aguas, sobre todo si carecen de un buen espesor de suelo.

Las profundidades mínimas recomendadas del agua subterránea cuando se aplican lodos sobre suelos agrícolas es de 2-3 metros, sin embargo, la profundidad deseable puede variar de acuerdo con las características del lodo, textura del suelo, pH del suelo, método de aplicación del lodo y dosis de aplicación. Por lo tanto, a mayor profundidad se encuentre el agua subterránea, será más ideal para aplicar lodos, evitándose así un contacto directo de las aguas subterráneas con la mezcla suelo-lodo.

Generalmente los acuíferos encontrados en el área de estudio, son acuíferos libres, cuyo nivel estático es mayor de 10 metros de profundidad, lo cual reduce el riesgo de una contaminación del agua subterránea, beneficiando así la aplicación del lodo.

Figura 4-4. Plano de hidrología subterránea del área de estudio.

* ver archivo: plano de hidrología subterránea.ppt (en disco #3)

4.3.4.2 Hidrología superficial

El Río Salinas y Pesquería, son los más importantes en el área de estudio. El Río Pesquería pertenece a la vertiente del Golfo de México que tiene su origen en Arteaga Coahuila. Atraviesa a los municipios de Apodaca y Pesquería y beneficia a los campos de cultivo de los poblados de Santa Rosa y Agua fría en Apodaca, y los campos agrícolas del municipio de Pesquería. Además recibe las aguas residuales tratadas que descargan las plantas de tratamiento de aguas residuales Norte, Noreste y Dulces Nombres (Figura 4-5; INEGI, 1981).

El Río Salinas es de los más importantes del Estado de Nuevo León, cruza a General Zuazua de oeste a este y al municipio de Marín, sus aguas son utilizadas para la agricultura, principalmente. Figura 4-5.

Existen además arroyos de poca importancia tales como el arroyo de la Talaverna que atraviesa al poblado de San Miguel en el Municipio de Apodaca; en Marín se encuentran El Ramos ubicado al noreste y El Mismo, ubicado al sureste del municipio, además del Higuerrillas, Saladito y Recodo de caudal intermitente y en Pesquería se cuenta con el arroyo El Sabinal y Ayancual, de corriente permanente.

De acuerdo a INEGI (1981), en el área de estudio se presentan tres unidades de escurrimiento, que se determinaron a partir de la permeabilidad del terreno, cubierta vegetal y la precipitación media anual. Figura 4-5.

La unidad de escurrimiento con coeficiente menor de 5%, se presenta en mayor proporción y se encuentra principalmente sobre material aluvial de alta permeabilidad.

La siguiente en importancia corresponde a la unidad con coeficientes de escurrimiento de 5 a 10%, la cual se ubica principalmente sobre pastos, matorrales y sobre material aluvial y conglomerado de mediana permeabilidad.

Figura 4-5. Plano de hidrología superficial del área de estudio.

* ver archivo: plano de hidrología superficial.ppt (en disco #3)

La última unidad presenta escurrimientos de 10 a 20% y se ubica principalmente sobre lutita.

Los escurrimientos pueden llegar a los cuerpos de agua superficial y ocasionar contaminación si contienen la mezcla de suelo-lodo. El acarreo de la mezcla suelo-lodo tendrá más potencial si el lodo se aplica sobre áreas con coeficientes de escurrimiento alto, suelo con poco espesor y propiedades edafológicas no recomendables para aplicaciones de lodo. Se recomienda aplicar el lodo en aquellos terrenos que tengan un coeficiente de escurrimiento bajo (0 a 10%), para prevenir contaminación de las aguas superficiales.

Para evitar contaminación de las aguas superficiales, EPA recomienda no aplicar lodo a menos de 10 metros de los cuerpos de agua superficial.

4.3.5 Edafología

De acuerdo con la Base de Referencia Mundial para los Recursos de Suelos de 1994 (World Reference Base for Soil Resources), en el área de estudio se encuentran presentes seis grupos mayores de suelo y diez unidades de suelo. Los grupos mayores de suelo que más predominan son: Castañozem, Xerosol, Leptosol y Vertisol. Cuadros 4-30 y 4-31. Figura 4-6.

Cuadro 4-30. Principales grupos mayores de suelo y unidades en el área de estudio.

GRUPO MAYOR	UNIDAD DE SUELO
CALCISOL	Calcisol háplico
	Calcisol lúvico
CASTAÑOZEM	Castañozem háplico
	Castañozem lúvico
FLUVISOL	Fluvisol calcárico
LEPTOSOL	Leptosol lítico
	Leptosol réndzico
REGOSOL	Regosol calcárico
VERTISOL	Vertisol crómico
	Vertisol háplico

Figura 4-5. Plano edafológico del área de estudio.

* ver archivo: plano edafológico.ppt (en disco #3)

Cuadro 4-31. Principales grupos mayores de suelo encontrados en el área de estudio y superficie abarcada.

UNIDAD	APODACA		G. ZUAZUA		MARIN		PESQUERIA		AREA TOTAL	
	Sup. (ha)	%	Sup. (ha)	%						
CALCISOL	151	0.8	1,343	10.9	3723	28.7	9,107	29.6	14,324	19.3
CASTAÑOZEM	8,195	44.6	5,418	43.7	4,013	31.1	8,578	27.8	26,204	35.1
FLUVISOL	360	2	240	1.9	280	2.2	520	1.9	1,400	1.9
LEPTOSOL	8,069	44	3,845	31	2,177	17	4,332	14	18,423	25
REGOSOL	508	2.8	1,554	12.5	1,018	7.9	2,741	8.9	5,821	7.8
VERTISOL	1,067	5.8	0	0	1,689	13.1	5,472	17.8	8,228	11.1
TOTAL	18,350	100	12,400	100	12,900	100	30,750	100	74,400	100

4.3.5.1 Descripción de los grupos mayores y unidades de suelo encontrados en el área de estudio de acuerdo con la Base de Referencia Mundial (WRB) para suelos

4.3.5.1.1 Calcisol

Los calcisoles son suelos que se caracterizan por su dominante presencia, por lo general, tienen poca profundidad, de ensamblajes de calcio. El carbonato de calcio es el principal componente pero el magnesio y otros carbonatos pueden estar presentes también. Los ensamblajes constituyen un horizonte cálcico o se encuentran en varios horizontes cálcicos sobrepuestos uno del otro. Los carbonatos pueden ser de diferente origen. Estos pueden ser traslocados de las capas superficiales y precipitarse más abajo en la solución, se pueden originar de enriquecimientos laterales, de aguas subterráneas ricas en cal o de polvo volátil rico en carbonato.

El nombre Calcisol fue usado por primera vez en los E.U.A. en 1952, para describir suelos sobre material parental altamente calcáreo situados en las regiones áridas o semiáridas. El concepto central de los calcisoles es de suelos en la cual la acumulación de carbonato de calcio es o ha sido el más dominante en el proceso de formación del suelo. La acumulación de cal puede ocurrir en diferentes formas; como distribución difusa, impregnado en la matriz del suelo, como concentraciones localizadas o en capas continuas, las cuales pueden estar cementadas. Los calcisoles usualmente muestran pequeñas diferenciaciones de horizonte aparte de los horizontes cálcicos presentes.

Estos suelos se localizan en las zonas áridas y semiáridas del Centro y Norte de México. Su vegetación natural es de matorrales y pastizales. Se caracterizan por tener una capa superficial de color claro y muy pobre en humus. Su utilización agrícola está restringida, en la mayoría de las ocasiones, a las zonas de riego. La agricultura de temporal, en este tipo de suelos, es insegura y de bajos rendimientos. El uso pecuario también es importante en ellos en los estados de Coahuila, Chihuahua y Nuevo León, en donde se cría ganado bovino, ovino y caprino, con rendimientos variables en función de la vegetación.

En el área de estudio los Calcisoles se encuentran principalmente en los municipios de Pesquería y Marín, tienen una profundidad de 80 a 120 cm, la textura por lo general es migajón areno-arcilloso o migajón arcilloso, estructura de forma de bloques subangulares, tamaño fino y desarrollo moderado, por lo general sólo presentan horizontes A y B éste último con dos o tres subhorizontes, el pH de estos suelos es de 8.0 a 8.3, tienen una CICT de 17.5 a 27 meq/100 g y una conductividad eléctrica < 2 mmhos/cm, el drenaje interno de estos suelos es drenado. Los Calcisoles del municipio de Marín son los que más fases físicas presentan ya que tienen fases gravosas, petrocálcicas y líticas, los demás municipios tienen poca superficie con fases físicas en sus suelos Calcisoles. Las fases químicas sólo la presentan algunos suelos que se encuentran en la parte este del área de estudio (presentan fase ligeramente salina: de 4 a 8 mmhos/cm a 25°C). Las unidades que se encuentran presentes son el Calcisol háplico y el lúvico y por lo general se encuentran formando asociaciones con otras unidades de suelo.

El Calcisol lúvico se caracteriza por tener un horizonte argílico (es un horizonte subsuperficial que se distingue por tener un contenido de arcilla mayor que el horizonte superior) penetrado con carbonato de calcio. Por lo general, esta unidad tiene dos horizontes (A y B) que presentan las siguientes características:

- **Horizonte A.** Profundidad 0-20 cm. Color pardo oscuro grisáceo en húmedo. Separación de contraste gradual clara y forma plana. Reacción fuerte al HCl diluido. Textura: migajón areno-arcilloso. Consistencia firme en húmedo. Adhesividad moderada, plasticidad moderada. Esqueleto con grava de tamaño fino, forma subangular y cantidad frecuente. Estructura de forma: bloques subangulares, tamaño

fino y desarrollo moderado. Porosidad escasa y constitución finamente porosa. Grietas y/o fisuras de constitución verticales pequeñas. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Ocrico. Cuadro 4-32.

- **Horizonte B2t.** Profundidad 20-60 cm. Color pardo amarillento en húmedo. Separación de contraste clara y forma plana. Reacción fuerte al HCl diluido. Textura arcillosa. Consistencia firme en húmedo. Adhesividad moderada, plasticidad moderada. Estructura de forma granular, tamaño fino y desarrollo fuerte. Porosidad escasa y constitución finamente porosa. Películas de distribución discontinua, espesor delgado y ubicación horizontal. Raíces muy finas frecuentes, raíces finas abundantes, raíces medias escasas. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Argílico. Cuadro 4-32.

Cuadro 4-32. Características físicas y químicas de un Calcisol lúvico del área de estudio.

Horizonte	A	B2t
% de arcilla	32	42
% de limo	14	14
% de arena	54	44
Textura	Migajón areno-arcilloso	Arcillosa
Color en húmedo	10YR 4/2	10YR 5/4
Conductividad eléctrica mmhos/cm	<2	<2
pH en agua relación 1:1	8.0	8.1
% de materia orgánica	2.5	1.0
CICT meq/100 g	24	24
Cationes intercambiables:		
Potasio meq/100 g	0.2	0.6
Calcio meq/100 g	21.8	22
Magnesio meq/100	2.2	2.3
Sodio meq/100 g	0.2	0.2
% saturación de bases	100	100

El Calcisol háplico se caracterizan por no tener acumulaciones de cal o yeso en el subsuelo, ni acumulaciones de sodio. En el área de estudio presentan dos horizontes (A y B) que tienen las siguientes propiedades:

- **Horizonte A.** Profundidad 0-28 cm. Color pardo en húmedo. Separación de contraste abrupta y forma plana. Reacción moderada al HCl diluido. Textura migajón arcilloso. Consistencia blanda en seco y muy friable en húmedo. Adhesividad moderada,

plasticidad moderada. Estructura de forma: bloques subangulares, tamaño muy fino y desarrollo débil. Porosidad moderada y constitución finamente porosa y porosa. Raíces muy finas escasas y raíces finas escasas. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Ocrico. Cuadro 4-33.

- **Horizonte B.** Profundidad 30-125 cm. Color pardo claro en húmedo. Reacción moderada al HCl diluido. Textura migajón arcillo-limoso. Consistencia blanda en seco y muy friable en húmedo. Adhesividad moderada, plasticidad moderada. Estructura de forma: bloques subangulares, tamaño fino y desarrollo débil. Porosidad moderada y constitución finamente porosa y porosa. Facetas de fricción/presión: algunas. Raíces medias muy escasas. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Cámbico. Cuadro 4-33.

Cuadro 4-33. Características físicas y químicas de un Calcisol háplico del área de estudio.

Horizonte	A	B
% de arcilla	38	38
% de limo	36	42
% de arena	26	20
Textura	Migajón arcilloso	Migajón arcillo-limoso
Color en húmedo	7.5YR 5/3	7.5YR 6/4
Conductividad eléctrica mmhos/cm	<2	<2
pH en agua relación 1:1	8.2	8.1
% de materia orgánica	1.4	0.7
CICT meq/100 g	20	19
Cationes intercambiables:		
Potasio meq/100 g	0.4	0.3
Calcio meq/100 g	20.6	23.3
Magnesio meq/100	2.4	2.4
Sodio meq/100 g	0.4	0.2
% saturación de bases	100	100

4.3.5.1.2 Castañozem

Los suelos Castañozem (del latín *castaneo*: castaño; y del ruso *zemljá*: tierra; literalmente, tierra castaña) son suelos que tienen un horizonte mólico (el cual se caracteriza por tener un contenido alto o moderado de materia orgánica, buena estructura, una saturación de bases alta y color oscuro) de 50 cm de espesor, un horizonte cálcico o hypercálcico dentro de los 125 cm de profundidad o pueden contener combinaciones de

polvo de cal dentro de los 75 cm de profundidad, o ambos, no tienen otros horizontes más que los argílicos, cámbicos o gypsicos. Se encuentran en zonas semiáridas o de transición hacia climas más lluviosos. En condiciones naturales tienen vegetación de pastizal, con algunas áreas de matorral. Generalmente se usan para ganadería extensiva mediante el pastoreo, o intensiva con pastos cultivados, con rendimientos de medios a altos; además, se usan en agricultura con cultivos de grano, oleaginosas y hortalizas, con rendimientos generalmente altos, sobre todo si están sometidos a riego, pues son suelos que tienen una alta fertilidad natural.

Los Castañozem se encuentran en los cuatro municipios del área de estudio pero principalmente en los municipios de Pesquería y General Zuazua. Tienen una profundidad de 100-125 cm, una textura migajón arcillosa o franco, la estructura de estos suelos va de forma de bloques angulares, de tamaño muy fino y desarrollo moderado a una estructura de forma granular, tamaño fino y desarrollo débil, normalmente presentan horizontes A y B, el pH de estos suelos es de 8.0 a 8.3, tienen una CICT que va de 11 a 26 meq/100 g y una conductividad eléctrica < 2 mmhos/cm, el drenaje interno de estos suelos es de drenado a muy drenado. Por lo general, estos suelos no presentan fases físicas ni químicas.

Las principales unidades que se encuentran presentes son los Castañozem háplico y los Castañozem lúvico, las cuales se encuentran principalmente formando asociaciones con otras unidades de suelo.

El Castañozem lúvico se caracteriza por tener horizontes argílicos, el cual puede estar sobre un horizonte cálcico. Esta unidad por lo general tiene dos horizontes (A y B) y presentan las siguientes características:

- **Horizonte A.** Profundidad 0-28 cm. Color pardo oscuro rojizo en húmedo. Separación de contraste clara y forma plana. Reacción moderada al HCl diluido. Textura: franco. Consistencia ligeramente dura en seco y friable en húmedo. Adhesividad moderada, plasticidad moderada. Estructura de forma: bloques subangulares, tamaño muy fino y desarrollo fuerte. Nódulos de tamaño pequeño, forma esférica, cantidad frecuente, solidez maciza, dureza blanda, distribución dispersa. Raíces muy finas escasas

frecuentes, raíces finas escasas y raíces medias muy escasas. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Mólico. Cuadro 4-34.

- **Horizonte B21.** Profundidad 28-60 cm. Color pardo oscuro rojizo en húmedo. Reacción moderada al HCl diluido. Textura: migajón areno-arcilloso. Consistencia muy friable en húmedo. Adhesividad moderada, plasticidad ligera. Estructura de forma: bloques angulares, tamaño muy fino y desarrollo moderado. Nódulos de tamaño pequeño, forma esférica irregular; cantidad frecuente, solidez maciza, dureza blanda, distribución dispersa. Raíces muy finas escasas y raíces finas escasas. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Argílico. Cuadro 4-34.
- **Horizonte B22t.** Profundidad 65-125 cm. Color pardo oscuro rojizo en húmedo. Reacción moderada al HCl diluido. Textura: arcillosa. Consistencia friable en húmedo. Adhesividad moderada, plasticidad moderada. Estructura de forma: bloques subangulares, tamaño fino y desarrollo moderado. Nódulos de tamaño pequeño y mediano, forma esférica e irregular, cantidad dominante, solidez maciza, dureza blanda, distribución dispersa. Películas de distribución continua, espesor moderadamente grueso y ubicación en puentes y/o superficie de clásticas. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Argílico. Cuadro 4-34.

Cuadro 4-34. Características físicas y químicas de un Castañozem lúvico en el área de estudio.

Horizonte	A	B21	B22t
% de arcilla	24	30	42
% de limo	46	20	28
% de arena	30	50	30
Textura	Franco	Migajón areno- arcilloso	arcillosa
Color en húmedo	5YR 3/3	5YR 2/2	5YR 3/6
Conductividad eléctrica mmhos/cm	<2	<2	<2
pH en agua relación 1:1	8.2	8.3	8.3
% de materia orgánica	0.9	0.5	0.7
CICT meq/100 g	11.3	13.8	13.5
Cationes intercambiables:			
Potasio meq/100 g	0.6	0.2	0.2
Calcio meq/100 g	16.3	16.3	17.5
Magnesio meq/100	1.9	2.1	2.8
Sodio meq/100 g	0.1	0.1	0.1
% saturación de bases	100	100	100

El Castañozem háptico se caracterizan por no tener los siguientes horizontes: gypsic, argílico, cálcico o hypercálcico dentro de los 125 cm de profundidad. . Esta unidad por lo general tiene dos horizontes (A y B) y presentan las siguientes características:

- **Horizonte A.** Profundidad 0-27 cm. Color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo. Separación de contraste clara y forma plana. Reacción moderada al HCl diluido. Textura: migajón arcilloso. Consistencia blanda en seco y friable en húmedo. Adhesividad ligera, plasticidad ligera, la alteración es sana, su naturaleza caliza. Estructura de forma granular, tamaño fino y desarrollo débil. Porosidad escasa y constitución finamente porosa. Raíces finas frecuentes. Drenaje interno: muy drenado. Denominación del horizonte: Mólico. Cuadro 4-35.
- **Horizonte B21.** Profundidad 27-65 cm. Color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo. Separación de contraste clara y forma plana. Reacción moderada al HCl diluido. Textura: migajón arcilloso. Consistencia blanda en seco y friable en húmedo. Adhesividad moderada, plasticidad moderada. Esqueleto con grava de tamaño medio, forma subredondeada y cantidad muy escasa; la alteración es sana y su naturaleza caliza. Estructura de forma granular, tamaño fino y desarrollo débil. Porosidad moderada y constitución porosa. Raíces muy finas frecuentes y raíces finas frecuentes. Drenaje interno: muy drenado. Denominación del horizonte: Cámbico. Cuadro 4-35.
- **Horizonte B22.** Profundidad 65-125 cm. Color pardo oscuro grisáceo en húmedo. Reacción moderado al HCl diluido. Textura migajón arcilloso. Consistencia blanda en seco y friable en húmedo. Adhesividad moderada, plasticidad moderada. Esqueleto con grava de tamaño medio, forma subredondeada y cantidad muy escasa, la alteración es sana y su naturaleza es caliza. Estructura de forma: bloques subangulares, tamaño fino y desarrollo moderado. Porosidad escasa y constitución finamente porosa. Concreciones de tamaño fino, forma filamentosa, cantidad escasa, solidez maciza, dureza blanda, distribución acumulada, naturaleza de carbonato de calcio y color blanco. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Cámbico. Cuadro 4-35.

Cuadro 4-35. Características físicas y químicas de un Castañozem háplico en el área de estudio.

Horizonte	A	B21	B22
% de arcilla	30	30	26
% de limo	30	32	30
% de arena	40	38	44
Textura	Migajón arcilloso	Migajón arcilloso	Migajón arcilloso
Color en húmedo	10YR 3/2	10YR 3/2	10YR 4/2
Conductividad eléctrica mmhos/cm	< 2	> 2	> 2
pH en agua relación 1:1	8.2	8.2	8.1
% de materia orgánica	1	0.9	0.8
CICT meq/100 g	20.3	22.3	22
Cationes intercambiables:			
Potasio meq/100 g	0.6	0.2	0.2
Calcio meq/100 g	15.6	14.65	19.75
Magnesio meq/100	2.1	1.9	1.8
Sodio meq/100 g	0.1	0.2	0.2
% saturación de bases	100	100	100

4.3.5.1.3 Fluvisol

Los Fluvisoles son suelos que consisten de material flúvico en los 25 cm de la superficie del suelo y no tienen otros horizontes diagnosticados más que los ocrícos, mólicos, úmbricos, hísticos, sálicos, sulfídicos y sulfúricos. Se encuentran en todos los climas y regiones de México, cercano siempre a los lagos o sierras desde donde escurre el agua a los llanos, así como en lechos de los ríos. La vegetación que presentan varía desde selvas hasta matorrales y pastizales, algunos tipos de vegetación son típicos de estos suelos como los ahuehuetes, ceibas o sauces. Pueden ser someros o profundos, arenosos o arcillosos, fértiles o infértiles, en función del tipo de materiales que lo forman.

Los Fluvisoles se encuentran en los cuatro municipios del área de estudio, tienen una profundidad menor de 90 cm, una textura migajón arcilloso, la estructura de estos suelos es de forma laminar, tamaño muy fino y desarrollo débil, generalmente presenta sólo horizonte A, el pH de estos suelos es de 7.9 a 8.2, tienen una CICT que va de 13 a 17 meq/100 g y una conductividad eléctrica < 2 mmhos/cm, el drenaje interno de estos suelos es de muy drenado a excesivamente drenado. Por lo general, sólo presentan fases físicas gravosas.

La unidad Fluvisol calcárico es la única presente en los cuatro municipios y se caracteriza por tener material calcárico entre los 20 y 50 cm de la superficie. El horizonte A por lo general tiene las siguientes características:

- **Horizonte A11.** Profundidad 0-16 cm. Color gris oscuro en húmedo. Separación de contraste clara y forma plana. Reacción fuerte al HCl diluido. Textura migajón arcilloso. Consistencia suelta en seco y suelta en húmedo. Adherencia nula, plasticidad ligera. Esqueleto con grava de tamaño fino, forma subredondeada y cantidad frecuente. Estructura de forma laminar. Raíces finas escasas. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Mólico. Cuadro 4-36.
- **Horizonte A12.** Profundidad 16-30 cm. Color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo. Separación de contraste abrupta y forma plana. Reacción fuerte al HCl diluido. Textura: migajón areno-arcilloso. Consistencia suelta en seco y en húmedo. Adhesividad nula, plasticidad ligera. Esqueleto con grava de tamaño fino, forma subredondeada y cantidad frecuente. Raíces muy finas abundantes, raíces finas frecuentes, raíces medias escasa y raíces gruesas muy escasa. Denominación del horizonte: Mólico. Drenaje interno: muy drenado. Cuadro 4-36.

Cuadro 4-36 Características físicas y químicas de un Fluvisol Calcárico en el área de estudio.

Horizonte	A11	A12
% de arcilla	26	26
% de limo	34	28
% de arena	40	56
Textura	Migajón arcilloso	Migajón areno-arcilloso
Color en húmedo	10YR 4/1	10YR 3/2
Conductividad eléctrica mmhos/cm	<2	<2
pH en agua relación 1:1	8.1	8.1
% de materia orgánica	2.28	2.28
CICT meq/100 g	13.25	17
Cationes intercambiables:		
Potasio meq/100 g	1.52	0.825
Calcio meq/100 g	28.6	40.17
Magnesio meq/100	4.20	1.81
Sodio meq/100 g	0.387	0.60
% saturación de bases	100	100

4.3.5.1.4 Leptosol

El nombre Leptosol (del griego *leptos*: delgado) es usado para connota suelos poco profundos situados sobre roca dura o material altamente calcáreo y suelos que tienen un peso menor del 10% de material terrestre fino. Anteriormente fueron conocido (pro parte) como Litosoles, Rankers, Rendzinas y Regosoles.

Los Leptosoles representan la fase inicial de formación de los suelos, estos son de gran importancia en el manto del suelo, debido a que son los precursores de los suelos jóvenes.

Los Leptosoles se definen como: suelos que están limitados en profundidad por roca dura continua a menos de 30 cm de la superficie del suelo; en la misma profundidad contienen o están sobre un material con un equivalente de calcio de más del 40%; tienen desde la superficie del suelo hacia abajo una profundidad de por lo menos 75 cm o roca dura con menos del 10 por ciento (por peso) de material fino terrestre y sólo presentan los siguientes horizontes: mólicos úmbricos, ocrícos o vérticos.

Los Leptosoles son el grupo de suelos de mayor extensión, cubriendo globalmente un área de aproximadamente 1,655 millones de ha (FAO, 1991). Estos suelos están en todas las partes del mundo desde los trópicos hasta la tundra polar fría rodeando las capas de hielo y el nivel del mar a las partes altas de las montañas.

Los Leptosoles se encuentran en los cuatro municipios del área de estudio, principalmente en Apodaca. Estos suelos presentan las siguientes propiedades: tienen una profundidad menor de 25 cm, una textura migajón arcilloso, la estructura de estos suelos es de forma: bloques subangulares de tamaño fino y desarrollo moderado, presentan sólo un horizonte A, el pH de estos suelos es de 8.0 a 8.3, tienen una CICT que va de 16 a 24 meq/100 g y una conductividad eléctrica < 2 mmhos/cm, el drenaje interno de estos suelos es drenado. Los Leptosoles lítico y rendzico son las unidades que se encuentran en el área

de estudio. Por lo general la unidad Leptosol rendzico es la única que presenta fases físicas (petrocálcicas). Ninguna unidad presenta fases químicas.

Los Leptosoles líticos se caracterizan por tener una profundidad menor de 10 cm, el horizonte representativo para el área de estudio presenta las siguientes propiedades:

- **Horizonte A.** Profundidad 0-11 cm. Color pardo oscuro en húmedo. Separación de contraste abrupta y forma ondulada. Reacción fuerte al HCl diluido. Textura migajón arcilloso. Consistencia suelta en seco y muy friable en húmedo. Adhesividad ligera, plasticidad ligera. Estructura de forma: bloques subangulares de tamaño fino y desarrollo moderado. Porosidad moderada y constitución finamente porosa. Raíces muy finas escasas y raíces finas muy escasas. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: mólico. Cuadro 4-37.

Cuadro 4-37. Características físicas y químicas de un Leptosol lítico en el área de estudio.

Horizonte	A
% de arcilla	28
% de limo	41
% de arena	31
Textura	Migajón arcilloso
Color en húmedo	10YR 4/3
Conductividad eléctrica mmhos/cm	<2
pH en agua relación 1:1	8.3
% de materia orgánica	2.7
CICT meq/100 g	16.75
Cationes intercambiables:	
Potasio meq/100 g	3.575
Calcio meq/100 g	32
Magnesio meq/100	0.14
Sodio meq/100 g	0.537
% saturación de bases	100

Los Leptosoles réndzicos se caracterizan por tener un horizonte mólico el cual contiene o está sobre un material calcáreo con un equivalente de carbonato de calcio mayor del 40%. El horizonte representativo para el área de estudio presenta las siguientes características:

- **Horizonte A.** Profundidad 0-20 cm. Color pardo rojizo. Separación de contraste abrupta y forma plana. Reacción moderada al HCl diluido. Textura migajón arcilloso. Consistencia muy friable en húmedo. Adhesividad ligera, plasticidad ligera. Esqueleto con grava de tamaño fino, forma bloques subangulares, y cantidad frecuente, con guijarros de forma angular y cantidad escasa; la alteración es sana y su naturaleza caliza. Estructura de forma bloques subangulares, de tamaño fino y desarrollo moderado. Porosidad abundante y constitución finamente porosa. Raíces muy finas escasas, raíces finas escasas y raíces medias muy escasas. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Mólico. Cuadro 4-38.

Cuadro 4-38. Características físicas y químicas de un Leptosol rendzico en el área de estudio.

Horizonte	A
% de arcilla	36
% de limo	28
% de arena	36
Textura	Migajón arcilloso
Color en húmedo	5YR 4/4
Conductividad eléctrica mmhos/cm	<2
pH en agua relación 1:1	8.1
% de materia orgánica	1.7
CICT meq/100 g	20
Cationes intercambiables:	
Potasio meq/100 g	0.8
Calcio meq/100 g	25
Magnesio meq/100	2.1
Sodio meq/100 g	0.2
% saturación de bases	100

4.3.5.1.5 Regosol

La unidad de suelo Regosol (Del griego *rhegos*: manto, cobija. Denominación connotativa de la capa del material suelto que cubre la roca) se puede encontrar en muy distintos climas y con diversos tipos de vegetación. Dichos suelos son definidos como: suelos que tienen un horizonte ócrico o una superficie con propiedades yermicas (suelos que tienen menos del 0.6 por ciento de carbón orgánico en los 18 cm de superficie cuando son mezclados, o menos del 0.20% de carbón orgánico si la textura es más granulosa que el migajón arenoso y presenta gravas o piedras en la superficie del suelo y otras características

de condición árida) no tienen un horizonte cámbico u otros horizontes, características o propiedades de ensambles que son definitivas para cualquier otro grupo de suelo. En general son claros y se parecen bastante a la roca que los subyace, cuando son profundos. Frecuentemente son someros, su fertilidad es variable y su uso agrícola está principalmente condicionado a su profundidad y al hecho de que no presenten pedregosidad.

Los Regosoles se encuentran principalmente en Pesquería y General Zuazua, en Marín y Apodaca se encuentran en pequeñas cantidades, en el área de estudio estos suelos tienen una profundidad de 12 a 75 cm, una textura franco o migajón arcilloso, la estructura de estos suelos va de forma de bloques angulares, de tamaño medio y desarrollo fuerte a una estructura de forma de bloques subangulares, tamaño fino y desarrollo moderado, generalmente sólo un horizonte A está presente, el pH de estos suelos es de 8.2 a 8.4, tienen una CICT que va de 17.5 a 22.5 meq/100 g y una conductividad eléctrica < 2 mmhos/cm, el drenaje interno de estos suelos es de drenado a muy drenado. Esta unidad en toda el área de estudio sólo presenta fases físicas: líticas y gravosas.

La unidad Regosol calcárico es la única presente en los cuatro municipios, esta unidad se caracteriza por tener material calcárico (carbonatos y yeso) entre los 20 y 50 cm de profundidad. El horizonte A representativo para el área de estudio presenta las siguientes propiedades:

- **Horizonte A.** Profundidad 0-25 cm. Color pardo oscuro en húmedo. Separación de contraste abrupta y forma irregular. Reacción moderada al HCl diluido. Textura franco. Consistencia suelta en seco y en húmedo. Esqueleto con grava de tamaño medio y grueso, forma subredondeada, angular, subangular y plana; cantidad frecuente; guijarros de forma subredondeada, angular, subangular y plana; cantidad frecuente; piedras de forma redondeada, angular subangular y plana; cantidad abundante. Estructura de forma bloques subangulares, tamaño fino y desarrollo moderado. Porosidad moderada y constitución finamente porosa y porosa. Raíces muy finas frecuentes, raíces finas frecuentes, raíces medias escasas. Superficie cubierta de piedras, granillos y

afloramientos rocosos. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Ocrico.
Cuadro 4-39.

Cuadro 4-39. Características físicas y químicas de un Regosol calcárico en el área de estudio.

Horizonte	A
% de arcilla	16
% de limo	38
% de arena	46
Textura	Franco
Color en húmedo	7.5YR 4/3
Conductividad eléctrica mmhos/cm	<2
pH en agua relación 1:1	8.3
% de materia orgánica	1
CICT meq/100 g	19
Cationes intercambiables:	
Potasio meq/100 g	0.3
Calcio meq/100 g	20
Magnesio meq/100	1.5
Sodio meq/100 g	0.2
% saturación de bases	100

4.3.5.1.6 Vertisol

Los Vertisoles (del latín *verto*: voltear, literalmente, suelo que se revuelve, que se voltea) son suelos que se caracterizan por tener un horizonte vértico que inicia entre los 25 y 75 cm de la superficie del suelo, tienen 30% o más de arcillas en todos los horizontes a una profundidad de 100 cm o más, o una capa contrastada (contraste lítico o paralítico, horizontes hypercálcicos o hypergypsicos, duripán, discontinuidad litológica o sedimentaria, etc.) entre los 50 y 100 cm.

Desarrollan grietas desde la superficie del suelo hacia abajo las cuales permanecen por un período en muchos años (a menos que sean irrigados o cultivados para conservar la humedad del suelo), por lo menos un cm de ancho a una profundidad de 50 cm; si son irrigados los 50 cm superiores tienen un coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) de 0.06 o más. Se presentan en climas templados y cálidos, en zonas en las que hay una marcada estación seca y otra lluviosa. La vegetación natural de estos suelos va desde las selvas bajas hasta los pastizales y matorrales de los climas semisecos.

Son pegajosos cuando están húmedos y muy duros cuando están secos. A veces son salinos. Su utilización agrícola es muy extensa, variada y productiva. Son casi siempre muy fértiles pero presentan ciertos problemas para su manejo, ya que su dureza dificulta la labranza y con frecuencia presentan problemas de inundación y drenaje. En el Norte de México se usan para la agricultura de riego, básicamente de algodón y granos, con rendimientos buenos en todos los casos. Para la utilización pecuaria, cuando presentan pastizales, son también suelos muy adecuados. Por lo general una baja susceptibilidad a la erosión.

En el área de estudio se encuentran principalmente en los municipios de Pesquería y Marín, en el Municipio de Apodaca se encuentra en menor proporción y en el municipio de General Zuazua no están presentes, tienen una profundidad de 60 a 100 cm, la textura generalmente es arcillosa, estructura de forma masiva, tamaño fino y desarrollo fuerte, por lo general sólo presenta un horizonte A y de dos a tres subhorizontes, el pH de estos suelos es de 7.9 a 8.3, tienen una CICT de 20 a 27 meq/100 g y una conductividad eléctrica < 2 mmhos/cm, el drenaje interno de estos suelos por lo general es moderadamente drenado. Sólo presenta fases salinas (químicas), en algunos suelos se tiene una salinidad de ligera a moderada. Los Vertisoles crómicos y háplicos son las unidades que se encuentran presentes en el área de estudio.

Los Vertisoles crómicos se caracterizan por tener un color Munsell dominante de 7.5YR y un croma, húmedo, mayor de 4, o un color más rojizo que el 7.5YR, por lo menos entre los 20 y 50 cm de la superficie. El horizonte A representativo tiene las siguientes propiedades:

- **Horizonte A11.** Profundidad 0-30 cm. Color pardo en húmedo. Separación de contraste abrupta y forma plana. Reacción moderada al HCl diluido. Textura: arcillosa. Consistencia ligeramente dura en seco en seco y firme en húmedo. Adhesividad moderada, plasticidad moderada. Estructura de forma masiva, tamaño fino y desarrollo fuerte. Porosidad moderada y constitución finamente porosa y porosa. Facetas de fricción/presión presentes. Raíces muy finas escasas, raíces finas frecuentes, raíces

medias escasas y raíces gruesas muy escasas. Superficie agrietada. Drenaje interno: moderadamente drenado. Denominación del horizonte: Ocrico. Cuadro 4-40.

- **Horizonte A12.** Profundidad 30-60 cm. Color pardo en húmedo. Separación de contraste abrupta y forma plana. Reacción moderada al HCl diluido. Textura arcillosa. Consistencia dura en seco y muy firme en húmedo. Adhesividad moderada, plasticidad moderada. Estructura de forma masiva; desarrollo fuerte. Porosidad abundante y constitución porosa y esponjosa. Facetas de fricción/presión presentes. Raíces muy finas escasas, raíces finas escasas y raíces medias muy escasas. Drenaje interno: moderadamente drenado. Denominación del horizonte: vértico. Cuadro 4-40.

Cuadro 4-40. Características físicas y químicas de un Vertisol crómico del área de estudio.

Horizonte	A11	A12
% de arcilla	44	50
% de limo	34	30
% de arena	22	20
Textura	Arcillosa	Arcillosa
Color en húmedo	10YR 5/2	10YR 5/2
Conductividad eléctrica mmhos/cm	<2	<2
pH en agua relación 1:1	8.1	7.9
% de materia orgánica	2.8	2.0
CICT meq/100 g	22.3	25.5
Cationes intercambiables:		
Potasio meq/100 g	0.7	0.2
Calcio meq/100 g	28.2	28.8
Magnesio meq/100	2.4	1.4
Sodio meq/100 g	0.2	0.4
% saturación de bases	100	100

Los Vertisoles háplicos se caracterizan por no tener las siguientes propiedades: no tienen un horizonte sulfúrico, sulfídrico, salino, sódico, gypsico o cálcico; un porcentaje de saturación de base menor del 75% entre los 25-50 cm de profundidad y no presentan las propiedades de los Vertisoles crómicos. El horizonte representativo presenta las siguientes propiedades:

- **Horizonte A11.** Profundidad 0-22 cm. Color pardo rojizo en húmedo. Separación de contraste gradual y forma irregular. Reacción moderada al HCl diluido. Textura: arcillosa. Consistencia dura en seco y friable en húmedo. Adhesividad fuerte,

plasticidad fuerte. Estructura de forma masiva, tamaño fino y desarrollo moderado. Porosidad escasa y constitución finamente porosa. Facetas de fricción/presión muy notables. Raíces finas abundantes y raíces medias muy escasas Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Umbrico. Cuadro 4-41.

- **Horizonte A12.** Profundidad 22-52 cm. Color paro rojizo en húmedo. Reacción moderada al HCl diluido. Textura arcillosa. Consistencia dura en seco y firme en húmedo. Adhesividad fuerte, plasticidad fuerte. Estructura de forma masiva, tamaño fino y desarrollo moderado. Porosidad escasa y constitución finamente porosa. Facetas de fricción/presión muy notables. Raíces finas muy escasas, raíces medias muy escasas. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Vértico Cuadro 4-41.
- **Horizonte A13.** Profundidad 52-100 cm. Color pardo en húmedo. Reacción moderada al HCl diluido. Textura: arcillosa. Consistencia dura en seco y firme en húmedo. Adhesividad fuerte, plasticidad fuerte. Estructura de forma masiva, tamaño fino y desarrollo moderado. Porosidad escasa y constitución finamente porosa. Concreciones de tamaño fino, forma ovalada, cantidad escasa, solidez maciza, dureza blanda, distribución dispersa. Reacción fuerte al HCl; naturaleza de carbonato de calcio y color blanco. Drenaje interno: drenado. Denominación del horizonte: Vértico. Cuadro 4-41.

Cuadro 4-41. Características físicas y químicas de un Vertisol háplico del área de estudio.

Horizonte	A11	A12	A13
% de arcilla	44	58	62
% de limo	34	20	18
% de arena	22	22	20
Textura	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa
Color en húmedo	5YR4/1	5YR 5/3	7.5 6/2
Conductividad eléctrica mmhos/cm	<2		<2
pH en agua relación 1:1	8.3	8.3	8.2
% de materia orgánica	2.4	1.3	1.2
Cationes intercambiables:			
CICT meq/100 g	19.8	23.3	24.3
Potasio meq/100 g	0.8	0.2	0.3
Calcio meq/100 g	25	23.8	21.9
Magnesio meq/100	1.6	1.9	2.9
Sodio meq/100 g	0.1	0.2	0.8
% saturación de bases	100	100	100

4.3.5.2 Metales contenidos en los suelos del área de estudio

En los Cuadros 4-42a y 42b, se presentan los resultados de los análisis para metales pesados contenidos en los suelos (profundidad de 0-15 cm) de ocho lugares del área de estudio.

En base al promedio de los análisis de suelo (Cuadro 4-43) para cada uno de los lugares muestreados se tuvo lo siguiente:

- a) Las concentraciones de metales pesados contenidos en los suelos de los ocho lugares muestreados, son menores que los límites máximos acumulativos de metal recomendados por EPA (1995b).
- b) Los suelos de Marín y Zuazua, son los que tienen las concentraciones de metales más bajas y los suelos de Agua Fría, Dulces Nombres y Santa Rosa son los que tienen las mayores concentraciones de metales pesados.
- c) Las concentraciones de Cr y Zn de los suelos muestreados, rebasan las concentraciones típicas de los suelos de Ontario. La concentración de Ni de los suelos de Agua Fría, Dulces Nombres y Santa Rosa rebasan las concentraciones típicas de los suelos de Ontario.
- d) Las concentraciones de As, Cd, Cu, Hg, Mo, Pb y Se (excepto Santa Rosa) de los suelos muestreados, son menores a las concentraciones típicas de los suelos de Ontario.
- e) Las concentraciones de As, Se (excepto Marín y Zuazua) y Zn de los suelos muestreados, rebasan las concentraciones típicas de los suelos de E.U.A. Las concentraciones de Cu de los suelos de Dulces Nombres y Santa Rosa rebasan las concentraciones típicas de los suelos de E.U.A. Los suelos de Agua Fría, Dulces Nombres y Santa Rosa rebasan los niveles típicos de Ni de los suelos de E.U.A.

- f) Las concentraciones de Cd, Cu, Hg, Ni y Pb, de los suelos muestreados, son menores a las concentraciones típicas de los suelos de E.U.A. La concentración de Se de los suelos de Marín y Zuazua son menores a las concentraciones de los suelos de E.U.A.

Las concentraciones de metales pesados principalmente de Cr, Cu, Ni y Zn de los suelos de Agua Fría, Dulces Nombres y Santa Rosa tal vez se deben a que anteriormente estos suelos eran regados con aguas residuales no tratadas, las cuales contenían una amplia gama de desechos domésticos, industriales y del comercio.

Las concentraciones de metales pesados en los suelos de Marín y Zuazua tal vez representan el metal que se originó debido a la formación del suelo en forma natural o el derivado del material parental.

Conocer los niveles de metales pesados en el suelo es un factor importante para determinar si estos presentan concentraciones elevadas que limiten la aplicación del lodo. El riego de campos agrícolas con aguas residuales no tratadas ha ocasionado que los niveles de metales pesados aumenten en el suelo, los cuales al ser consumidos o digerido en altas concentraciones pueden ser dañinos para las plantas, animales o humanos.

En los campos regados con aguas residuales por lo general no se lleva un control de los metales contenidos en dichas aguas y por lo tanto no se tiene una estimación de los metales que son aplicados por unidad de superficie. Por lo tanto es recomendable realizar análisis del suelo para determinar si son aptos para recibir más metal sin que excedan las concentraciones recomendadas.

EPA establece límites acumulativos de los metales que son agregados al suelo. Dichos límites fueron diseñados para proteger de la contaminación a la salud humana y medio ambiente de daños adversos por las aplicaciones de metales contenidos en los lodos. Los límites acumulativos de EPA representan las máximas cantidades de metal que pueden aplicarse con el lodo al suelo por unidad de superficie.

EPA considera que el metal contenido en forma natural o el derivado del material parental en los suelos (de E.U.A.) más las máximas cargas de metal que pueden aplicarse al suelo por unidad de superficie con los lodos llegarán a una concentración aceptable (EPA, 1995b). Cuadro 4-44.

Por lo tanto, los análisis de metal contenido en los suelos no contaminados generalmente no son indispensables debido principalmente a que es recomendado aplicar el lodo sobre los terrenos que no han sufrido aplicaciones de metal por medio de otras fuentes.

En el caso de los suelos del área de estudio que no han recibido aplicaciones adicionales de metales pesados pueden tomarse los límites máximos acumulativos recomendados por EPA como las máximas cantidades de metales pesados que podrían agregarse a estos suelos, debido a que los metales contenidos en los suelos en forma natural son muy similares a los contenidos en los suelos de E.U.A (Marín y Zuazua). Cuadro 4-44.

Para el área de estudio sería recomendable tomar en cuenta las concentraciones de metal que se tienen en los suelos de Agua Fría, Dulces Nombres y Santa rosa, ya que es muy probable que los campos agrícolas de estos lugares hayan sido irrigados con aguas residuales y tendrán concentraciones muy variadas de metales pesados (Cuadro 4-42).

Los análisis de metales contenidos en el suelo podrían servir para determinar la cantidad de metal adicional que pudiera agregarse a estos suelos, lo anterior puede determinarse sustrayendo las concentraciones de metal que se tienen en estos suelos de los límites máximos acumulativos recomendados por EPA.

En el Cuadro 4-44 se presenta el promedio de los suelos que no han recibido aplicaciones de metales (Marín-Zuazua) y suelos que ya han recibido aplicaciones de metales (Apodaca, Dulces Nombres y Santa Rosa) así como la máxima cantidad que se podría agregar a estos suelos sin que represente un peligro a las plantas, animales, humanos y medio ambiente en general de acuerdo a los límites máximos acumulativos de EPA.

Cuadro 4-42a. Resultados de los análisis para metales pesados contenidos en los suelos (profundidad de 0-15 cm) de ocho lugares del área de estudio.

Parámetro	Marín-Zuazua			Agua Fría	Pesquería					Rancho San José				Referencia		
	#1	#2	#3	#1	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#1	#2	#3	#4	Ontario	E.U.A.
(mg/kg)																
As	5.0	6.4	3.8	5.2	5.5	5.0	5.3	5.0	4.7	5.3	5.4	5.1	5.5	5.2	7	3.00
Cd	ND	ND	0.1	ND	ND	ND	ND	ND	0.1	ND	0.2	ND	ND	ND	0.8	0.20
Cr	22	24	23	49	22	32	31	26	24	24	23	19	21	25	15	*
Cu	12	13	9	17	16	15	13	17	10	10	13	13	13	15	25	19
Hg	0.06	0.05	0.03	0.08	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.1	0.10
Mo	ND	ND	0.4	1.0	0.3	0.8	0.9	1.0	0.1	ND	0.9	0.7	ND	0.6	2	*
Ni	10	14	13	25	15	17	19	13	13	18	15	16	14	20	16	18.00
Pb	ND	ND	ND	10	ND	ND	ND	4.6	2.0	ND	ND	6.9	ND	ND	15	11.00
Se	0.2	0.2	0.2	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.21
Zn	65	72	55	125	56	66	75	81	61	75	62	64	62	72	55	54.00

ND: No detectado.

* Dato no disponible.

Cuadro 4-42b. Resultados de los análisis para metales pesados contenidos en los suelos (profundidad de 0-15 cm) de ocho lugares del área de estudio (continuación).

Parámetro	Santa Rosa 1					Santa Rosa 2					Huinalá					Dulces Nombres	Referencia	
	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#3	#4	#5		Ontario	EUA
mg/kg																		
As	4.3	4.5	3.5	5.7	7.2	8.9	4.0	2.6	3.9	4.9	2.9	3.4	1.2	4.2	4.5	4.3	7	3.00
Cd	ND	ND	ND	ND	ND	0.2	ND	ND	0.2	0.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.8	0.20
Cr	22	36	25	29	57	59	39	26	62	48	21	17	42	31	17	26	15	*
Cu	17	22	18	12	30	34	16	15	23	20	9	8	18	13	11	23	25	19
Hg	0.04	0.07	0.05	0.05	0.15	0.20	0.04	0.03	0.12	0.12	0.06	0.04	0.09	0.04	0.09	0.06	0.1	0.10
Mo	ND	ND	0.7	0.6	0.5	0.3	0.7	ND	1.0	1.2	0.1	ND	ND	0.7	0.1	0.1	2	*
Ni	16	20	15	13	24	22	13	17	21	18	11	11	21	20	12	23	16	18.00
Pb	ND	ND	5.3	5.6	42	34	ND	ND	16	ND	7	ND	ND	7.8	ND	.1	15	11.00
Se	1.1	0.4	0.2	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.21
Zn	68	116	87	80	318	234	85	69	120	87	58	41	92	52	50	88	55	54.00

ND: No detectado.

- Dato no disponible.

Cuadro 4-43. Promedio de los análisis de suelo para metales de cada uno de los lugares muestreados contra los niveles típicos encontrados en los suelos de Ontario y E.U.A. y límites máximos acumulativos de la EPA (mg/kg de suelo).

Parámetro	Marín-Zuazua	Agua Fría	Pesquería	Rancho San José	Santa Rosa 1	Santa Rosa 2	Huinalá	Dulces Nombres	Referencia Ontario	Referencia E.U.A.	Límites Máximos Acumulativos ^a
As	5.07	5.20	5.13	5.30	5.04	4.86	3.24	4.30	7.00	3.00	20.5
Cd	0.03	ND	0.02	0.05	ND	0.12	ND	ND	0.80	0.20	19.5
Cr	23.00	49.00	26.50	22.00	33.80	46.80	25.60	26.00	15.00	b	1500c
Cu	11.33	17.00	13.50	13.50	19.80	21.60	11.80	23.00	25.00	19	750
Hg	0.05	0.08	0.04	0.04	0.07	0.10	0.06	0.06	0.10	0.10	8.5
Mo	0.13	1.00	0.52	0.55	0.36	0.64	0.18	0.10	2.00	b	9c
Ni	12.33	25.00	15.83	16.25	17.60	18.20	15.00	23.00	16.00	18.00	210
Pb	ND	10.00	1.10	1.73	10.58	10.00	2.96	6.10	15.00	11.00	150
Se	0.20	0.40	0.28	0.33	0.48	0.38	0.30	0.40	0.40	0.21	50
Zn	64.00	126.00	69.00	65.00	133.80	119.00	58.60	88.00	55.00	54.00	1400

a: EPA 1995b; b: dato no disponible; c: están siendo analizados por EPA; ND: No detectado.

Cuadro 4-44. Promedio de los suelos que no han recibido aplicaciones de metal y suelos que ya han recibido, máxima cantidad de metal que pudiera agregarse a estos, promedio en suelos de E.U.A., límite máximo acumulativo de EPA y concentración aceptable en suelos de E.U.A.(mg/kg de suelo).

Parámetro	Suelos que no han recibido metales	Suelos que ya han recibido aplicaciones de metales					Concentración promedio en suelos de E.U.A.	Límite Máximo Acumulativo de EPA	Concentración aceptable en suelos de E.U.A. ^a
	Marín-Zuazua	Agua Fría	Santa Rosa (Prom.)	Dulces Nombres	Promedio	Máxima cantidad de metal que pudiera agregarse			
As	5.07	5.20	4.95	4.30	4.82	15.68	3.00	20.5	23.50
Cd	0.03	ND	0.06	ND	0.02	19.48	0.20	19.5	19.70
Cr	23.00	49.00	40.3	26.00	38.43	1461.57	b	1500c	b
Cu	11.33	17.00	20.7	23.00	20.23	729.77	19	750	769.00
Hg	0.05	0.08	0.085	0.06	0.08	8.42	0.10	8.5	8.60
Mo	0.13	1.00	0.5	0.10	0.53	8.47	b	9c	b
Ni	12.33	25.00	17.9	23.00	21.97	188.03	18.00	210	228.00
Pb	ND	10.00	10.29	6.10	8.80	141.2	11.00	150	161.00
Se	0.20	0.40	0.43	0.40	0.41	49.59	0.21	50	50.21
Zn	64.00	126.00	126.4	88.00	113.47	1286.53	54.00	1400	1,454.00

a: EPA 1995b; b: dato no disponible; c: están siendo analizados por EPA; ND: No detectado.

4.3.5.3 Selección de los grupos mayores de suelo más aptos para recibir lodos

Para minimizar la asimilación de metales por los cultivos es aconsejable que los suelos tratados con lodo sean mantenidos en un pH de 6.5 o más. Al menos un repaso de la literatura sobre cómo influencia el pH del suelo la asimilación de metales, indica que la recomendación de un pH de 6.5 debe ser considerada para la cadena alimenticia de los suelos agrícolas, basado sobre reportes que indican un adecuado control de la asimilación de metales a un pH de 6.0 (Sommers *et al.*, 1987).

Los suelos del área de estudio tienen un pH de 7.9 a 8.3, el cual es debido en gran parte al alto contenido de carbonato de calcio que tienen dichos suelos, este pH natural que presentan los suelos favorece a la aplicación del lodo ya que minimiza la posibilidad de que las plantas asimilen metales del suelo (excepto Mo). Cuadro 4-45

El molibdeno a diferencia de los demás metales pesados se hace más disponible para las plantas a medida que sube el pH del suelo, éste puede representar un peligro para los animales que comen pastos sobre los terrenos enmendados con lodo, el ganado que come forraje con exceso de Mo puede desarrollar severos casos de diarrea. El Mo afecta también el metabolismo del Cu, por ejemplo, los animales que se alimentan con pasto de bajo contenido de Mo pueden desarrollar toxicidad de Cu, si los niveles de Cu son lo suficientemente alto. Por otro lado, los animales que comen pasto con un alto contenido de Mo pueden desarrollar deficiencia de Cu, dando lugar a la enfermedad denominada “molibdenosis”.

El límite máximo acumulativo en el suelo que estableció EPA en la evaluación de riesgos para el Mo, está basado para los animales que comen forraje con altos contenidos de Mo y que crecen sobre terrenos que facilitan la asimilación del Mo. Por lo tanto, en los suelos del área de estudio debe cuidarse que la concentración del Mo en el suelo no exceda el recomendado por EPA.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos del área de estudio en general están dentro de los rangos recomendados, a mayor CIC habrá más retención de cationes en el suelo, La CIC, está relacionada con la textura y el contenido de materia orgánica del suelo. Un suelo que tiene un alto contenido de arcillas puede retener más cationes intercambiables que un suelo con bajo contenido de arcillas, la CIC se incrementa también a medida que la materia orgánica se incrementa. Los minerales arcillosos tienen una CIC que generalmente varía entre los 10 y 150 meq/100g. La materia orgánica tiene valores que van de 200 a 400 meq/100g. Por lo tanto, es poco probable que exista una lixiviación de los metales agregados con el lodo, ya que la materia orgánica contenida en el lodo ayudará a aumentar la CIC y disminuir el potencial de lixiviación de metales en los suelos. Cuadro 4-45.

La profundidad de los grupos mayores de suelo: Calcisoles, Castañozems y Vertisoles, son los más recomendados para recibir aplicaciones de lodo. Un suelo con poca profundidad y un drenaje pobre restringirá el movimiento del agua superficial, el cual puede monticular el agua en la superficie del suelo y ocasionar escurrimientos superficiales. Los grupos mayores de suelo: Fluvisol, Leptosol y Regosol tienen profundidades no recomendables para recibir lodo, por lo tanto, debe evitarse aplicar lodo sobre estos suelos. Cuadro 4-45.

Los suelos con textura arenosa o arcillosa generalmente se les da poca prioridad cuando se pretende seleccionar terrenos para la aplicación de lodo, a los suelos con textura franco o migajón arenoso generalmente se les da mayor importancia para la aplicación de lodo. Los suelos del área de estudio por lo general tienen una textura migajón arcilloso, dicha textura puede recomendarse para recibir lodos, ya que se encuentra en un termino medio y por lo general estos suelos no van a tener problemas severos de drenaje. Los Vertisoles son los suelos más arcillosos del área de estudio, por lo tanto, el lodo deshidratado sería el más recomendado para aplicarse sobre estos terrenos, ya que no se tendrían encharcamientos y escurrimientos superficiales que si se aplicara lodo líquido. Cuadro 4-45.

La conductividad eléctrica es de suma importancia, sobre todo en aquellos suelos que se encuentran sobre climas secos o precipitaciones escasas, altos niveles de sal en los suelos puede limitar la aplicación del lodo, si éste también tiene altos contenidos de sal, un suelo con altas concentraciones, limita el crecimiento de los cultivos, debido a que las plantas no pueden absorber una cantidad suficiente de agua para funcionar adecuadamente. En general, los suelos del área de estudio tienen una C.E. de <4 mmhos/cm, los cuales son considerados como normales o no salinos y no tienen restricciones cuando se les aplica lodo (sin exceso de sal). Una pequeña parte de los suelos Calcisoles situados al este del área de estudio tienen suelos ligeramente salinos, por lo tanto, debe tenerse cuidado de no aplicar lodo con altos niveles de sal sobre estos suelos y en general en todos los suelos, para evitar que la salinidad de los suelos aumente considerablemente e impida el óptimo desarrollo de los cultivos. Cuadro 4-45.

Los suelos clasificados como (1) muy escasamente drenados, (2) escasamente drenados, deben dárseles pocas prioridades ya que pueden ocasionar encharcamientos o escurrimientos superficiales indeseables cuando se les aplica lodo líquido, el lodo ideal para estos suelos sería el deshidratado, ya que tiene menos volumen de agua. Los suelos del área de estudio en general tienen drenajes ideales (drenado-muy drenado) para la aplicación del lodo líquido y deshidratado, los cuales tendrán menos potencial para provocar encharcamientos o escurrimientos superficiales. Cuadro 4-45.

Las aguas subterráneas del área de estudio por lo general están a una profundidad mayor de 10 m, dicha profundidad disminuye el riesgo de una contaminación de las aguas subterráneas, ya que es poco probable que los metales o microorganismos se lixivien a esas profundidades. De cualquier modo debe evitarse aplicar el lodo sobre los suelos que tienen poca profundidad (Leptosoles y Regosoles) ya que por lo general estos suelos están sobre materiales consolidados, los cuales pueden tener fracturas o un grado de cementación muy pobre que faciliten la lixiviación de contaminantes y ocasionen una contaminación de las aguas subterráneas. Cuadro 4-45.

Los Leptosoles y Regosoles son los grupos mayores de suelos que tienen las pendientes menos ideales, dichos suelos tienen pendientes que van del 6 al 15%. La pendiente de estos suelos es debido en gran parte a que se localizan en los lomeríos del área de estudio. Los demás grupos de suelo se encuentran sobre terrenos planos o casi planos y tienen pendientes menores del 6%. A mayor pendiente se aumenta el potencial de escurrimiento superficial y el requerimiento de equipo especial para aplicar los lodos (inyectado). Cuadro 4-45.

En base a los parámetros antes mencionados y al Cuadro 4-45, los grupos mayores de suelo más recomendados para recibir aplicaciones de lodo son: Calcisol, Castañozem y Vertisol. Los Leptosoles y Regosoles no son recomendados debido principalmente a su profundidad, pendiente y material geológico. Al aplicarse el lodo sobre los Fluvisoles se tendría el riesgo de contaminar las aguas superficiales, ya que por lo general estos suelos se localizan en las orillas de los ríos, por lo tanto no son recomendados para recibir lodos.

4.3.6 Cultivo

Se reportan dos ciclos agrícolas en el área de estudio que son el Primavera-Verano y el Otoño-Invierno. En el ciclo agrícola Otoño-Invierno 1997/1998, se sembraron 5,770 ha de cultivos bajo riego, principalmente trigo de grano (5,240 ha), avena forrajera (310 ha) y cebada forrajera (220 ha). De las 5,770 ha que se sembraron con cultivos, 5,140 ha fueron en el municipio de Pesquería; 540 ha en Apodaca; 50 ha en Marín y 40 ha en General Zuazua. Cuadro 4-46.

En el ciclo agrícola Primavera-Verano, se sembraron 3,300 ha de cultivos de las cuales 3,246 ha son de riego y 54 ha son de temporal. Cuadros 4-47 y 48. Sembrándose principalmente sorgo de grano (1,660 ha), sorgo forrajero (1,394 ha), maíz de grano (102 ha), maíz forrajero (80 ha), frijol (45 ha) y calabaza (4 ha). De las 3,300 ha que se sembraron con cultivos 2,674 ha se sembraron en el municipio de Pesquería; 522 ha en Apodaca; 100 ha en General Zuazua y 4 ha en Marín.

Cuadro 4-45. Principales parámetros para la selección de los grupos mayores de suelos y rangos recomendados.

PARAMETRO	GRUPO MAYOR DE SUELO						GRADO DE LIMITACION		
	CALCISOL	CASTAÑOZEM	FLUVISOL	LEPTOSOL	REGOSOL	VERTISOL	NULA	MODERADA	SEVERA
pH	8.0-8.3	8.0-8.3	7.9-8.2	8.0-8.3	8.2-8.4	7.9-8.3	>6.5	5.0-6.5	<5.0
C.I.C. (meq/100g)	17.5-27	11-26	13-17	16-24	17.5-22.5	17-27	>15	5-15	<5
Profundidad a la roca o material cementado (cm)	60-120	100-125	50-90	<25	12-70	60-120	>100	50-100	<50
Textura	*Migajón arenoso -arcilloso	*Migajón arcilloso *Arcilloso	*Migajón arcilloso	*Migajón arcilloso	*Migajón arcilloso *Franco	*Arcilloso	-	-	-
C.E. (mmhos/cm)	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	4-8	>8
Drenaje interno	4 -5	4 -5	4-6	4	4 -5	3	4 , 5 y 6	3	1, 2
Profundidad al agua subterránea (m)	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>1.5	0.6-1.5	<0.6
Pendiente	<6%	<6%	<6%	6-15%	6-15%	<6%	<6%	6-12%	>12%

- Dato no disponible.

1 muy escasamente drenado; 2 escasamente drenado; 3 moderadamente drenado; 4 drenado; 5 muy drenado; excesivamente drenados.

Cuadro 4-46. Superficies sembradas con cultivos bajo riego durante el ciclo agrícola otoño- invierno 97/98.

Cultivo	Superficie sembrada por municipio (ha)				Superficie sembrada por cultivo (ha)
	Apodaca	G. Zuazua	Marín	Pesquería	
Avena forrajera	240	40	30	0	310
Cebada forrajera	220	0	0	0	220
Trigo grano	80	0	20	5,140	5,240
Total por municipio	540	40	50	5,140	
Total:	5,770				

Cuadro 4-47. Superficies sembradas con cultivos bajo riego durante el ciclo agrícola Primavera-Verano 98/98

Cultivo	Superficie sembrada (ha)				Superficie sembrada por cultivo (ha)
	Apodaca	G. Zuazua	Marín	Pesquería	
Frijol	0	0	0	25	25
Maíz forrajero	35	0	0	45	80
Maíz grano	0	0	2	100	102
Sorgo forrajero	472	70	2	820	1,364
Sorgo grano	0	0	0	1,660	1,660
Soya	15	0	0	0	15
Total por municipio	522	70	4	2,650	
Total:	3,246				

Cuadro 4-48. Superficies sembradas con cultivos bajo temporal durante el ciclo agrícola Primavera-Verano 98/98.

Cultivo	Superficie sembrada (ha)				Superficie sembrada por cultivo (ha)
	Apodaca	G. Zuazua	Marín	Pesquería	
Calabaza	0	0	0	4	4
Frijol	0	0	0	20	20
Sorgo forrajero	0	30	0	0	30
Total por municipio	0	30	0	24	
Total:	54				

Los lodos generados en las plantas de tratamiento Noreste muy posiblemente serán lodos Clase B, debido al método de digestión que éstos reciben. Por lo tanto, los cultivos que más se recomendarían al aplicarse dichos lodos ya sea como fuente de N, P o como mejoradores de suelo serían: maíz, sorgo, trigo, avena y cebada, debido a que las partes comestibles o de interés no estarán en contacto directo con el suelo, lo cual reduce el potencial de contaminación por microorganismos, metales pesados y químicos orgánicos. Además al utilizar los sistemas de producción ya existentes sería una ventaja, ya que dichos

cultivos se han producido en el área de estudio debido a las condiciones del suelo, clima y económicas, principalmente.

En el área de estudio, la aplicación de los lodos a los suelos agrícolas puede ser factible casi todo el año, ya que generalmente se presentan dos ciclos agrícolas durante un mismo año, además los cultivos favorables para utilizarse con lodos Clase B se producen en ambos ciclos agrícolas.

4.4 Cuarta Etapa

Estimación de: nutrientes y materia orgánica contenidos en el lodo, dosis de aplicación, superficie requerida para aplicar los lodos y número de años que puede utilizarse el lodo de la planta Noreste como suplemento parcial de fertilizantes.

4.4.1 Nutrientes y materia orgánica contenidos en el lodo de la planta Noreste

En el Cuadro 4-49 se presentan los valores reportados para nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica (MO) contenidos en el lodo de la planta Noreste.

Las concentraciones reportadas para nitrógeno están expresadas en cantidades totales; es decir, incluye formas inorgánicas (NH_4^+ y NO_3^-) y orgánicas. Las plantas absorben la mayoría del nitrógeno en forma de iones de amonio (NH_4^+) o nitrato (NO_3^-), por lo tanto, no todo el nitrógeno contenido en los lodos estará disponible para las plantas en forma inmediata, debido a que el N orgánico puede llegar a constituir hasta el 80% del N total y tiene que descomponerse o mineralizarse a formas inorgánicas para que pueda estar disponibles para las plantas.

El contenido de nitrógeno total reportado para la planta Noreste es menor que el fosfato monoamónico (MAP), el cual es un fertilizante comercial que tiene un contenido de nitrógeno muy bajo. Cuadro 4-49.

En los análisis realizados en marzo y mayo de 1997 el contenido de fósforo fue de 2.6% en ambos casos y para el potasio de 0.4 y 0.5 respectivamente. El contenido de fósforo en los fertilizantes se expresa como equivalente de P_2O_5 , y del potasio como K_2O a pesar de que no existen como tal en los fertilizantes. La designación del P_2O_5 y K_2O es una expresión convencional estándar del contenido relativo del P y K. En el Cuadro 4-49 se presentan los valores del P y K convertidos a P_2O_5 y K_2O .

Los valores de fósforo reportados para el lodo de la planta Noreste son menores a los del super fosfato simple, el cual es un fertilizante comercial que tiene una concentración baja de fósforo. Cuadro 4-49.

Los valores de potasio reportados para el lodo de la planta Noreste son menores a los del sulfato de potasio y magnesio, el cual comparado con otras fuentes de potasio tiene un contenido bajo de potasio que es de aproximadamente 22% de K_2O . Cuadro 4-49.

El Contenido de materia orgánica en el lodo es de aproximadamente 60%, este contenido de MO es de gran valor teniendo en cuenta que mejora las propiedades químicas y físicas de los suelos.

Cuadro 4-49. Contenido de nutrientes y MO en el lodo de la planta Noreste versus nutrientes contenidos en fertilizantes comerciales¹.

	% de nutrientes (peso seco)							
	Nitrógeno total		Fósforo - $P_2O_5^*$		Potasio - K_2O^*		MO	
	3/24/97	5/16/97	3/24/97	5/16/97	3/24/97	5/16/97	3/24/97	5/16/97
Noreste	5.2	5.2	5.95	5.95	0.48	0.6	60	61
MAP	11% de N inorg.		52					
SFS			20					
Sulfato de P y Mg					22			

¹ Resultados de muestras de lodo tomadas el 24 de marzo de 1997 y el 16 de mayo de 1997.

* Valores calculados.

4.4.2 Estimación de la mineralización del nitrógeno orgánico

No todo el nitrógeno contenido en el lodo está disponible inmediatamente para las plantas, ya que algunos están presentes como N orgánico, en tejidos de células microbianas y en otros compuestos orgánicos. El N orgánico deberá descomponerse a formas minerales

o inorgánicas, tales como NH_4 y NO_3 , antes de que pueda ser usado por las plantas. Por lo tanto, la disponibilidad del N orgánico para las plantas depende de la descomposición microbiana de los materiales orgánicos en el suelo (EPA, 1995a).

La porción del N orgánico del lodo que es mineralizado en un suelo depende de varios factores, los cuales influyen la inmovilización y mineralización de las formas orgánicas del N (Sommers and Giordano, 1984).

La disponibilidad del N orgánico del lodo depende del tipo de tratamiento o estabilización que recibió el lodo. El lodo digerido anaerobicamente normalmente tendrá altos niveles de NH_4 y muy poco NO_3 , mientras el lodo digerido aerobicamente tendrá altos niveles de NO_3 por comparación. El composteo y la digestión anaerobia realizan grandes estabilizaciones de los componentes de carbón orgánico que la digestión aeróbica o activación de residuos. A mayor la estabilización, menor es el factor de mineralización de los compuestos de carbono (conteniendo formas orgánicas el lodo) y menores las cantidades de N orgánico liberado para las plantas (EPA. 1995a).

En general, la mineralización del N orgánico dependerá principalmente de la composición del N orgánico, tipo y grado del tratamiento o estabilización del lodo, condiciones climáticas (temperatura y precipitación), condiciones del suelo y actividad microbiana en el suelo.

Sommers *et al.* (1981), propone factores de mineralización del N orgánico para diferentes tipos de lodo, los cuales muestran un promedio de mineralización del primero al cuarto año siguiendo una aplicación de lodo.

En el Cuadro 4-50 se presentan los valores estimados del nitrógeno orgánico que se mineralizará para una aplicación de lodo por cada tonelada (peso seco) que se aplique por ha. Dichos valores fueron estimados de acuerdo a los factores de mineralización propuestos por Sommers *et al.* (1981), considerando un contenido promedio de NO en el lodo de 3.6% (en base peso seco) y de acuerdo a los resultados de las muestras de lodo tomadas el 24 de marzo y el 16 de mayo de 1997.

Esos valores, de cualquier modo, son sólo estimaciones y pueden variar significativamente debido a los factores que intervienen en la mineralización del N orgánico, mencionados anteriormente.

Cuadro 4-50. Estimación del nitrógeno mineralizado del N orgánico en diferentes años de producción por cada tonelada de lodo que se aplique al suelo por ha.

Año del ciclo producción	NO Inicial (kg/ha)	Factor de mineralización (K_{min})*	NO mineralizado (kg/ha)	NO Restante (kg/ha)
0-1 (año de la aplicación)	36	0.30	10.8	25.2
1-2	25.2	0.15	3.8	21.4
2-3	21.4	0.08	1.7	19.7
3-4	19.7	0.04	0.8	18.9

* Adaptado de Sommers et al, 1981

4.4.3 Estimación del nitrógeno disponible

El N disponible para las plantas (ND) suministrado por el lodo comprende principalmente el NH_4 , NO_3 y el N orgánico mineralizado en un período de tiempo.

El NH_4 y el NO_3 agregados por el lodo son considerados disponibles para las plantas para utilizarse como NH_4 y NO_3 , semejante a los agregados por las sales de los fertilizantes u otras fuentes de esas formas mineralizadas del N.

La cantidad de ND será afectada por la cantidad de NH_4 perdida por la volatilización del amoníaco (NH_3). Las pérdidas de volatilización del amoníaco, cuando estiércol de animal o lodo es aplicado al suelo, han sido reconocidas (Terman, 1979; Vallis *et al.*, 1982). Actualmente estimar el grado de esta pérdida es difícil, de cualquier modo, la variabilidad en las condiciones climáticas dictan que tan rápido ocurre la volatilización.

Además de las condiciones climáticas, el método de aplicación del lodo, el período de tiempo en que el lodo permanece sobre la superficie del suelo previo a la incorporación y el pH del lodo (conteniendo cal), también influenciarán el potencial de pérdidas por volatilización. Un pH alto en el lodo o suelo facilitará la conversión de NH_4 a NH_3 ,

resultando en una pérdida de N a la atmósfera. Entre más tiempo permanezca el lodo en la superficie del suelo y esté sujeto a condiciones secas, mayor es el riesgo de pérdidas de volatilización del NH_3 .

Con la inyección del lodo líquido, poco NH_3 deberá perderse por volatilización, excepto posiblemente sobre suelos de textura arenosa. Las pérdidas por volatilización, de cualquier modo, deberán considerarse para el lodo líquido aplicado superficialmente y que es incorporado después y para el lodo deshidratado aplicado superficialmente y que es incorporado posteriormente o permanece sobre la superficie.

En el Cuadro 4-51 se presentan los valores estimados del ND considerando el tipo de lodo y el método de aplicación, así como los factores de volatilización recomendados por EPA (1995a) para los diferentes métodos de aplicación de lodo.

Cuadro 4-51. Estimación del ND considerando pérdidas de NH_4 como NH_3 debido a los tipos de lodo y métodos de aplicación (kg/ton de lodo peso seco) [†].

Tipo de lodo y Método de aplicación	Factor de vol. del NH_3 *	NH_4	NO_3	NO min.	NH_4 perdido como NH_3	ND
Líquido e inyectado	1.0	15.5	0.5	10.8	0	26.8
Líquido y aplicado superficialmente	0.50	15.5	0.5	10.8	7.75	19.1
Deshidratado y aplicado superficialmente	0.50	14.7	0.2	10.8	7.35	18.35

[†] Estimado a partir de los resultados para N de las muestras de lodo tomadas el 24 de marzo de 1997 y el 16 de mayo de 1997.

* Adaptado de EPA, 1995a.

NO min: nitrógeno orgánico mineralizado para el primer año (estimado).

Los valores de los factores de volatilización presentados en el Cuadro 4-51 pueden no ser los más adecuados para un determinado lugar, pero se toman como referencia para dar una idea de las pérdidas de NH_4 como NH_3 , que se presentan con los diferentes tipos y métodos de aplicación de los lodos.

4.4.4 Estimación del fósforo disponible

Los resultados del P total reportados para las muestras de lodo tomadas el 24 de marzo y el 16 de mayo de 1997 indican que este lodo tuvo una concentración de 2.6% de P

total, por lo tanto su equivalente como P_2O_5 fue de 5.95%. Cuadro 4-49. Considerando los criterios de EPA (1995a), para estimar el P disponible para las plantas en los lodos, se obtuvo que la cantidad de fósforo que puede llegar a estar disponible para las plantas en dicho lodo es de 29.75 kg P_2O_5 /ton de lodo (peso seco).

4.4.5 Estimación del potasio disponible

De acuerdo a los resultados del K total reportados para las muestras de lodo tomadas el 24 de marzo y el 16 de mayo de 1997, se estima que el lodo contiene aproximadamente 5.4 kg K_2O /ton de lodo base peso seco. A diferencia del nitrógeno y el potasio se estima que todo el potasio puede estar disponible para las plantas durante el año de la aplicación, debido a que es fácilmente soluble.

Debido a que éste es un nutriente soluble, la mayoría del K recibido por las plantas de tratamiento es descargado con los efluentes. Por consiguiente, el lodo contendrá bajas concentraciones de este nutriente comparado con los niveles de N y P que pueden obtenerse en los lodos.

4.4.6 Contenido de N, P y K disponibles para las plantas y MO

En el Cuadro 4-52 se presentan los valores del N, P y K que estarán disponibles para las plantas por tonelada base peso seco, según el tipo de lodo, método de aplicación y considerando los análisis realizados el 24 de marzo y el 16 de mayo de 1997.

Cuadro 4-52. N, P, K disponibles por tonelada de lodo (kg/ton de lodo peso seco).

Tipo de lodo y Método de aplicación	ND	P_2O_5	K_2O	MO
Líquido e inyectado	26.8	29.75	5.4	600
Líquido y aplicado superficialmente	19.1	29.75	5.4	600
Deshidratado y aplicado superficialmente	18.35	29.75	5.4	600

Los valores presentados anteriormente pueden variar significativamente en el tiempo ya que el contenido de N, P, K y MO en el lodo dependen de muchos aspectos como: naturaleza y origen del agua residual, parámetros utilizados en los procesos de tratamiento del agua y lodo residual, fecha y modo de muestreo, métodos de análisis, etc.

Lo más ideal es muestrear el lodo que se piensa aplicar al suelo lo más cercano posible a la fecha de aplicación para que los valores obtenidos tanto de nutrientes como de microorganismos, metales y químicos orgánicos sean más exactos.

4.4.7 Estimación de las dosis de aplicación de lodo en base a nitrógeno y superficie de suelo que se requeriría para aplicar los lodos generados en un año en la planta Noreste

Con el fin de evitar una contaminación a corto plazo de los suelos por las grandes aplicaciones de lodo que se realizan sin un control sobre éstos, EPA recomienda aplicar el lodo a los suelos en función de las demandas o recomendaciones de N de los cultivos.

Considerando que anualmente esta planta producirá aproximadamente 3,650 ton base peso seco (10 ton/día), tipo de cultivo, demanda o recomendación de N, método de aplicación del lodo y que los valores del ND presentados en los Cuadros 4-51 y 52 permanecerían constantes durante el año, en el Cuadro 4-53 se presentan las estimaciones de las dosis de aplicación de lodo, así como la superficie necesaria para aplicar todos los lodos generados durante un año en la planta Noreste.

Puede apreciarse que a mayor nitrógeno requerido o recomendado disminuyen los requerimientos de superficie, por lo tanto, es recomendable utilizar el lodo sobre los cultivos que requieren más N, para evitar grandes costo en el transporte del lodo hacia los campos.

A mayor nitrógeno disponible en el lodo, reducirá la concentración de metales, químicos orgánicos sintéticos y microorganismos aplicados con el lodo al suelo, ya que se reduce la cantidad de lodo que se tendría que aplicar al suelo para satisfacer las demandas

de N de los cultivos. Por lo tanto, es fundamental determinar las cantidades de ND en el lodo para evitar aplicaciones excesivas de lodo, que puedan impactar negativamente el suelo, cultivo y en general al medio ambiente.

Cuadro 4-53. Estimación de las dosis de aplicación de lodo y superficie necesaria para aplicar los lodos generados en un año, considerando: cultivo, demanda de N y método de aplicación del lodo.*

Cultivo	Produc. promedio ton/ha	Demanda de N kg/ka	Dosis de aplicación de lodo ton/ha (peso seco)			Superficie de suelo requerida ha/año		
			Lodo Liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.	Lodo Liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.
Avena F.	8	65	2.4	3.4	3.5	1,505	1,073	1,030
Cebada G.	3.5	75	2.8	3.9	4.1	1,304	930	893
Maíz G.	5	120	4.5	6.3	6.5	815	581	558
Maíz F.	12	160	6.0	8.4	8.7	611	436	419
Sorgo F.	12	140	5.2	7.3	7.6	699	498	478
Sorgo G.	7	115	4.3	6.0	6.3	851	606	582
Trigo G.	4	110	4.1	5.8	6.0	889	634	609

* En base a los valores de ND calculados en el Cuadro 4-51.

4.4.8 Estimación de la máxima carga de lodo que se puede aplicar por unidad de superficie en base al contenido de metales pesados en los suelos del área de estudio

Debido a que en el área de estudio existen suelos que tienen sólo el metal que se originó de forma natural debido a la formación del suelo (Marín-Zuazua) y suelos que han recibido metales adicionales (Agua Fría, Dulces Nombres y Santa Rosa), las estimaciones de las máximas cargas de lodo por unidad de superficie van a variar de un suelo a otro. Por lo tanto, para determinar la máxima carga de lodo que puede aplicarse por unidad de superficie sobre los suelos de Marín-Zuazua se utilizaron los límites máximos acumulables para metales de EPA.

Para Agua Fría, Dulces Nombres y Santa Rosa se utilizaron los límites máximos acumulativos que se estimaron para estos suelos (Cuadro 4-44), dichos valores puede que no sean representativos para cierto terreno (regado anteriormente con aguas residuales), por lo tanto, es recomendable realizar análisis a esto lugares y utilizar dichos valores en el cálculo.

De acuerdo a lo anterior y considerando el promedio de los metales contenidos en el lodo de los análisis realizado el 24 de marzo y el 16 de mayo de 1997 y que dichos valores serán constantes en el tiempo, en el Cuadro 4-54 se presenta la estimación de la máxima cantidad de lodo que se permitirá aplicar por ha para los dos tipos de suelo.

El valor estimado para el plomo en ambos casos nos indica la máxima cantidad de lodo que se debe aplicar por hectárea, ya que con éste se alcanza el límite de contaminante más problemático. Por lo tanto, la máxima cantidad de lodo que se debe aplicar por ha de acuerdo a los criterios antes mencionados a los suelos de Marín-Zuazua y de Agua Fría-Dulces Nombres-Santa Rosa será de: 1,313 y 1,236 ton/ha respectivamente.

Cuadro 4-54. Estimación de la máxima carga de lodo para los suelos del área de estudio en base a los límites máximos acumulativos para metales.

Concentración de metal en el lodo mg/kg (peso seco) ¹		Límites máximos acumulativos de EPA utilizados para Marín-Zuazua (kg/ha)	Límites máximos acumulativos estimados para los suelos de A-D-S ²	Cantidad máxima de lodo ton/ha (peso seco)	
				Marín-Zuazua	A-D-S ²
As	2.7	41	31.4	15,185	11,615
Cd	4.8	39	39.0	8,125	8,117
Cr	153	?3,000	2,923.1	19,608	19,105
Cu	175	1,500	1,459.5	8,571	8,340
Hg	2.9	17	16.8	5,862	5,807
Mo	4.5	?18	16.9	4,000	3,764
Ni	25.5	420	376.1	16,471	14,747
Pb	228.5	300	282.4	1,313*	1,236*
Se	5.5	100	99.2	18,182	18,033
Zn	1,975	2,800	2,573.1	1,418	1,303

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

² Marín-Dulces Nombres-Santa Rosa.

? Están siendo investigados por EPA.

* Valor crítico.

EPA recomienda llevar un control de los metales que son agregados con el lodo en cada aplicación. Dicho control consiste en sumar los metales que son agregados en cada aplicación para suspender la aplicación del lodo cuando un límite máximo acumulativo sea alcanzado. En el Cuadro 4-55a y 55b se muestran las cantidades de cada metal que se agregarían al suelo en cada aplicación de lodo de acuerdo al cultivo, dosis y método de aplicación.

Cuadro 4-55a. Cantidades de metales pesados agregados por el lodo de acuerdo al cultivo, dosis y método de aplicación.

Metal	Conc. en el lodo	Avena Forrajera			Cebada Grano			Maíz Grano			Maíz Forraje		
		Dosis de lodo estimada Ton/ha (peso seco)			Dosis de lodo estimada Ton/ha (peso seco)			Dosis de lodo estimada Ton/ha (peso seco)			Dosis de lodo estimada Ton/ha (peso seco)		
		Lodo Liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.	Lodo Liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.	Lodo Liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.	Lodo Liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.
		2.40	3.4	3.5	2.8	3.9	4.1	4.5	6.3	6.5	6.0	8.4	8.7
	mg/kg	g/ha			g/ha			g/ha			g/ha		
As	2.7	6.5	9.2	9.5	7.6	10.5	11.1	12.2	17.0	17.6	16.2	22.7	23.5
Cd	4.8	11.5	16.3	16.8	13.4	18.7	19.7	21.6	30.2	31.2	28.8	40.3	41.8
Cr	153	367.2	520.2	535.5	428.4	596.7	627.3	688.5	963.9	994.5	918.0	1,285.2	1,331.1
Cu	175	420.0	595.0	612.5	490.0	682.5	717.5	787.5	1,102.5	1,137.5	1,050.0	1,470.0	1,522.5
Pb	228.5	548.4	776.9	799.8	639.8	891.2	936.9	1,028.3	1,439.6	1,485.3	1,371.0	1,919.4	1,988.0
Hg	2.9	7.0	9.9	10.2	8.1	11.3	11.9	13.1	18.3	18.9	17.4	24.4	25.2
Mo	4.5	10.8	15.3	15.8	12.6	17.6	18.5	20.3	28.4	29.3	27.0	37.8	39.2
Ni	25.5	61.2	86.7	89.3	71.4	99.5	104.6	114.8	160.7	165.8	153.0	214.2	221.9
Se	5.5	13.2	18.7	19.3	15.4	21.5	22.6	24.8	34.7	35.8	33.0	46.2	47.9
Zn	1,975	4,740.0	6,715.0	6,912.5	5,530.0	7,702.5	8,097.5	8,887.5	12,442.5	12,837.5	11,850.0	16,590.0	17,182.5

Cuadro 4-55b. Cantidades de metales pesados agregados por el lodo de acuerdo al cultivo, dosis y método de aplicación.

Metal	Conc. en el lodo	Sorgo Forrajero			Sorgo Grano			Trigo Grano		
		Dosis de lodo estimada Ton/ha (peso seco)			Dosis de lodo estimada Ton/ha (peso seco)			Dosis de lodo estimada Ton/ha (peso seco)		
		Lodo Liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.	Lodo Liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.	Lodo Liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.
		5.2	7.3	7.6	4.3	6.0	6.3	4.1	5.8	6
	mg/kg	g/ha			g/ha			g/ha		
As	2.7	14.0	19.7	20.5	11.6	16.2	17.0	11.1	15.7	16.2
Cd	4.8	25.0	35.0	36.5	20.6	28.8	30.2	19.7	27.8	28.8
Cr	153	795.6	1,116.9	1,162.8	657.9	918.0	963.9	627.3	887.4	918.0
Cu	175	910.0	1,277.5	1,330.0	752.5	1,050.0	1,102.5	717.5	1,015.0	1,050.0
Pb	228.5	1,188.2	1,668.1	1,736.6	982.6	1,371.0	1,439.6	936.9	1,325.3	1,371.0
Hg	2.9	15.1	21.2	22.0	12.5	17.4	18.3	11.9	16.8	17.4
Mo	4.5	23.4	32.9	34.2	19.4	27.0	28.4	18.5	26.1	27.0
Ni	25.5	132.6	186.2	193.8	109.7	153.0	160.7	104.6	147.9	153.0
Se	5.5	28.6	40.2	41.8	23.7	33.0	34.7	22.6	31.9	33.0
Zn	1,975	10,270.0	14,417.5	15,010.0	8,492.5	11,850.0	12,442.5	8,097.5	11,455.0	11,850.0

4.4.9 Número de años que puede utilizarse el lodo como suplemento parcial de fertilizantes en el área de estudio

El número de años útiles que puede utilizarse el lodo como suplemento parcial de fertilizantes estará en función de varios aspectos, tales como: metales contenidos en el lodo y suelo, dosis de aplicación, máxima carga de lodo que puede aplicarse por unidad de superficie y frecuencia de aplicación.

En el Cuadro 4-56 se muestra el número de años que puede utilizarse el lodo en los suelos de Marín-Zuazua y en el Cuadro 4-57 para los suelos de Agua Fría, Dulces Nombres y Santa Rosa. Dichos valores fueron estimados de acuerdo al tipo de cultivo, método y dosis de aplicación, máxima carga de lodo por unidad de superficie y que la aplicación será cada año.

Puede apreciarse que a mayor dosis de aplicación será menor el número de años que podrá utilizarse, ya que a mayor dosis de aplicación se aplican más metales en el suelo y por consecuente se llega más rápido a los límites recomendados. También a mayor N contenido en el lodo mayor será el número de años útiles, ya que se aplica menos lodo y por consecuente menos metales.

Cuadro 4-56. Número de años útiles para los suelos de Marín-Zuazua de acuerdo al tipo de cultivo, dosis y método de aplicación y máxima carga de lodo.

Cultivo	Produc. promedio ton/ha	Demanda de N kg/ka	Dosis de aplicación de lodo ton/ha (peso seco)			Número de años útiles		
			Lodo liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.	Lodo liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.
Avena F.	8	65	2.4	3.4	3.5	547	386	375
Cebada G.	3.5	75	2.8	3.9	4.1	469	337	320
Maíz G.	5	120	4.5	6.3	6.5	292	208	202
Maíz F.	12	160	6.0	8.4	8.7	219	156	151
Sorgo F.	12	140	5.2	7.3	7.6	253	180	173
Sorgo G.	7	115	4.3	6.0	6.3	305	219	208
Trigo G.	4	110	4.1	5.8	6.0	320	226	219

Cuadro 4-57. Número de años útiles para los suelos de Agua Fría, Dulces Nombres y Santa Rosa de acuerdo al tipo de cultivo, dosis y método de aplicación y máxima carga de lodo.

Cultivo	Produc. promedio ton/ha	Demanda de N kg/ka	Dosis de aplicación de lodo ton/ha (peso seco)			Número de años útiles		
			Lodo Liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.	Lodo Liq. inyectado	Lodo liq. Aplicado Sup.	Lodo desh. Aplicado Sup.
Avena F.	8	65	2.4	3.4	3.5	515	364	353
Cebada G.	3.5	75	2.8	3.9	4.1	441	317	301
Maíz G.	5	120	4.5	6.3	6.5	275	196	190
Maíz F.	12	160	6.0	8.4	8.7	206	147	142
Sorgo F.	12	140	5.2	7.3	7.6	238	169	163
Sorgo G.	7	115	4.3	6.0	6.3	287	206	196
Trigo G.	4	110	4.1	5.8	6.0	301	213	206

Los valores presentados en los Cuadros 4-56 y 4-57 lógicamente pueden aumentar o disminuir, pero todo dependerá principalmente del contenido de metales en el lodo, ya que éstos por lo general determinarán el uso del lodo.

4.5 Quinta etapa

Análisis económico para determinar el posible ahorro económico con el uso del lodo como suplemento parcial de fertilizantes o mejorador de suelos, en los procesos de tratamiento y disposición del lodo, así como en los costos derivados por el uso de fertilizantes comerciales usados en la producción de los cultivos en el área de estudio.

4.5.1 Posible ahorro en los costos del tratamiento y disposición de lodos

En el Cuadro 4-58 se presentan los principales costos por año de los procesos de tratamiento y disposición del lodo. Los costos de los procesos de tratamiento del lodo incluyen el espesamiento (primario y secundario), digestión, deshidratación y operación.

En la disposición del lodo la cual consiste en confinar el lodo en un relleno sanitario, se consideran los costos ocasionados por el transporte y confinamiento del lodo.

Cuadro 4-58. Costo de los procesos de tratamiento y disposición del lodo.*

Tratamiento	Producción	Costo unitario \$	Costos por año \$
Espesamiento de lodos			
- Espesador de lodos primarios (El espesado es por gravedad)	180m ³ /día al 2%	\$ 0.16/ m ³	10,512
- Espesador de lodos secundarios (Se dosifica polímero al 20% a razón de 3 p.p.m.) Costo de polímero en emulsión : \$10/kg	900 m ³ /día al 1.5%	\$ 0.17 /m ³	55,845
Digestión de lodos (tiempo de residencia 47 días)	700 m ³ /día al 3.0% (21 ton/día, peso seco)	\$ 3.0/ m ³	766,500
- El costo es Energía eléctrica 50% - El costo es Mantenimiento 50%			
Deshidratación (se dosifica polímero base sólido, preparado en una solución al 0.3%)	50 m ³ /día al 20% (10 ton/día, peso seco)	\$ 64.12/ m ³	1,170,119
- El consumo de polímero es de 5kg/tonelada de lodo base seca) - El costo de las telas filtrantes es de 5,000 dils y se cambian cada 4 meses			
Transporte (15 km)	10 ton/día	\$ 40/ton	146,000
Confinamiento	10 ton/día	\$ 164/ton	598,600
Operador		\$ 3,500/mes	42,000
Costo total			2,789,576

* Fuente: ATLATEC Chihuahua (costos correspondientes al primer trimestre de 1999).

Del cuadro anterior se puede decir que los costos mayores se producen en la deshidratación, digestión y confinamiento. Los costos menores comprenden al operador, espesamiento y transporte del lodo.

En Cuadro 4-59 se presentan los costos y ahorros que se derivarían al utilizar el lodo deshidratado como fertilizante o mejorador de suelo, considerando los procesos de tratamiento que comúnmente se realizan al lodo antes de un uso agrícola (Figura 2-11), una distancia a la redonda de 15 km y que todo el lodo producido en un año se usaría con fines agrícolas.

El posible ahorro que se tendría al usar el lodo en forma deshidratada sería de \$598,600 al año, en este caso sólo se ahorrarían los costos ocasionados por el confinamiento del lodo.

Cuadro 4-59. Costos que se derivarían al aplicar el lodo en forma deshidratada ya sea como suplemento parcial de fertilizantes o mejorador de suelos.

Tratamiento	Producción	Costo unitario \$	Costos por año \$
Espesamiento de lodos			
- Espesador de lodos primarios (El espesado es por gravedad)	180m ³ /día al 2%	\$ 0.16/ m ³	10,512
- Espesador de lodos secundarios (Se dosifica polímero al 20% a razón de 3 p.p.m.) Costo de polímero en emulsión : \$10/kg	900 m ³ /día al 1.5%	\$ 0.17 /m ³	55,845
Digestión de lodos (tiempo de residencia 47 días)	700 m ³ /día al 3.0% (21 ton/día, peso seco)	\$ 3.0/ m ³	766,500
- El costo es Energía eléctrica 50% - El costo es Mantenimiento 50%			
Deshidratación (se dosifica polímero base sólido, preparado en una solución al 0.3%)	50 m ³ /día al 20% (10 ton/día, peso seco)	\$ 64.12/ m ³	1,170,119
- El consumo de polímero es de 5kg/tonelada de lodo base seca) - El costo de las telas filtrantes es de 5,000 dls y se cambian cada 4 meses			
Transporte (15 km)	10 ton/día	\$ 40/ton	146,000
Operador		\$ 3,500/mes	42,000
Costo total con el uso del lodo deshidratado			2,190,976
Costo total anterior			2,789,576
Ahorro			598,600

El costo del transporte del lodo puede elevarse significativamente si el contenido de sólidos es bajo, los costos presentados en el Cuadro 4-59 se toman como referencia para indicar que sería el mismo costo que con el confinamiento del lodo, ya que estos pueden variar considerablemente dependiendo de la distancia de traslado. En el área de estudio los campos agrícolas se encuentran aproximadamente dentro de un radio de 20 km con respecto a la planta Noreste.

Los campos situados en Apodaca son los más cercanos a esta planta ya que están a una distancia menor de 10 km. Estos campos por su cercanía serían los más recomendados ya que evitarían que los costos de transporte se elevarán, además se tienen dos ciclos agrícolas que facilitará la aplicación del lodo casi todo el año y la superficie que se siembra en ambos ciclos es suficiente para recibir todos los lodos generados en un año.

Los costos presentados en el Cuadro 4-59 no incluyen otros costos iniciales que se originarían al utilizar el lodo en los campos agrícolas, por ejemplo, la construcción de instalaciones para almacenar el lodo y la adquisición de camiones especiales para aplicar dichos lodos, la ventaja que se tendría es que estos camiones serían de doble propósito (transportación y aplicación del lodo), lo cual sería un ahorro para el agricultor ya que no tendría que utilizar su maquinaria para aplicar el lodo a sus campos lo cual le generaría un gasto.

Al aplicarse el lodo líquido se eliminaría el proceso de deshidratación, pero se aumentaría el volumen a transportar (aproximadamente 700 m³/día) esto lógicamente aumentaría el costo del transporte significativamente, ya que se necesitarían más vehículos para transportar y aplicar el lodo.

Con el lodo deshidratado se tiene la ventaja que se podría aplicar al suelo con el equipo usado para aplicar los estiércoles secos, los cuales son comunes en el área de estudio, pero también se podría aplicar con vehículos especiales de mayor capacidad (5, 7.5, 11.5, 19 y 27.5 m³).

Al utilizar camiones de mayor capacidad para aplicar el lodo deshidratado, se tendría la ventaja que serían de doble propósito: para transportar y aplicar el lodo, ya que por lo general, estos vehículos están equipados con llantas de flotación las cuales minimizan la compactación de los suelos. La desventaja que se tendría es que estos camiones no son comunes en México, tendrían que importarse del extranjero y requerirían de una inversión mayor para su adquisición.

4.5.2 Posible ahorro en los costos derivados por el uso de fertilizantes comerciales usados en la producción de los cultivos en el área de estudio

En el Cuadro 4-60 se presentan los costos de producción correspondientes al año de 1998 de los cultivos que tienen potencial para recibir lodos residuales en el área de estudio y en la Figura 4-7 se presentan gráficamente, el porcentaje de cada uno de los costos de producción por actividad con respecto al costo total de producción.

Cuadro 4-60. Costos de producción promedio de los principales cultivos con potencial para recibir lodos en el área de estudio, correspondiente al año de 1998*.

Cultivo	Desglose de los costos de producción \$/ha								Costo Total \$/ha
	PT	SIE	FER	LC	RD	CPE	COS	CIN	
Avena	620	590	848	140	420	0	480	0	3,098
Cebada	620	450	1,049	140	410	160	430	795.2	4,054.2
Maíz	740	420	1,142	335	460	169.4	500	0	3,766.4
Sorgo F.	740	375	500	0	410	0	2,570	0	4,595
Sorgo G.	740	438	835.4	335	410	147	1,105	0	4,010.4
Trigo	620	760	1,343	140	410	150	490	0	3,913

PT: Preparación del terreno; SIE: Siembra; FER: Fertilización; LC: Labores culturales; RD: Riego y drenaje; CPE: Control de plagas y enfermedades; COS: Cosecha; CIN: Costos indirectos.

* Fuente: SAGAR Delegación Estatal en Nuevo León.

Se puede apreciar en la Figura 4-7 que los costos por fertilización son significantes, ya que representan del 11-34% de los costos totales de producción. Con el uso del lodo como suplemento parcial de fertilizantes, estos costos podrían ahorrarse, ya que el lodo cubriría los requerimientos de nutrientes de los cultivos, principalmente de nitrógeno y fósforo.

En el Cuadro 4-61 se presentan los fertilizantes comerciales más usados en la producción de cultivos, así como el contenido de nutrientes y su costo en el mercado.

Cuadro 4-61. Precio de los principales fertilizantes comerciales.*

Fuente	% N	% P ₂ O ₅	% K ₂ O	\$ TON
Urea	46			2,880
Nitrato de amonio	33.5-34			2,200
Sulfato de amonio	21			1,220
Fosfato monoamónico (MAP)	11	52		3,340
Super fosfato simple		20		1,220
Super fosfato triple		46		2,880
Triple 17	17	17	17	2,880
Sulfato de potasio			50	3,600

*Precios hasta mayo de 1999.

Por lo general, en el área de estudio se satisfacen únicamente las demandas de nitrógeno y fósforo de los cultivos, debido principalmente a las recomendaciones proporcionadas por las instituciones federales, estatales, locales o por las estaciones de experimentación agrícola. Para cubrir dichas demandas de nutrientes, se utilizan principalmente los fertilizantes comerciales sulfato de amonio y super fosfato triple.

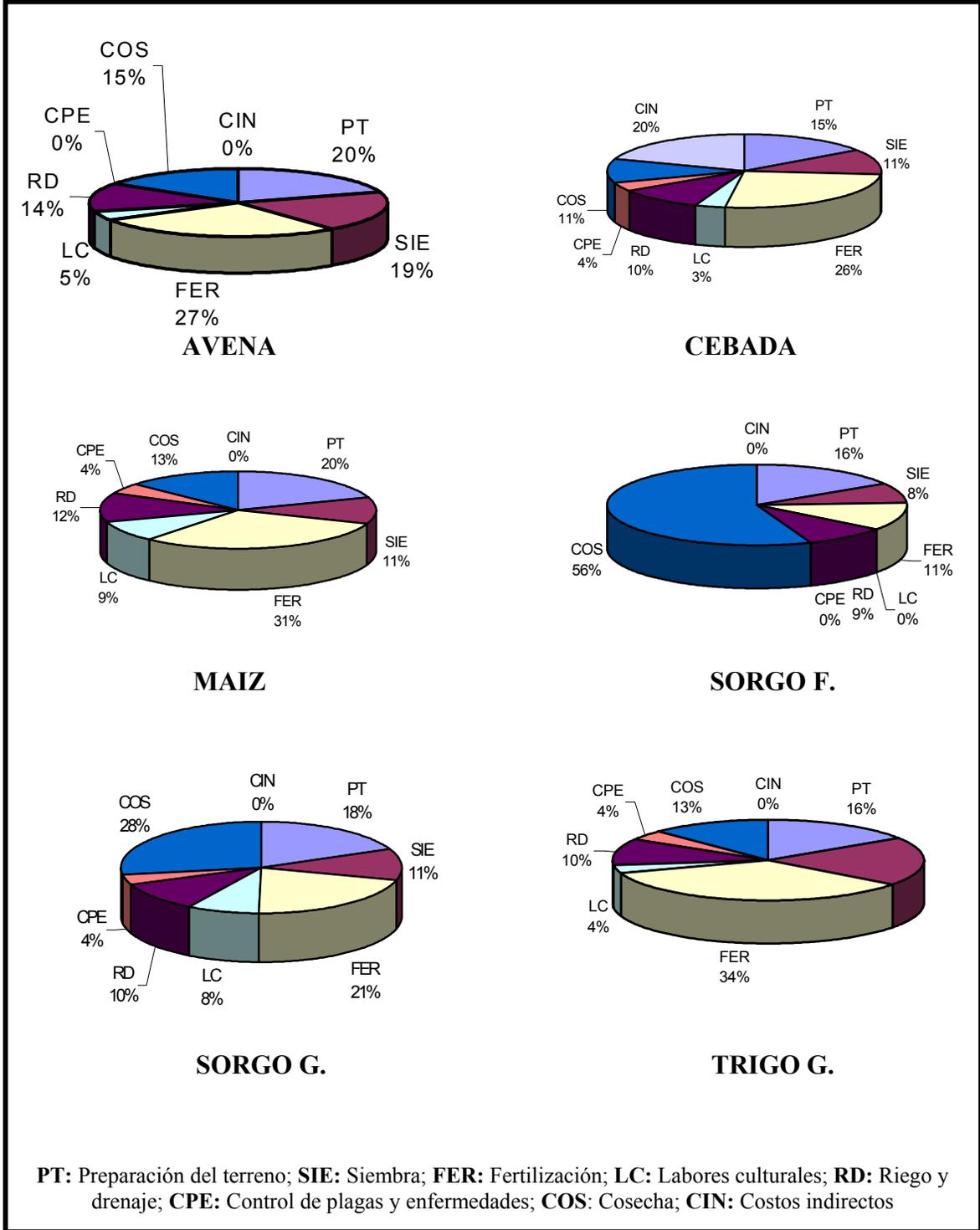


Figura 4-7. Estructura del costo de producción por actividad de los principales cultivos agrícolas en el área de estudio (participación porcentual).

En el Cuadro 4-62 se muestran las demandas o recomendaciones de fertilización, para los cultivos que tienen potencial para recibir lodos, así como el fertilizante comercial requerido para satisfacer dicha demanda y los costos de fertilización de los cultivos, de acuerdo a los precios establecidos en el Cuadro 4-61. Puede apreciarse que los costos más altos de fertilización se tienen en el maíz, sorgo y trigo, debido a que requieren más nitrógeno y fósforo.

En el Cuadro 4-52 se muestra la estimación del N, P y K disponibles por cada tonelada base peso seco. Si se considera que la planta produce aproximadamente 3,650 ton base peso seco al año la cantidad de N, P y K que se podrían aprovechar al año sería significativa. En el Cuadro 4-63 se presenta la cantidad de N, P y K disponibles para las plantas que se podrían aprovechar en la producción de los cultivos del área de estudio, así como a que equivalen en fertilizante comercial los nutrientes contenidos en el lodo y cual sería el costo de éstos.

En el Cuadro 4-64 se presenta la cantidad de fertilizante que se requirió aproximadamente para satisfacer las demandas de N y P de los cultivos con potencial para recibir lodos de acuerdo a la superficie que se sembró en los ciclos agrícolas: Otoño-Invierno 97/98 y Primavera Verano 98/98, así como el costo que tendrían según el Cuadro 4-61.

Considerando que la mitad del lodo deshidratado generado anualmente se aplicara en el ciclo Primavera-Verano sobre el cultivo de sorgo forrajero, la otra parte en el ciclo Otoño-invierno en el cultivo de trigo, aproximadamente el 17 % del requerimiento anual de N y P para el cultivo del sorgo serían cubiertos con el lodo y casi el 6% para el trigo los ahorros que se derivarían de estos dos ciclos por el uso del lodo como fertilizante serían de: \$ 627,085 anuales. Cuadro 4-64 y 65.

Cuadro 4-62. Costo total de fertilización de acuerdo al cultivo, en el área de estudio para el año de 1999.

Cultivo	Produc. promedio ton/ha	Demanda de N kg/ha	Demanda de P kg/ha	Demanda de K kg/ha	Fertilizante requerido kg/ha		Costos de fertilización \$/ha		Costo total de fertilización \$/ha
					Sulfato de amonio	Super fosfato triple	Sulfato de amonio	Super fosfato triple	
Avena F.	8	65	46	0	310	100	378	288	666
Cebada F.	3.5	75	70	0	357	152	436	438	874
Maíz G.	5	120	70	0	571	152	697	438	1,135
Maíz F.	12	160	70	0	762	152	930	438	1,368
Sorgo F.	12	140	70	0	667	152	813	438	1,252
Sorgo G.	7	115	70	0	548	152	668	438	1,106
Trigo G.	4	110	70	0	524	152	639	438	1,077

* De acuerdo al Cuadro 4-64

Cuadro 4-63. Cantidad de N, P y K disponibles en el lodo al año que podrían aprovecharse en la producción de los cultivos de acuerdo al tipo y método de aplicación del lodo, así como su equivalencia a fertilizante comercial y costo de éstos.*

Tipo de lodo y Método de aplicación	Nutrientes en el lodo			Equivalencia con fertilizantes comerciales kg			Costo de acuerdo al fertilizante \$			Costo total \$
	Nitrógeno Disponible kg/año	Fósforo Disponible kg/año	Potasio Disponible kg/año	Sulfato de amonio	Super fosfato triple	Sulfato de potasio	Sulfato de amonio	Super fosfato triple	Sulfato de potasio	
Líquido e inyectado	97,820	108,588	19,710	465,810	236,060	39,420	568,288	679,852	144,277	1,431,837
Líquido y aplicado superficialmente	69,715	108,588	19,710	331,976	236,060	39,420	405,011	679,852	144,277	1,268,560
Deshidratado y aplicado superficialmente	66,978	108,588	19,710	318,940	236,060	39,420	389,107	679,852	144,277	1,252,657

* De acuerdo al Cuadro 4-61.

Cuadro 4-64. Fertilizante comercial requerido para satisfacer las demandas de N y P y costo al año.*

Cultivo	Produc. promedio ton/ha	Superficie sembrada ha/año	Demanda de N kg/ha	Demanda total de N kg/año	Demanda de P kg/ha	Demanda total de P kg/año	Requerimiento de fertilizantes ton/año		Costo de los fertilizantes \$/año		Costo total \$/año
							Sulfato de amonio	Super fosfato triple	Sulfato de amonio	Super fosfato triple	
Avena F.	8	310	65	20,150	46	14,260	96	31	117,120	89,280	206,400
Cebada F.	3.5	220	75	16,500	70	15,400	79	33	96,380	95,040	191,420
Maíz G.	5	102	120	12,240	70	7,140	58	16	70,760	46,080	116,840
Maíz F.	12	80	160	12,800	70	5,600	61	12	74,420	34,560	108,980
Sorgo F.	12	1,394	140	195,160	70	97,580	929	212	1,133,380	610,560	1,743,940
Sorgo G.	7	1,660	115	224,100	70	116,200	1,067	253	1,301,740	728,640	2,030,380
Trigo G.	4	5,240	110	576,400	70	366,800	2,745	797	3,348,900	2,295,360	5,644,260
Total		9,006		1,057,350		622,980	5,035	1,354	6,142,700	3,899,520	10,042,220

* De acuerdo al Cuadro 4-61.

Cuadro 4-65. Ahorro anual que se tendría al utilizar el lodo deshidratado sobre el sorgo forrajero y el trigo.*

Tipo de lodo y Método de aplicación	Nitrógeno				Fósforo			Ahorro	
	N disponible por ciclo kg	Superficie Requerida	Equivalente a fertilizante		P aprovechado kg	Equivalente a fertilizante		Ciclo \$	Anual \$
			S. de A. ton	Costo \$		SFT	Costo \$		
Primavera-Verano: Sorgo Forrajero									627,085
Deshidratado y aplicado superficialmente	33,489	239	159	194,555	16,730	36	104,744	299,299	
Otoño invierno: Trigo grano									
Deshidratado y aplicado superficialmente	33,489	304	159	194,555	21,280	46	133,231	327,786	

* De acuerdo al Cuadro 4-61.

4.5.3 Ahorro anual

En el Cuadro 4-66 se presenta el posible ahorro anual que se tendría al utilizar el lodo deshidratado como fuente de nutrientes. Cabe mencionar que sólo es una estimación ya que es difícil precisar estos valores, debido a que el posible ahorro económico con el uso del lodo dependerá de muchos aspectos tales como: nutrientes contenidos en el lodo, tipo de cultivo, volumen y distancia de traslado del lodo, método y forma de aplicación, etc.

Cuadro 4-66. Ahorros anuales estimados.

Concepto	Ahorro \$	Ahorro anual \$
Confinamiento	598,600	1,225,685
Ciclo: Primavera-Verano	299,299	
Ciclo: Otoño-Invierno	327,786	

5. CONCLUSIONES

1. Los lodos de las plantas de tratamiento pueden considerarse como no tóxicos, por no rebasar los límites que establece la NOM-052-1993. Aunque no se especifique claramente en la norma, un listado o un límite que regule tanto a los microorganismos de mayor patogenicidad así como la densidad de éstos, de acuerdo a la norma dichos lodos pueden clasificarse como peligrosos, ya que contienen microorganismos con capacidad de infección.

El lodo residual no está incluido en una lista de residuos específicos denominados peligrosos por EPA, ni los datos disponibles sugieren que el lodo manifiesta características de un residuo peligroso, la cual incluye corrosividad, reactividad, explosividad y toxicidad. De cualquier modo, la naturaleza no peligrosa del lodo, no puede ser asumida (EPA, 1995a). Aunque el lodo concebiblemente puede manifestar explosividad o reactividad, la mayoría de las preocupaciones acerca de los lodos residuales municipales están enfocadas en la toxicidad.

2. En base a los estándares para el uso y disposición de lodos residuales de la EPA (40 CFR Parte 503) y de los resultados de los análisis de las muestras de lodo tomadas el 24 de marzo y el 16 de mayo de 1997, los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales Dulces Nombres y Norte no son recomendables aplicarse a los suelos, ya que tienen altos contenidos de metales pesados que rebasan los límites máximos permisibles principalmente de Pb y Zn. Además el lodo de la planta Dulces Nombres tiene concentraciones de benzopireno que rebasan los niveles recomendados para este compuesto para los lodos que son aplicados al suelo.

El lodo de la planta Noreste tiene buenas aptitudes para uso agrícola, ya que cumple con los límites máximos permisibles para metales y químicos orgánicos sintéticos. Además cumple con los límites de concentración que clasifican a los lodos como limpios o con bajas concentraciones de metales. En cuanto a patógenos el lodo de esta planta corresponde a un lodo Clase B, el cual puede aplicarse al suelo con algunas restricciones. La salinidad en este lodo es baja ya que tiene una conductividad eléctrica semejante a la de un suelo normal. Por lo tanto, el lodo más apto para uso agrícola como fertilizante o mejorador de suelo es el lodo de la planta Noreste.

3. La evaluación realizada a los suelos agrícolas de los municipios de Apodaca, General Zuazua, Marín y Pesquería indica que es factible aplicar los lodos. Debido a lo siguiente:

- El clima árido facilitaría la aplicación del lodo casi todo el año, ya que la precipitación que oscila de 506-621 mm anuales minimizará la lixiviación de metales, químicos orgánicos y microorganismos, además serán mínimos los problemas de inundaciones que dificulten la aplicación del lodo.
- La topografía tiene pendientes aceptables (0-6%) lo cual reducirá los escurrimientos superficiales, además el lodo deshidratado se podría aplicar al suelo con equipo similar al utilizado para los estiércoles.
- Los niveles estáticos del agua subterránea del área de estudio en general se encuentran a profundidades mayores de 10 metros.
- De acuerdo a la edafología en el área de estudio hay tres grupos mayores de suelo (Calcisoles, Castañozems y Vertisoles) donde se podrían aplicar los lodos que en conjunto representan casi el 65% de la superficie total del área de estudio.
- La mayoría de los cultivos (Avena, Cebada, Maíz, Sorgo y trigo) producidos en el área de estudio tienen potencial para recibir lodos, además por lo general hay dos ciclos agrícolas lo cual facilita la aplicación del lodo casi todo el año.

4. El número de años que puede utilizarse dicho lodo es considerable, ya que puede tener un uso hasta de casi 500 años continuos por superficie en los cultivos que tienen poca demanda de nitrógeno. Este tiempo de vida útil puede aumentarse si el contenido de metales en el lodo disminuye, si las dosis de aplicación son bajas o se diseñan de acuerdo a la demanda de N o P del cultivo y si no se aplica año tras año, en caso contrario la vida útil del lodo disminuirá.

5. Es indudable que el uso del lodo generará un ahorro tanto en el tratamiento como en el confinamiento de éste así como para el agricultor que lo acepte, el posible ahorro dependerá principalmente del medio y longitud de transporte de los lodos.

6. RECOMENDACIONES

- De acuerdo a EPA (1995a) el lodo puede que manifieste características de toxicidad, pero ésta sería en poca escala. Si en algún momento el lodo manifestara características de toxicidad fuera de los límites permisibles, la aplicación del lodo a los suelos no deberá permitirse.
- Un tratamiento de los lodos para eliminar metales y químicos orgánicos sintéticos puede elevar aun más los costos del tratamiento de éstos. Lodos con altas concentraciones de metales, son un problema que generalmente se tiene en las ciudades más industrializadas, como es el caso de Monterrey, N.L. Para disminuir el contenido de contaminantes en los lodos, lo más recomendado sería atacar el problema desde sus orígenes, exigiendo a la industria que mejore o limite las concentraciones de contaminantes incluyendo metales y químicos orgánicos en las aguas residuales que son descargados a los sistemas de drenaje municipal.
- Algunos lodos requieren cal para su estabilización, dicho lodo se podría utilizar sobre los suelos ácidos para elevar el pH de estos. Pero no son ideales para los suelos calcáreos ya que aumentaría la concentración de cal en éstos. Los problemas creados por los suelos excesivamente calizos derivan de las dificultades de aireación y disponibilidad de nutrientes.
- Como precaución debe evitarse aplicar el lodo sobre materiales consolidados de caliza o roca fracturada ya que estos materiales tienen potencial para permitir lixiviaciones lo cual podría ocasionar una contaminación de las aguas subterráneas además dichos materiales por lo general se encuentran formando lomeríos y tienen suelos con poco

espesor principalmente Leptosoles y Regosoles, lo cual asociado con la pendiente podría dificultarse la aplicación del lodo.

- También es recomendable no aplicar lodo cerca de los cuerpos de agua superficiales para evitar una contaminación de éstas.
- La mineralización del nitrógeno orgánico depende principalmente de la temperatura, humedad y actividad microbiana que se tenga en los suelos. Por lo tanto, se recomienda determinar los factores de mineralización del nitrógeno orgánico de los lodos para el área de estudio ya que éstos ayudan a determinar el nitrógeno disponible y por consiguiente las dosis de aplicación del lodo.

7. LITERATURA CITADA

- Adriano, D.C., A.C. Chang, and R. Sharpless. 1974. Nitrogen loss from manure as influenced by moisture and temperature. *J. Environ. Qual.* 3:258-261.
- Aguilar, R., S.R. Loftin, T.J. Ward, K.A. Stevens, and J.R. Gosz. 1994. Sewage sludge application in semiarid grasslands: Effects on vegetation and water quality. WRRRI Report No. 285, New Mexico Water Resources Research Institute (NMSU), Las Cruces, NM.
- Allaway, W. 1977. Soil and plant aspects of the cycling of chromium, molybdenum, and selenium. *Proc. Intern. Conf. Heavy Metals in the Environment.* 1:35-47.
- Bartholomew, W.V. 1965. Mineralization and immobilization of nitrogen in the decomposition of plant and animal residues. In: W.V. Bartholomew and F.E. Clark, eds. *Soil Nitrogen Agronomy* 10:285-306. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Beauchamp, E.G., G.E. Kidd, and G. Thurtell. 1978. Ammonia volatilization from sewage sludge applied in the field. *J. Environ. Qual.* 7:141-146.
- Beauchamp, E.G., G.E. Kidd, and G. Thurtell. 1982. Ammonia volatilization from sewage sludge applied in the field. *Can. J. Soil Sci.* 62:11-19.
- Berglund, S., R.D. Davis, and P. L'Hermite. 1984. Utilization of sewage sludge on land: Rates of application and long-term effects of metals. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland. p. 229.
- Brunke, R., P. Alvo, P. Schuepp, and R. Gordon. 1988. Effect of meteorological parameters on ammonia loss from manure in the field. *J. Environ. Qual.* 17:431-436.
- CAST. 1976. Application of sewage sludge to cropland: Appraisal of potential hazards of the heavy metals to plants and animals. Report No. 64. Council for Agricultural Science and Technology, Ames, IA. p. 63.
- CAST. 1980. Effects of sewage sludge on the cadmium and zinc content of crops. Report No. 83. Council for Agricultural Science and Technology, Ames, IA. p. 77.
- Chaney, R.L. 1973. Crop and food chain effects of toxic elements in sludges and effluents. In: *Proceedings of Joint Conference on Recycling Municipal Sludges and Effluents*

- on Land, Champaign, IL (July 9-13). National Association of State Universities and Land Grant Colleges, Washington, DC. p. 129-141.
- Chaney, R.L., and P.M. Giordano. 1977. Microelements as related to plant deficiencies and toxicities. In: Elliott, L.F., and F.J. Stevenson, eds. Soils for management of organic wastes and waste waters. American Society of Agronomy, Madison, WI. p. 235-279.
- Chaney, R.L. 1983a. Plant uptake of inorganic waste constituents. In: J.F. Parr, P.B. Marsh, and J.M. Kla, eds. Land treatment of hazardous wastes. Noyes Data Corporation, Park Ridge, NJ. p. 50-76.
- Chaney, R.L. 1983b. Potential effects of waste constituents on the food chain. In: J.F. Parr, P.B. Marsh, and J.M. Kla, eds. Land treatment of hazardous wastes. Noyes Data Corporation, Park Ridge, NJ. p. 152-240.
- Chaney, R.L. 1984. Potential effects of sludge-born heavy metals and toxic organics on soils, plants, and animals, and related regulatory guidelines. In: Workshop on the International Transportation, and Utilization or Disposal of Sewage Sludge, Including Recommendations (December 12-15). Final Report PNSP/85-01. Pan American Health Organization, Washington, DC. p. 56.
- Cole, D.W., C.L. Henry, P.S and Zasoski, R.J. 1983. The Role of Forest in Sludge and Wastewater Utilization Programs. Eds. Sponsored by the U.S. EPA and the Universidad of California, Riverside.
- Davis, R.D., G. Hucker, and P. L'Hermitte. 1983. Environmental effects of organic and inorganic contaminants in sewage sludge. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company. p. 257.
- Edmonds, R. 1979. Microbiological characteristics of dewatered sludge following application to forest soils and clearcut areas. In: Sopper, W., and S. Kerr, eds. Application of municipal sewage effluent and biosolids on forest and disturbed land. University Park, PA: Pennsylvania State University Press.
- Environment Canada - Environmental Protection Service. 1984. Manual for land application of treated municipal wastewater and sludge. Manual EPS 6-EP-84-1. Environmental Protection Programs Directorate of Supply and Services Canada.
- FAO. 1991. World Soil Resources. An explanatory note on the FAO World Soil Resources Map at 1:25,000,000 scale. World Soil Resources Report no. 66. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 58p.
- Fresquez, P., R. Francis, and G. Dennis. 1990. Soil and vegetation responses to sewage sludge on a degraded semiarid broom snakeweed/blue grama plant community. J. Range Mgmt. 43(4):325-331.

- Furr, A., A. Lawrence, S. Tong, M. Grandolfo, R. Hofstader, C. Bache, W. Gutenmann, and D. Lisk. 1976. Multi-element and chlorinated hydrocarbon analysis of municipal sewages of American cities. *Environ. Sci. Technol.* 10:683-687.
- García E. 1976. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. U.N.A.M. México.
- Gallier, W., B. Brobst, R. Aguilar, K. Barbarick, P. Hegeman, B. Janonis, D. Salahub, and S. Wilson. 1993. Rx for rangelands. *Water Environ. and Tech.* 5:10.
- Hall, J.E., and J.C. Ryden. 1986. Current UK research into ammonia losses from sludges and slurries. In: Dam Kofoed, A., J.H. Williams, and P. L'Hermite, eds. *Efficient land use of sludge and manure*. London, England: Science Publishers Ltd. pp. 180-192.
- Harmsen, G.W., and D.A. Van Schreven. 1955. Mineralization of organic nitrogen in soil. *Adv. Agron.* 7:299-398.
- Hoff, J.D., D.W. Nelson, and A.L. Sutton. 1981. Ammonia volatilization from liquid swine manure applied to cropland. *J. Environ. Quality* 10:90-95.
- Hue. N.V. 1996. Land application of biosolids. *Environmental Soil Chemistry*, University of Hawaii. Sludz.htm at agrss.sherman.hawaii.edu. 9 p.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1980. Carta Monterrey topográfica Escala 1:250,000.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1981. Carta Monterrey hidrología superficial e hidrología subterránea Escala 1:250,000.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1988. Carta Monterrey Geológica Escala 1:250,000.
- Jacobs, L., S. Carr, S. Böhm, and J. Stukenberg. 1987. Document long-term experience of biosolids land application programs. Project 91-ISP-4. Water Environment Research Foundation. Alexandria, VA.
- Jacobs, L., S. Carr, S. Böhm, and J. Stukenberg. 1993. Document long-term experience of biosolids land application programs. Project 91-ISP-4. Water Environment Research Foundation. Alexandria, VA.
- Jakubowski, W. 1988. Ascaris ova survival in land application conditions. EPA Administrator's Item Deliverable No. 2799 (May 1988).
- Keeney, D., K. Lee, and L. Walsh. 1975. Guidelines for the application of wastewater sludge to agricultural land in wisconsin. Technical Bulletin 88, Wisconsin Department of Natural Resources, Madison, WI.

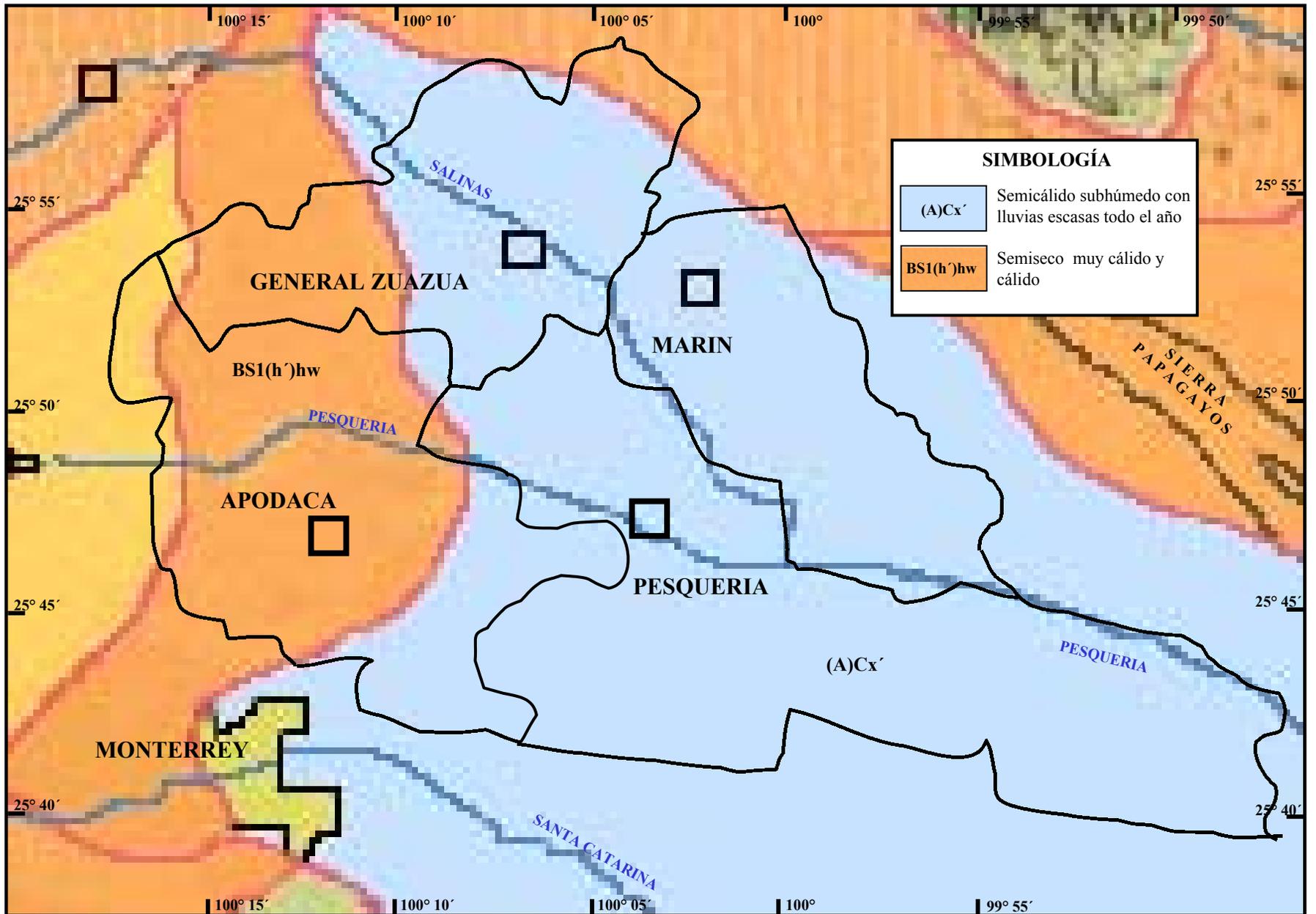
- Keeney, D.R. 1989. Sources of nitrate to groundwater. In: R.F. Follett, ed. Nitrogen management and ground water protection. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science Publishers. pp. 23-34.
- Lauer, D.A., D.R. Bouldin, and S.D. Klausner. 1976. Ammonia volatilization from dairy manure spread on the soil surface. *J. Environ. Quality* 5:134-141.
- Lindsay, W.L. 1973. Inorganic reactions of sewage wastes with soils. In: Proceedings of Joint Conference on Recycling Municipal Sludges and Effluents on Land, Champaign, IL (July 9-13). National Association of State Universities and Land-Grant Colleges, Washington, DC. pp. 91-96.
- L'Hermite, P., and J. Dehandtschutter. 1981. Copper in animal wastes and sewage sludge. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company. p. 378.
- Logan, T.J., and R.L. Chaney. 1983. Utilization of municipal wastewater and sludge on land-metals. In: Page, A.L., T.L. Gleason, III, J.E. Smith, Jr., I.K. Iskandar, and L.E. Sommers, eds. Utilization of municipal wastewater and sludge on land. University of California, Riverside, CA. pp. 235-326.
- Lue-Hing, C., D.R. Zenz, and R. Kuchenrither, eds. 1992. Municipal sewage sludge management: Processing, utilization, and disposal. In: Water quality management library, Vol. 4. Lancaster, PA: Technomic Publishing Company, Inc.
- Melsted, S.W. 1973. Soil-plant relationships (some practical considerations in waste management). In: Proceedings of Joint Conference on Recycling Municipal Sludges and Effluents on Land, Champaign, IL (July 9-13). National Association of State Universities and Land-Grant Colleges, Washington, DC. pp. 121-128.
- Metcalf and Eddy. 1991. Wastewater engineering treatment and disposal reuse. Third edition. Mc. Graw Hill.
- Mumma, R.O., K.A. Rashid, D.C. Raupack, B. S. Shane, J.M. Scarlet-Kranz, C.A. Bache, W.H. Gutenmann, and D.J. Lisk. 1988. Mutagens, toxicants, and other constituents in small city sludges in New York State. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 17:657-663.
- National Research Council. 1996. Use of reclaimed water and sludge in food crop production. National. Academy Press. Washington, D.C.
- Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993. Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- O.C. Spaargaren. 1994. World Reference Base for Soil Resources. O.C. Spaargaren. Wageningen, Rome.

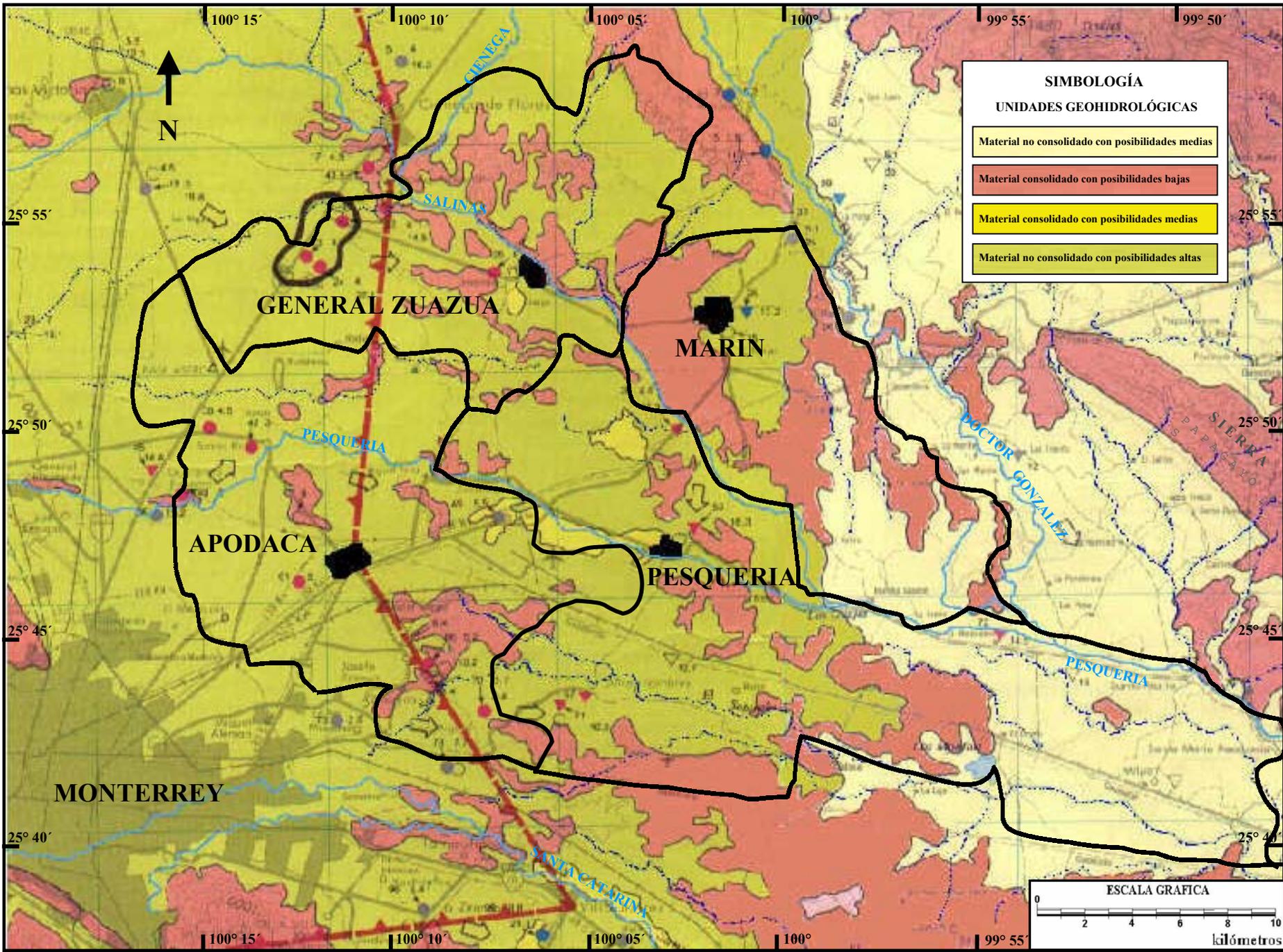
- Ostergaard H. Birgitte. 1997. Sewage sludge amended soils and heavy metals. Birgitpr.htm at weber.u.washington.edu. 8 p.
- Outwater B. A. 1994. Reuse of sludge and minor wastewater residuals. Lewis Publishers. United States of America.
- Page, A.L., T.J. Logan, and J.A. Ryan, eds. 1987. Land application of sludge-food chain implications. Chelsea, MI: Lewis Publishers, Inc. p. 168.
- Peterson, R., and M. Madison. 1992. Benefits of transporting biosolids from a wet climate to a dry climate. Presented at Water Environment Federation Specialty Conference, July 26-30.
- Pierce, B., E. Redente, and K. Barbarick. 1992. Review of sewage sludge-amended rangeland at Walcott, Colorado. Progress Report to Colorado Department of Health and U.S. EPA. Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Pissani, Z.J.F. 1990. Tratamiento y aprovechamiento agrícola de las aguas y lodos residuales. Apuntes de clase. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N. L.
- Pissani, Z.J.F. 1998. Tratamiento y aprovechamiento agrícola de las aguas residuales. Postgrado, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N.L.
- Pissani, Z.J.F., Guzmán, R.J.L. 1999. Evaluación preliminar de la aplicación de lodos en el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays L.*). FAUANL-DYCUSA-SADM. Marín, N.L. México. 46p.
- Rank, M., J. Huber, and A. Amberger. 1988. Model trials on the volatilization of ammonia following slurry application under controlled climate and field conditions. In: Welte, E., and I. Szabolcs, eds. Agricultural waste management and environmental protection, Vol. 2. Groltze-Druck, Goettingen, Federal Republic of Germany. pp. 315-320.
- Reddy, K.R., R. Khaleel, M.R. Overcash, and P.W. Westerman. 1979. A nonpoint source model for land areas receiving animal wastes, Vol. II. Ammonia Volatilization. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 22:1,398-1,405.
- Ryan, J., D. Keeney, and L. Walsh. 1973. Nitrogen transformations and availability of an anaerobically digested sewage sludge in soil. J. Environ. Quality 2:489-492.
- Ryan J. and R. Chaney. 1993. Regulation of municipal sewage sludge under the Clean Water Act Section 503: a model for exposure and risk assessment for MSW-compost. In Science and Engineering of Composting. Worthington, OH: Renaissance Publications, 1993.

- Sagik, B., B. Moore, and C. Forber. 1979. Public health aspects related to the land application of municipal sewage effluents and sludges. In: Sopper, W.E., and S.M. Kerr, eds. Utilization of municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land. University Park, PA: Pennsylvania State University Press. pp. 241-263
- Schepers, J.S., and R.H. Fox. 1989. Estimation of N budgets for crops. In: Follett, R.W., ed. Nitrogen management and ground water protection. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science Publishers. pp. 221-246.
- Seoanez C. 1995. Aguas residuales urbanas, tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento. Madrid, España. Mundi- Prensa 368 p.
- Shimp, G., K. Hunt, S. McMillian, and G. Hunter. 1994. Pretreatment raises biosolids quality. Environ. Protection 5(6).
- Smith, J.H., and J.R. Peterson. 1982. Recycling of nitrogen through land application of agricultural, food processing, and municipal wastes. In: Stevenson, F.J., ed. Nitrogen in agricultural soils. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Madison, WI. pp. 791-831.
- Sommers, L., D. Nelson, J. Yahner, and J. Mannering. 1972. Chemical composition of sewage sludge from selected Indiana cities. Oroc. Indiana Acad. Sci. 82:424-432.
- Sommers, L. 1977. Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers. J. Environ. Quality 6:225-239.
- Sommers, L., C. Parker, and G. Meyers. 1981. Volatilization, plant uptake and mineralization of nitrogen in soils treated with sewage sludge. Technical Report 133. Water Resources Research Center, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Sommers, L.E., and P.M. Giordano. 1984. Use of nitrogen from agricultural, industrial, and municipal wastes. In: Hauck, R.D., ed. Nitrogen in crop production. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI. pp. 207-220.
- Sommers, L.E., and K.A. Barbarick. 1986. Constraints to land application of sewage sludge. In: Runge, E.C.A., ed. Utilization, treatment and disposal of waste on land. Soil Science Society of America, Madison, WI. pp. 193-216.
- Sommers, L.E., V. Van Volk, P.M. Giordano, W.E. Sopper, and R. Bastian. 1987. Effects of soil properties on accumulation of trace elements by crops. In: Page, A.L., T.J. Logan, and J.A. Ryan, eds. Land application of sludge-food chain implications. Chelsea, MI: Lewis Publishers, Inc. pp. 5-24.

- Sorber, A. Charles. 1994. Biosolids, a blue print for public acceptance. *Water Environment and Technology*. Water Environment Federation. 6:5:61.
- Terman, G.L. 1979. Volatilization losses of nitrogen as ammonia from surface-applied fertilizers, organic amendments, and crop residues. *Adv. Agron.* 31:189-223.
- U.S. EPA. 1974. Fate and effects of trace elements in sewage sludge when applied to agricultural lands. EPA-670/2-74-005. Cincinnati, OH. p. 98.
- U.S. EPA. 1979. Process design manual for sludge treatment and disposal. EPA/625/1-79/011. Cincinnati, OH.
- U.S. EPA. 1982. Fate of priority pollutants in publicly owned treatment works. EPA/440/1-82/303. Washington, DC.
- U.S. EPA. 1983. Process design manual for land application of municipal sludge. EPA/625/1-83/016. Cincinnati, OH. p. 410.
- U.S. EPA. 1984. Use and disposal of municipal wastewater sludge. EPA/625/10-84/003. Cincinnati, OH.
- U.S. EPA. 1987. Survival and transport of pathogens in sludge-amended soil: A critical literature review. EPA/600/2-87/028. Cincinnati, OH.
- U.S. EPA. 1990. National Sewage Sludge Survey: Availability of information and data, and anticipated impacts on proposed regulations. *Fed. Reg.* 55(218).
- U.S. EPA. 1992a. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. EPA/625/R-92/013. Cincinnati, OH.
- U.S. EPA. 1992b. Technical support document for land application of sewage sludge, Vol. I. EPA/822/R-93900/9 (NTIS PB93110583). Washington, DC.
- U.S. EPA. 1993. Standards for the use or disposal of sewage sludge. *Fed. Reg.* 58(32):9259.
- U.S. EPA. 1994. A plain English guide to the EPA Part 503 biosolids rule. EPA/832/R-93/003. Washington, DC.
- U.S. EPA. 1995a. Process design manual: Land Application of Sewage Sludge and Domestic Septage EPA/625/R-95/001. Cincinnati, OH.
- U.S. EPA. 1995b. A Guide to the Biosolids Risk Assessments for the EPA Part 503 Rule. 1995. EPA/63-B93-005. Washington, DC.
- Vallis, I., L.A. Harper, V.R. Catchpole, and K.L. Weier. 1982. Volatilization of ammonia from urine patches in a subtropical pasture. *Aust. J. Agric. Res.* 33:97-107.

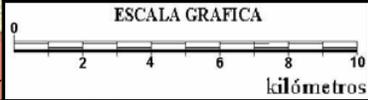
- Walsh, L.M, M.E. Sumner, and R.B. Corey. 1976. Consideration of soils for accepting plant nutrients and potentially toxic nonessential elements. In: Land application of waste materials. Soil Conservation Society of America, Ankeny, IA. pp. 22-47.
- Water Environmental Federation. U.S. Environmental Protection Agency. 1992. Standars for the use and disposal of sewage sludge. 40-CFR parts 257, 403 and 503. Final rule and phased in Submission of sewage sludge permit application (revisions to 40 CFR Parts 122, 123 and 501) Final rule.

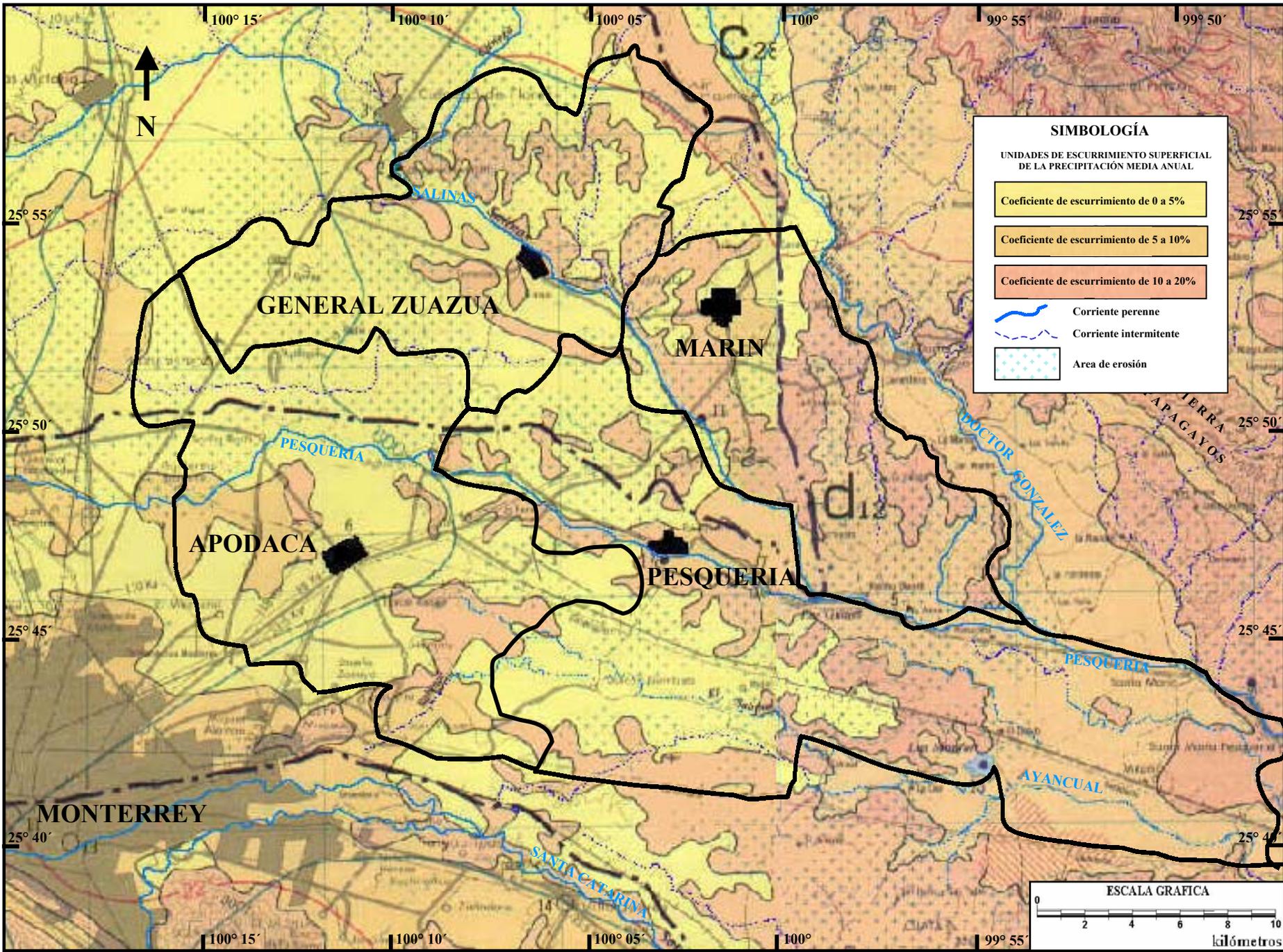




SIMBOLOGÍA
UNIDADES GEOHIDROLÓGICAS

Material no consolidado con posibilidades medias
Material consolidado con posibilidades bajas
Material consolidado con posibilidades medias
Material no consolidado con posibilidades altas





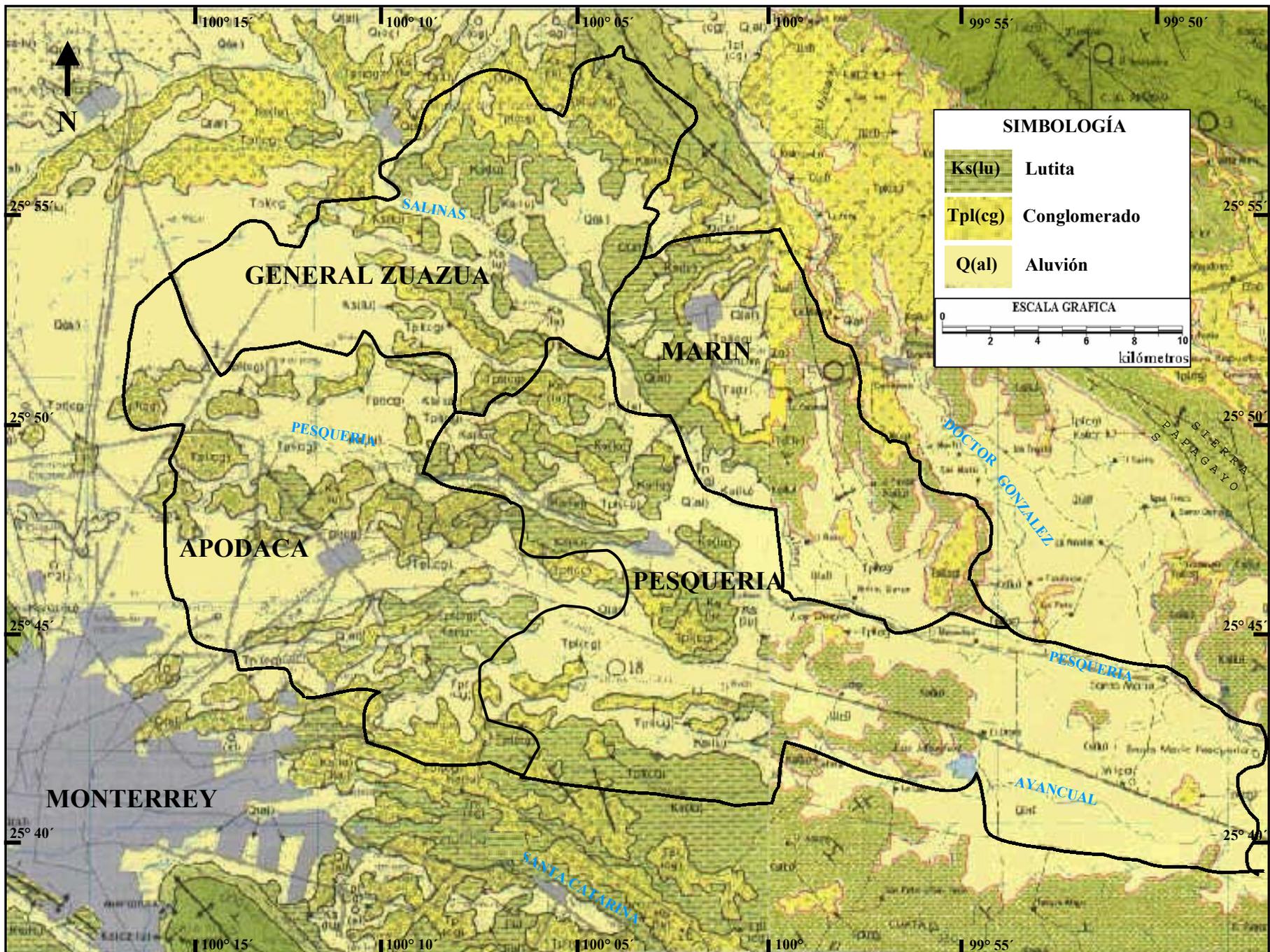
SIMBOLOGÍA

UNIDADES DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL

- Coefficiente de escurrimiento de 0 a 5%
- Coefficiente de escurrimiento de 5 a 10%
- Coefficiente de escurrimiento de 10 a 20%

- Corriente perenne
- Corriente intermitente
- Area de erosión





SIMBOLOGÍA

	Lutita
	Conglomerado
	Aluvión

ESCALA GRAFICA

0 2 4 6 8 10
kilómetros

GENERAL ZUAZUA

MARIN

APODACA

PESQUERIA

MONTERREY

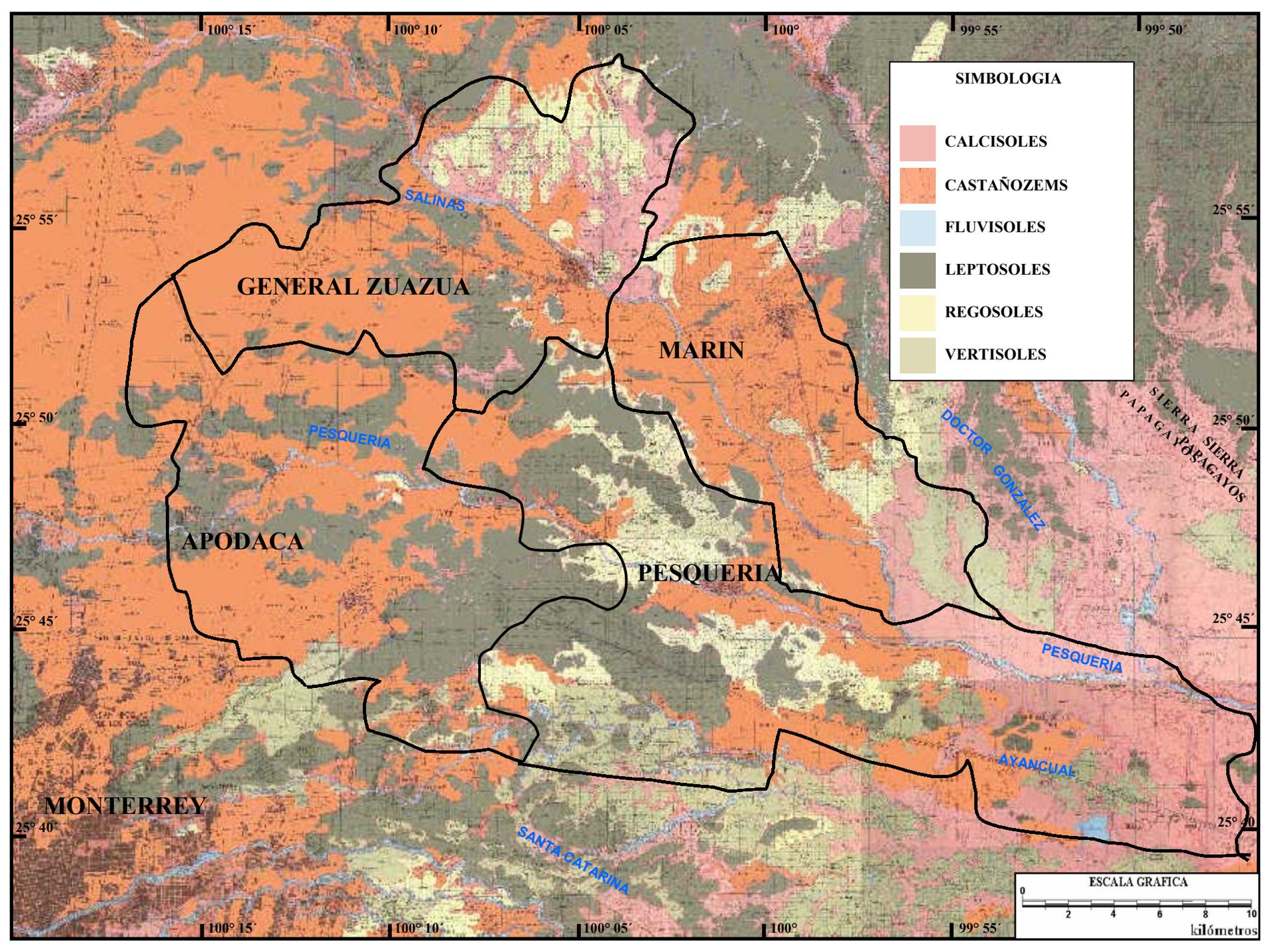
AYANCUAL

SALINAS

PESQUERIA

DOCTOR GONZALEZ

SANTA CATERINA



SIMBOLOGIA

- CALCISOLES
- CASTAÑOZEMS
- FLUVISOLES
- LEPTOSOLES
- REGOSOLES
- VERTISOLES

GENERAL ZUAZUA

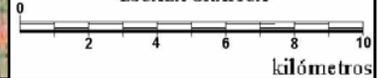
MARIN

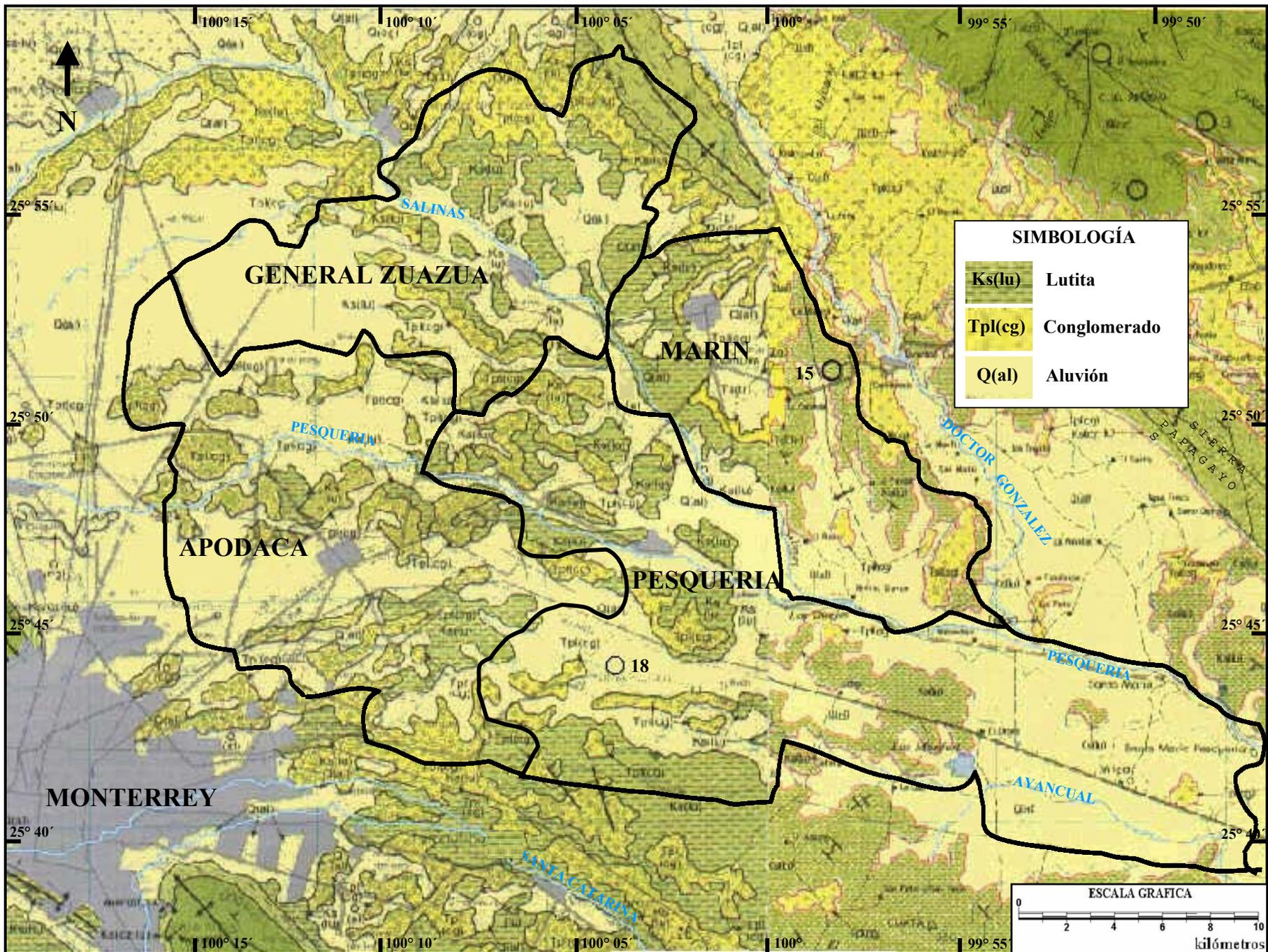
APODACA

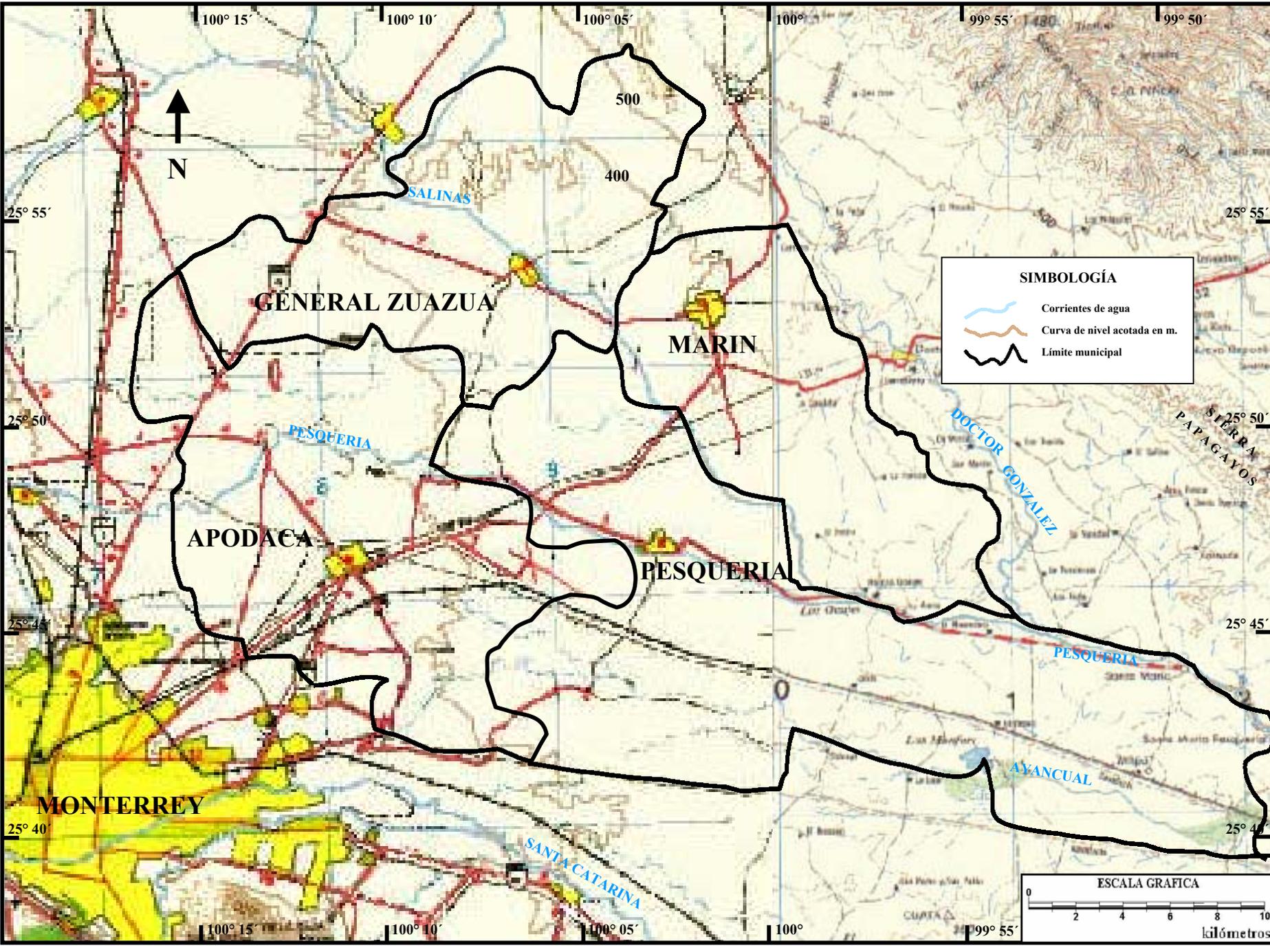
PESQUERIA

MONTERREY

ESCALA GRAFICA







SIMBOLOGÍA

-  Corrientes de agua
-  Curva de nivel acotada en m.
-  Límite municipal

