

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**



**EVALUACIÓN DE LA APTITUD DE UN TERRENO PARA  
LA SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
NATURAL DE BAJA CARGA**

**POR**

**ROSA ISELA CASO VEGA**

**TESIS**

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

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

**Buenvista, Saltillo, Coahuila, México Mayo del 2003**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**EVALUCIÓN DE LA APTITUD DE UN TERRENO PARA  
LA SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
NATURAL DE BAJA CARGA**

**REALIZADO POR:**

**ROSA ISELA CASO VEGA**

**Que somete a consideración del H. Jurado Examinador como Requisito  
Parcial para Obtener el título de:**

**Ingeniero Agrónomo en Irrigación.**

**APROBADA POR:**

---

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

---

**Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho**  
**Asesor**

---

**Dr. J. Francisco Pissani Zúñiga**  
**Asesor**

---

**M.C. Luis Edmundo Ramírez Ramos**  
**Coordinador de la División de Ingeniería**

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Terra Mater, la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, por permitir mi estancia y por los conocimientos adquiridos, solo me queda decir gracias.

A mis maestros por transmitirme sus conocimientos adquiridos que son parte de mi formación, a todos y cada uno de ellos muchas gracias.

A mis compañeros de generación por todos los momentos que compartimos juntos, tanto en las buenas como en las malas y en especial a ti Octavio Montaña Almejo (+), que no pudiste concluir tus estudios, pero que desde allá arriba nos estas mirando.

Al Dr. Lorenzo Martínez Medina, por su apoyo para la realización de este trabajo, muchas gracias.

Al M. C. Luis Samaniego Moreno, por la dirección de este trabajo, por los consejos en el transcurso de mi carrera y el apoyo brindado incondicional, gracias.

Al Dr. Javier de Jesús Córtes Bracho, por el apoyo y los ánimos que me dio para concluir este trabajo, muchas gracias.

Al Dr. Juan Francisco Pissani Zúñiga, por las sugerencias en la revisión del trabajo y por todos los consejos de su parte.

A la M. C. Manuela Bolívar Duarte, por la revisión de este trabajo, gracias.

Al Ing. Carlos Rojas Peña y a su familia, por todo el apoyo que me brindaron durante mi estancia, por todos los consejos y por adoptarme prácticamente como una hija, por todo eso y más, les doy las gracias.

A la Lic. Blanca Esthela Monsivais Muñiz, por escucharme y darle solución a mis problemas ellos, por los consejos y el apoyo brindado, por verme como una hija, muchas gracias.

A mis amigos: Lázaro Hernández, Juan Gómez, Bernabé Vázquez, Alexis Rosas, Misael Muñoz, Eleazar López, Pedro Landeros, Erika Vidal, Marnely Díaz, Idelvina Díaz, Rocío Ramos, Rosario Guardiola, Justino Muñoz, José Maas, Joaquín Mendoza, por estar en las buenas y en las malas, gracias los llevare siempre en mi corazón.

## DEDICATORIA

A Dios por haberme dado la vida, por la familia que tengo y por permitirme concluir mis estudios, gracias Dios mío.

A mis padres a quienes les debo lo que soy, gracias por impulsarme a seguir adelante y ser siempre mejor.

A mis hermanos: María de Lourdes, Claudia Janeth, Marco Antonio, María Eugenia y Yara Lisbeth, por darme ánimos y consejos; les deseo lo mejor y siempre estaré con ustedes en las buenas y las malas.

A mi sobrino Yeltzith Danilo, a quien le tengo un gran cariño.

## INDICE DE CONTENIDO

Página

INDICE DE FIGURAS.....	xi
INDICE DE CUADROS.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Origen del problema.....	4
Los sistemas de tratamiento natural en los Estados Unidos.....	6
Características y objetivos de los sistemas de tratamiento natural.....	6
Sistemas de baja carga.....	10
Evaluación y elección del emplazamiento.....	12
Tratamiento previo a la aplicación.....	12
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
Reconocimiento del área de estudio.....	14
Localización geográfica.....	14
Clima.....	14
Estudio Topográfico.....	15
Estudio de Suelo.....	16
pH.....	18
Conductividad Eléctrica del Suelo.....	19
Textura.....	20
Infiltración.....	21
Hidrología del terreno.....	27

	Página
Uso del terreno.....	27
Estudio de agua.....	27
Calidad.....	27
Disponibilidad.....	28
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
CONCLUSIONES.....	34
RECOMENDACIONES.....	35
RESUMEN.....	36
LITERATURA CITADA.....	37
APÉNDICE A.....	39



## INDICE DE CUADROS

Cuadro No.	Página
2.1 Primeras aplicaciones al terreno utilizadas en E. U. A.....	
2.2 Comparación de las características de ubicación de los	6
2.3 procesos de aplicación al	
2.4 terreno.....	7
Comparación de las características de diseño de diferentes procesos de aplicación al	
2.5 terreno.....	8
Comparación de la calidad esperada del agua tratada procedente del sistema de tratamiento	
4.1 natural.....	
4.2 Características del emplazamiento y criterios de selección en un sistema de baja	8
carga.....	
4.3 Resultados de las características del sitio.....	
4.4 Comparación de los criterios de selección contra los resultados	12
4.5 obtenidos.....	
Análisis químico del agua.....	29
Cultivos tolerantes.....	
Cultivos semitolerantes.....	30
	31
	32
	33

## INDICE DE FIGURAS

Figura No.		Página
3.1	Aspecto general del área de estudio.....	15
3.2	<b>Plano general del área de estudio.....</b>	17
3.3		18
3.4		19
3.5		21
3.6	Medición de la Conductividad Eléctrica.....	22
A1	Medición de calcio, magnesio y sodio.....	40
A2	Cilindros infiltrómetros.....	40
	Comportamiento de la velocidad de infiltración.....	
	Comportamiento de la infiltración acumulada.....	



## RESUMÉN

El uso de aguas residuales en agricultura constituye una de las herramientas más valiosas que tienen los países en vías de desarrollo para controlar la contaminación y hacer frente al reto que constituye incrementar la producción agrícola con un recurso escaso. En cuestiones de ver como se va contaminando cada vez el agua surge la idea de darle un tratamiento natural y estos se dividen en sistemas de baja carga y sistemas acuáticos. Los sistemas de baja carga se dividen en 2 tipos, tipo 1 su objetivo principal es tratar el agua residual y tipo 2 es reutilizar el agua residual; ambos constan de dos etapas: el diseño preliminar y el proyecto constructivo.

De acuerdo al análisis de suelo con los resultados obtenidos, es un suelo ligeramente salinos pero que reúne todas las condiciones optimas para la selección de un sistema de tratamiento natural de baja carga, el cual presenta una permeabilidad optima que proporciona un equilibrio entre la retención de constituyentes y la facilidad de drenaje.

El tipo de tratamiento seleccionado fue el de tipo 2, debido a que al agricultor le conviene más reutilizar el agua y no tratarla, porque el agricultor cuenta con agua de mejor calidad (pozo) y tendrá una fuente adicional de agua y nutrientes; este tipo de tratamiento se puede aplicar con sistemas de riego por superficie o aspersión.

El agua no determina el tipo de tratamiento en la selección de un sistema de tratamiento de baja carga, lo que determina la selección en los sistemas de tratamiento natural de baja carga son las características del suelo.

## INTRODUCCIÓN

El origen, composición y cantidad de los desechos están relacionadas con los hábitos de vida vigentes. Cuando un producto de desecho se incorpora al agua, el líquido resultante recibe el nombre de agua residual. Estas aguas que suelen contener los residuos producidos en los hogares y en las oficinas. Contienen heces fecales, bacterias y virus que ocasionan diversas enfermedades; normalmente sus niveles de nitrógeno y compuestos fosfatados son elevados, por lo que se consideran aguas fertilizadas en exceso, principales generadoras del fenómeno conocido como eutrofización. (Seonaez, 1999)

La reutilización de las aguas residuales en la agricultura es un elemento de desarrollo del recurso agua e innovadora que mantiene una alternativa para la agricultura. El reutilizar el agua de riego recuperada refuerza la productividad agrícola; esta provee agua, nutrientes, y mejora rendimientos en los cultivos. El uso de aguas residuales en agricultura constituye una de las herramientas más valiosas que tienen los países en vías de desarrollo para controlar la contaminación y hacer frente al reto que constituye incrementar la producción agrícola con un recurso hídrico escaso.

Las características más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, termino que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad. La aplicación de aguas residuales, crudas o previamente tratadas, al suelo, campos de cultivo, o estanques de piscicultura constituye en sí un tratamiento adicional que mejora la calidad de las mismas. (Metcalf y Eddy, 1996)

En el medio ambiente natural, cuando interaccionan el agua, el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera, se producen procesos físicos, químicos y biológicos. La contaminación de las aguas puede proceder de fuentes naturales o de actividades humanas. En la actualidad la más importante, sin duda, es la provocada por el hombre. El desarrollo y la industrialización suponen un mayor uso de agua, una gran generación de residuos muchos de los cuales van a parar al agua y el uso de medios de transporte fluviales y marítimos que, en muchas ocasiones, son causa de contaminación de las aguas.

Dentro de los sistemas de tratamiento del agua se pueden encontrar los sistemas de tratamiento natural, estos incluyen: (a) los sistemas de aplicación al terreno: sistemas de baja carga, de infiltración rápida y de riego superficial, y (b) los sistemas acuáticos: terrenos pantanosos naturales y artificiales y sistemas de tratamiento mediante plantas acuáticas.

**Los avances más recientes en materia de tecnología de tratamiento natural se centran en el uso de terrenos pantanosos artificiales con plantas emergentes y sistemas acuáticos con plantas flotantes. La denominación de métodos de depuración natural, engloba aquellos procedimientos en los que el tratamiento principal es proporcionado por componentes del medio natural. Habitualmente se diferencian dos grandes grupos: a) los métodos de tratamiento mediante aplicación en el terreno y b) los sistemas acuáticos. En ellos, el efecto depurador se debe a la acción de la vegetación, suelo, microorganismos (terrestres y acuáticos) y en menor medida, a la**

## **acción de animales superiores, sin la intervención de agentes artificiales.**

Los sistemas de baja carga, que constituyen el proceso de tratamiento natural más común hoy en día, contemplan la aplicación del agua residual sobre un terreno con vegetación para conseguir tanto el grado necesario de tratamiento del agua residual como el crecimiento de la vegetación existente. El agua aplicada puede consumirse por evapotranspiración o percolación vertical y horizontal en el terreno. (Metcalf y Eddy 1997)

La problemática del agua en Saltillo ha orillado al pequeño agricultor a usar el agua residual cruda indiscriminadamente con cualquier cultivo, sobretodo en la parte norte de la ciudad. Una alternativa de solución sería el dar un tratamiento natural al agua residual, lo que no implicaría una fuerte inversión.

En el presente trabajo se plantea el siguiente objetivo.

Objetivo:

- Selección del sistema de tratamiento de baja carga de acuerdo a la evaluación de la aptitud de los suelos de la Hacienda María de la Luz, ubicada en la Colonia Satélite Norte, en Saltillo, Coahuila.



## REVISIÓN DE LITERATURA

### Origen del problema

En el mundo está presente una crisis del agua. La causa de esta crisis puede ser atribuida a la escasez de la precipitación y limitación del recurso, en adición del aumento de la demanda, en los sectores agrícola, urbano e industrial, por otro lado la mayoría del agua disponible globalmente se utiliza en el riego de cultivos. La crisis se ha manifestado más en las zonas áridas y semiáridas, lo cual ha ocasionado que año con año se tengan pérdidas totales de producción agrícola temporal, por lo cual se debe buscar la reutilización del agua residual en lugar de eliminarla a los cuerpos de agua superficiales, ya que se puede contribuir a disminuir la contaminación del medio ambiente, además de un beneficio económico al aprovechar los nutrientes como nitrógeno y fósforo. (González *et al*, 2001)

Las aguas residuales son fundamentalmente las aguas de abastecimientos de una población, después de haber sido impurificadas por diversos usos. Desde el punto de vista de su origen, resultan de la combinación de los líquidos o desechos arrastrados por el agua, procedentes de las casas habitación, edificios comerciales e instituciones, junto con los provenientes de los establecimientos industriales, y las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que puede agregarse.

(<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fultex/epa/guiacurt/guiapoci.htm>)

La cantidad de agua o volumen de aguas residuales que se produzcan varía de acuerdo con la población y depende de muy diversos factores.

Un municipio exclusivamente residencial que tenga alcantarillas bien construidas a las que no entre el agua de precipitaciones pluviales, puede producir unos 160 litros por persona y por día, mientras que en una población industrial o que tenga un gasto de agua para uso doméstico muy alto, podrá producir unos 800 litros o más por persona y por día. En E. U. A. se considera como promedio razonable la cifra de 400 litros por persona y por día, aunque esta cifra tiende a aumentar por el uso cada vez mayor de máquinas automáticas de lavado de ropa, lavadoras de loza y molinos de basura. Naturalmente, el promedio es mucho mayor cuando las aguas pluviales entran a las alcantarillas que acarrean desechos domésticos e industriales.

Las aguas residuales pueden ser originadas por:

- Desechos humanos y animales
- Desperdicios caseros
- Corrientes pluviales
- Infiltraciones de aguas subterráneas
- Desechos industriales

En el medio ambiente cuando interaccionan el agua, el suelo, las plantas, microorganismos y la atmósfera, se producen procesos físicos, químicos y biológicos. Los sistemas de tratamiento natural se diseñan para aprovechar estos procesos con objeto de proporcionar tratamiento al agua residual. Los procesos que intervienen en los sistemas de tratamiento natural incluyen muchos de los utilizados en las plantas de tratamiento, sedimentación, filtración, transferencia de gases, adsorción, intercambio iónico, precipitación química, conversión y descomposición biológico, junto con procesos propios de los sistemas de tratamiento natural tales como la fotosíntesis, la fotooxidación, la asimilación por parte de las plantas. (Metcalf y Eddy, 1997)

## Los Sistemas de Tratamiento Natural en los Estados Unidos

El uso de los sistemas de tratamiento natural por aplicación a terrenos en Estados Unidos data de 1880. (ver Tabla 2.1) Al igual que en Europa, la aplicación directa del agua residual era una práctica relativamente común, en un primer intento de control de contaminación del agua. En la primera mitad del siglo XX estos sistemas se sustituyeron, principalmente, por sistemas de tratamiento con estaciones depuradoras o por: (1) granjas en las que el agua residual tratada se utilizaba para el riego de cultivos; (2) riego de parques y de jardines, o (3) recarga de acuíferos. Estos nuevos sistemas de aplicación al terreno tendían a predominar en la zona oeste, en la que el valor del agua residual como recurso hídrico constituía una ventaja adicional.

**Tabla 2.1.- Primeros sistemas de aplicación al terreno utilizados. (Metcalf y Eddy, 1997)**

Localidad	Fecha de inicio	Tipo de sistema	Superficie (ha)	Caudal m <sup>3</sup> / s
Estados Unidos				
Caliment City, MI	1888	Infiltración rápida	4.8	0.05
Ely, NV	1908	Riego	160	0.07
Fresno, CA	1891	Riego	1,600	1.14
San Antonio, TX	1895	Riego	1,600	0.88
VineInd, Nj.	1901	Infiltración rápida	5.6	0.04
Woodland, CA	1889	Riego	96	0.18

Características y objetivos de los sistemas de tratamiento natural.

Las principales características de los emplazamientos, los elementos típicos de diseño, y la calidad del agua tratada prevista para cada uno de los sistemas naturales empleados se comparan en las Tablas 2.2, 2.3, 2.4. En el caso del agua residual, es necesario llevar como mínimo, alguna operación de tamizado o de sedimentación primaria para eliminar los sólidos gruesos que pueden obstruir los sistemas de distribución y provocar condiciones desagradables. La necesidad de provocar un mínimo

nivel de tratamiento antes de la aplicación del agua residual dependerá de los objetivos del sistema y de las normas reguladoras aplicables a cada caso. La capacidad de tratamientos de fangos de los sistemas naturales es limitada, de modo que es preciso diseñar y gestionar los sistemas de acuerdo con la capacidad disponible.

Tabla 2.2.- Comparación de las características de la ubicación de los procesos de aplicación al terreno (Metcalf y Eddy, 1997)

<b>Características</b>	<b>Baja Carga</b>	<b>Infiltración Rápida</b>	<b>Riego Superficial</b>	<b>Terrenos Pantanosos</b>	<b>Tratamiento con plantas acuáticas</b>
Limitaciones climáticas	Suele ser necesario disponer de instalaciones de almacenamiento durante las lluvias y en tiempo frío.	Ninguna (posibles modificaciones en la explotación en condiciones de tiempo frío).	Suele ser necesario disponer de instalaciones de almacenamiento durante las lluvias y en tiempo frío.	En clima frío puede ser necesario almacenar el agua.	En clima frío puede ser necesario almacenar el agua.
Profundidad hasta el nivel freático	0.6 – 0.9 m (mínimo).	3.0 m (en los casos de que exista drenaje, se pueden adoptar profundidades menores).	No crítica.	No crítica.	No crítica.
Pendiente	Inferior al 15 por ciento en terrenos cultivados; inferior al 40 por ciento en terrenos no cultivados.	No es un factor crítico; las pendientes demasiado pronunciadas obligan a grandes movimientos de tierras.	Pendientes del 1- 8 por ciento	Normalmente inferior al 5 por ciento	Normalmente inferior al 5 por ciento
Permeabilidad del suelo	De moderada mente baja a moderada mente alta.	Alta (arenas, arenas margosas).	Baja (arcillas, limos y suelos con barreras impermeables).	Baja a moderada	Baja a moderada

Tabla 2.3. - Comparación de las características de diseño de diferentes procesos de aplicación al terreno. (Metcalf y Eddy, 1997)

Características	Baja Carga (Tipo 1)	Baja Carga (Tipo 2)	Infiltración rápida	Riego Superficial	Terrenos Pantanosos	tratamiento con plantas acuáticas
Técnicas de aplicación	Aspersión o superficial <sup>a</sup>	Aspersión o superficial <sup>a</sup>	Generalmente superficial	Aspersión o superficial	Aspersión o superficial	superficial
Carga hidráulica anual	1.70 – 6.0	0.6 – 2.0	6.0 - 9.0	7.3 - 56.7	5.5 - 18	5.5 - 18
Superficie necesaria, ha/ (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /d) <sup>b</sup>	6.0 - 21.4	18.2 - 58.8	0.4 - 6.0	0.65 - 4.8	1.90 - 6.6	1.90 - 6.6
Pretratamiento mínimo necesario	Sedimentación primaria <sup>c</sup>	Sedimentación primaria <sup>c</sup>	Sedimentación primaria	Desbaste	Sedimentación primaria	Sedimentación primaria
Evacuación del agua residual aplicada	Evapotranspiración y precolación	Evapotranspiración y precolación	Principalmente percolación	Escorrentía superficial y evaporación por algo de percolación	Evapotranspiración, percolación y escorrentía	Evapotranspiración, percolación y escorrentía
Necesidad de vegetación	Necesaria	Necesaria	Opcional	Necesaria	Necesaria	Necesaria

<sup>a</sup> Incluye riego por surcos y melgas

<sup>b</sup> La superficie necesaria no incluye la zona de amortiguación, ni los accesos y zanjas.

<sup>c</sup> Depende del uso del efluente y del tipo de cultivo.

Tabla 2.4.- Comparación de la calidad esperada del agua tratada procedente del sistema de tratamiento natural. (Metcalf y Eddy, 1997)

Constituyente	Valor, mg/l					
	Baja Carga <sup>a</sup>		Infiltración rápida <sup>b</sup>		Riego Superficial <sup>c</sup>	
	Media	Máximo	Media	Máximo	Media	Máximo
DQO	<2	<5	2	<5	10	<15
Sólidos suspendidos	<1	<5	0.5	<5	15	<25
Nitrógeno amoniacal, como N	<0.5	<2	0.5	<2	1	<3
Nitrógeno total, como N	3	<8	10	<20	5	<8
Fósforo total, como P	<0.1	<0.3	1	<5	4	<6

<sup>a</sup> Percolación del efluente primario o secundario a través de 1.5 m de suelo.

<sup>b</sup> Percolación del efluente primario o secundario a través de 4.5 m de suelo.

<sup>c</sup> Escorrentía del agua residual municipal a lo largo aproximadamente de 45 m de pendiente.

En los sistemas de baja carga el tratamiento se produce conforme el agua aplicada percola en el terreno. En la mayoría de los casos, el agua percolada alcanzará las aguas subterráneas, pero, en algunos casos, puede ser interceptada por aguas naturales superficiales o recuperada mediante sistemas de drenaje o pozos. El caudal aplicado por unidad de superficie de terreno (carga hidráulica), elección y control del tipo de vegetación dependen de los objetivos del sistema y de las condiciones particulares del emplazamiento. Los sistemas de baja carga suelen clasificarse en dos tipos, en función de los objetivos que pretenda alcanzar. Se considera que un sistema de baja carga pertenece al tipo 1 si el principal objetivo es el tratamiento del agua residual y la carga hidráulica aplicada no está controlada por la demanda de agua de la vegetación, sino por un parámetro de diseño que es la permeabilidad del terreno o carga de constituyentes. El principal objetivo del tipo 2 es la reutilización del agua residual, mediante producción de cosechas o por riego de espacios verdes, y se suelen conocer como sistemas de irrigación con agua residual o sistemas de irrigación de cultivos. El agua residual se puede aplicar tanto a cultivos como a vegetación (incluyendo terrenos forestales) mediante diferentes métodos de aspersion o mediante técnicas superficiales como el riego por surcos.

Para mantener en el terreno condiciones predominantemente aerobias, se emplean ciclos de aplicación intermitentes, generalmente variables entre 4 y 10 días. En la Tabla 2.4 se muestra que el valor relativamente bajo de las cargas aplicadas, junto con la presencia de vegetación y al ecosistema activo del suelo contribuyen a que los sistemas de baja carga tengan el mayor potencial de tratamiento de los sistemas de tratamiento natural.

En la Tabla 2.4 se puede observar que el potencial de tratamiento de los sistemas de infiltración rápida es algo inferior a los sistemas de baja carga, debido a la menor capacidad de retención de los suelos permeables y a las mayores cargas hidráulicas empleadas. (Metcalf & Eddy, 1997)

## Consideraciones fundamentales en la aplicación de los sistemas de tratamiento natural.

Para que el diseño y la explotación de los sistemas de tratamiento natural resulten satisfactorios, es fundamental el conocimiento de las características del agua residual, los mecanismos de tratamiento, la información relacionada con la salud pública y las normas reguladoras aplicables.

### Características del agua residual y mecanismos de tratamiento

El tratamiento del agua residual en los sistemas de tratamiento natural se consigue mediante procesos físicos, químicos y biológicos naturales que se desarrollan en el ecosistema suelo-agua-plantas. Los sistemas naturales son capaces de eliminar, hasta cierto punto, casi todos los constituyentes del agua residual considerados como contaminantes, sólidos suspendidos, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, elementos de traza, compuestos orgánicos de traza y microorganismos.

#### Sistemas de Baja Carga

El proyecto de sistemas de baja carga es un proceso que consta de dos etapas, el diseño preliminar, y el proyecto constructivo. Una vez definidas las características del agua residual y la normativa aplicable, se inicia la etapa del diseño preliminar. La etapa del proyecto constructivo comprende el dimensionamiento y distribución espacial de los componentes individuales del sistema, de aspersión, y sistemas de drenaje. (Metcalf y Eddy, 1997)

Entre los métodos de tratamiento en el terreno se incluyen habitualmente tres tipos:

- Infiltración lenta.
- Infiltración rápida.
- Flujo superficial.

La infiltración lenta tiene el mayor potencial de tratamiento de todos los sistemas de depuración en el terreno, debido a la aplicación de cargas relativamente bajas sobre suelo vegetado y a la existencia de un ecosistema muy activo en el suelo, a escasa distancia de la superficie.

El tratamiento mediante infiltración rápida, conocido en la literatura inglesa como RI (rapid infiltration), se define como la aplicación controlada de agua residual sobre balsas superficiales construidas en suelos de permeabilidad media a alta.

El tratamiento mediante flujo superficial, OF (*overland flow*), es adecuado para zonas con suelos relativamente impermeables. Consiste en forzar la escorrentía del agua residual sobre un suelo previamente acondicionado (en pendiente y vegetación), para ser posteriormente recogida mediante diques artificiales.

(<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind53/rys/rys.html#ryscap72>)

Sistemas de infiltración rápida. Los objetivos de diseño de los sistemas de infiltración rápida incluyen: (a) tratamiento del agua seguido de la recarga de acuíferos, para aumentar los recursos hídricos o evitar la intrusión de aguas salinas; (b) tratamiento del agua seguido de su recuperación mediante sistemas de drenaje inferior o extracción por el bombeo, y (c) tratamiento del agua seguido por circulación subterránea y descarga a aguas superficiales.

Riego superficial. En los sistemas de riego superficial, el agua residual se distribuye en la zona superior de terrenos vegetados con pendientes cuidadosamente seleccionadas, de modo que pueda fluir en la superficie hasta unas zanjas de recogida escorrentía superficial situadas en el terreno de la pendiente.

([http://www.igme.es/internet/web\\_aguas/igme/publica/libro33/pdf/lib33/cap\\_3.pdf](http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/libro33/pdf/lib33/cap_3.pdf))



## Evaluación y elección del emplazamiento.

En la Tabla 2.5 se muestran las principales características del emplazamiento y los criterios generales empleados para la elección de un emplazamiento. La permeabilidad y la altura de la columna de suelo hasta alcanzar las aguas subterráneas, y la presencia de un estrato impermeable o de roca, son, normalmente, las características más importantes al momento de determinar la aptitud de un terreno para la instalación de un sistema de baja carga.

**Tabla 2.5.- Características del emplazamiento y criterios de selección en un sistema de baja carga. (Metcalf y Eddy, 1997)**

Características	Aptitud		
	Optima	Conveniente	Pobre
Suelo			
pH	5.5 - 8.4	5.2 - 5.5	< 5.2; > 8.4
PSI (%)	<5	5 - 10	> 10 <sup>a</sup>
CE (dS/cm)	<4	4 - 8	> 8
Permeabilidad, mm/hr	5 - 50	1.5 - 5; 50 - 150	< 1.5; > 150
Profundidad hasta el nivel freático (m)	> 1.5	0.6 - 1.5 <sup>b</sup>	< 0.6
Pendiente	0.2	2 - 15	> 15 <sup>c</sup>
Uso del terreno	Agrícola	Baja intensidad	Urbano - Industrial <sup>d</sup>
Hidrología del terreno	Sin riesgo de inundación	Bajo riesgo de inundación	Elevado riesgo de inundación

<sup>a</sup> > 20 para sólidos gruesos

<sup>b</sup> Puede ser necesario el drenaje subsuperficial.

<sup>c</sup> > 30 en emplazamiento no cultivados.

<sup>d</sup> Con elevados niveles de pretratamiento, se puede llevar a cabo de riego de espacios verdes y campos de golf.

### Tratamiento previo a la aplicación.

El tratamiento en sistemas de baja carga se debe considerar como un proceso unitario a combinar con otros procesos para conseguir un sistema de tratamiento completo del agua residual. El tratamiento previo a la aplicación es necesario por una serie de razones que incluyen la protección de la salud pública, el control de condiciones desagradables, las limitaciones de los sistemas de distribución, la reducción de la

presencia de constituyentes de limitantes del agua residual, y aspectos relacionados con los cultivos. El grado de tratamiento previo puede variar desde el tratamiento primario al avanzado y depende del tipo de sistema de baja carga empleado. Para los sistemas del tipo 1, el tratamiento previo debería ser el mínimo necesario para asegurar que no se presenten riesgos para la salud pública ni se produzcan condiciones desagradables. Para este tipo de sistemas, el pretratamiento mínimo recomendado es el tamizado y la sedimentación primaria. Los sistemas tipo 2 están diseñados para favorecer la reutilización del agua residual, y mayor flexibilidad en el manejo de la misma. Ello hace que los sistemas tipo 2 requieran un nivel de tratamiento previo a la aplicación mas elevado. (Aceves, 1979)

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Reconocimiento del Área de Estudio

#### Localización Geográfica

El experimento se realizó en la Hacienda María de la Luz, Col. Satélite Norte, en Saltillo, Coahuila. Se localiza en las coordenadas geográficas 25° 27. 28' latitud norte, 101° 00. 49' longitud oeste y a una altitud de 1522 m. s. n. m. (Figura 3.1) Debido a que pasa por allí el arroyo de la ciudad y que todavía en la hacienda riegan con agua de pozo. Los cultivos establecidos en la hacienda son: acelga, cebolla, lechuga, rábano, zanahoria. El tipo de riego que utilizan es superficial.

#### Clima

De acuerdo con la clasificación de Koepe, el clima de la región comprendida para Saltillo, Coahuila, es representado por Bso K(x')(e); donde los términos significan:

Bso.- Es el más seco de los BS, con un coeficiente de  $P/T(22.9)$ .

K.- Templado con verano cálido, temperatura media anual entre los 12 y los 18° C, la del mes más frío entre los -3 y 18° C y la del mes más caliente de 18° C.

x' .- Régimen de la lluvia intermedia entre verano e invierno.

La precipitación media anual es de 345 milímetros  
e.- extremo con oscilación entre 7 y 14° C

La evaporación promedio mensual es de 178 mm. Siendo la evaporación más fuerte en los meses de mayo y Junio con 236 y 234 mm. (Estrada, 2000)



Figura 3.1.- Aspecto general del área de estudio

## **Estudio Topográfico**

Los estudios realizados de altimetría, para el desarrollo del presente trabajo fue una nivelación de perfil para el cálculo de la pendiente del terreno y las cotas del terreno. (Figura 3.2)

La pendiente en los Sistemas de Baja Carga influye en la selección del emplazamiento, debido que para terrenos cultivados debe ser menor de 15 por ciento y para terrenos no cultivados debe ser menor al 40 por ciento, estas limitantes son para aplicación de riego superficial o por goteo, ya que para el riego por aspersión la pendiente puede ser hasta un 40 por ciento.

La pendiente en los Sistemas de Baja Carga es muy importante, debido a que si esta es muy grande y se aplica el riego superficial, la percolación sería poca, la velocidad del agua sería muy rápida y esto provocaría erosión en el suelo.

### Estudio de Suelo

En la parcela donde se realizó el presente trabajo se tomaron dos muestras a diferentes profundidades la primera de 0 a 30 centímetros y la segunda de 30 a 50 centímetros donde el suelo contenía más arena y presentaba pedregosidad, para hacerle posteriormente los análisis químicos a ambas muestras con los resultados obtenidos se hicieron cálculos para obtener el Por ciento de Sodio Intercambiable.

En los sistemas de baja carga se podrían presentar problemas si los resultados son suelos arenosos ya que estos inertes desde el punto de vista químico, carecen de propiedades coloidales y de reservas de nutrientes. En cuanto a las propiedades físicas presentan mala estructuración, buena aireación, muy alta permeabilidad y nula retención de agua. Los suelos limosos tienen nula estructuración, sin propiedades coloidales, son impermeables y con mala aireación.

Por el contrario, si los análisis químicos resultaran suelos arcillosos, estos son muy activos desde el punto de vista químico, adsorben iones y moléculas, flocculan (la fracción arcilla permanece inmóvil) y dispersan (migran), muy ricos en nutrientes, retienen mucha agua, bien estructurados. (Caballero, 1981)

Figura 3.2.- Plano general del área de estudio.

### pH

El pH en la selección de los Sistemas de Tratamiento de Baja Carga ya sean pHs bajos o altos (suelos ácidos o alcalinos) es un factor limitante en el crecimiento de los cultivos, porque al aplicar el agua estos producen procesos físicos, químicos y biológicos. Tales como: adsorción, intercambio iónico, precipitación química, descomposición biológica, oxidación y reducción química.

El pH tiene un límite para seleccionar un sistema de tratamiento de baja carga, para que este sea el adecuado de estar de 5.5 a 8.4, sería la mejor opción donde no habría ningún problema, el segundo rango conveniente sería de 5.2 a 5.5 y el poco indicado sería menor de 5.2 y mayor de 8.4. (ver Figura 3.3)





Figura 3.3.- Potenciómetro midiendo un pH de 7.81

#### Conductividad Eléctrica del Suelo

La Conductividad Eléctrica en la selección de los Sistemas de Tratamiento de Baja Carga es un parámetro esencial ya que para los suelos salinos esta limita el crecimiento de los cultivos, mientras que suelos con elevados porcentajes de sodio intercambiable en suelos salinos pueden ver reducida su permeabilidad. (Ver figura 3.4)

La Conductividad Eléctrica para la selección de los Sistemas de Tratamiento de Baja Carga tiene como rango óptimo menor de 4 mmhos/cm, sería conveniente utilizar

una Conductividad Eléctrica de 4 a 8 mmhos/cm y la no muy indicada es la de mayor de 8 mmhos/cm.



Figura 3.4.- Medición de la Conductividad Eléctrica

## Textura

La textura en la selección de Sistemas de Tratamiento de Baja Carga, es muy importante debido a que los suelos con textura gruesa (arenas) tienen una elevada permeabilidad y permiten transmitir grandes cantidades de agua, razón por la cual se pueden aplicar cargas hidráulicas elevadas, sin embargo su capacidad de retención de

humedad es limitada y puede limitar la carga hidráulica admisible, más por causa de factores de diseño limitativos que por aspectos relacionados por la permeabilidad.

Los suelos de textura media, clasificados entre arcillas, margosas y margas arenosas, tienen una permeabilidad media.

Los suelos de textura fina (arcillas) y suelos con estratos inferiores cementados tienen permeabilidades bajas.

#### Aniones y cationes

Estos son muy importantes en la selección de un Sistema de Tratamiento de Baja Carga, ya que teniendo estos en un análisis químico de suelo se puede calcular el Por ciento de Sodio Intercambiable. El Por ciento de Sodio Intercambiable es importante en la selección de un Sistema de Tratamiento de Baja Carga, ya que cuando el por ciento de sodio intercambiable es muy elevado en suelos sódicos, reduce la permeabilidad del suelo. (Ver figura 3.5)

Sin embargo, esta característica química se puede modificar mediante la aplicación de técnicas de recuperación, si esta resulta económicamente justificable.

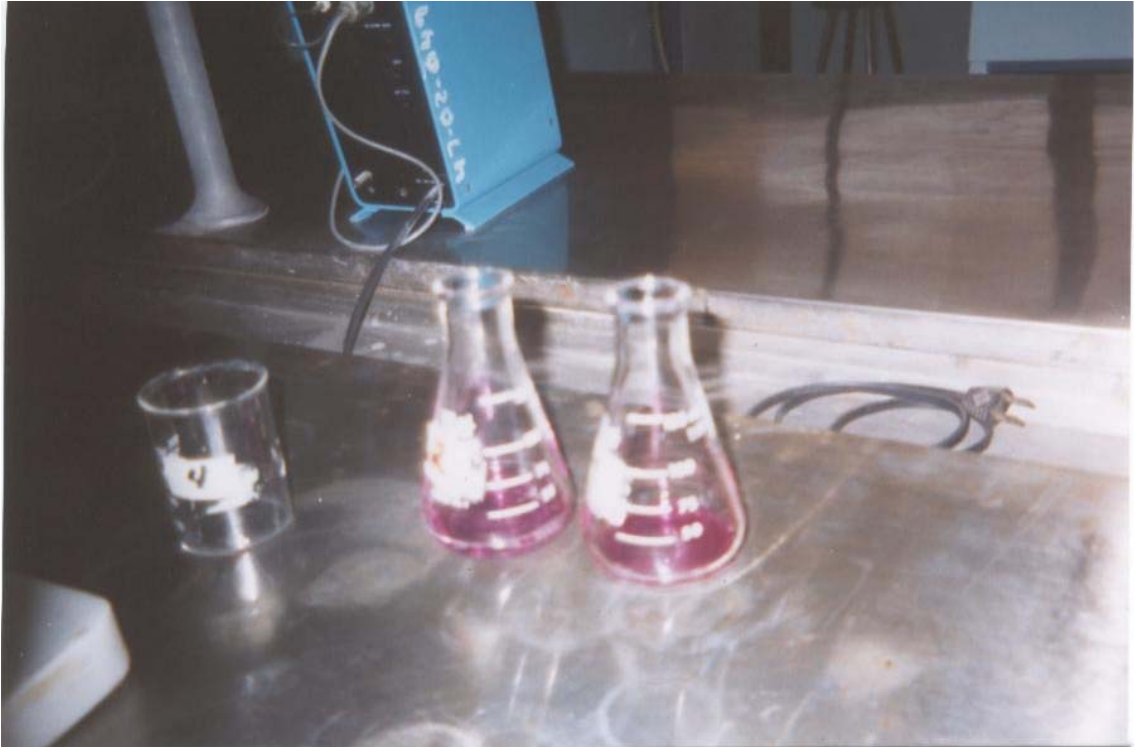


Figura 3.5.- Determinación de calcio, magnesio y sodio.

### Infiltración

La capacidad de infiltración de un suelo es medida de diferentes formas, sin embargo, su determinación dependerá de la utilización que se pretenda dar a la ecuación que se obtenga ya que en el diseño de los sistemas de riego es considerada como la parte más importante pues la lámina por aplicar debe ser menor que su velocidad de penetración para que pueda infiltrarse normalmente y no provocar encharcamiento, esta es determinada de dos maneras básicamente como son:

- Método de los cilindros infiltrómetros (Ver figura 3.6)
- Método de entradas y salidas



Figura 3.6.- Cilindros infiltrómetros

El método de campo realizado fue el Método de los Cilindros Infiltrómetros. Este método es uno de los más comúnmente utilizados para determinar la capacidad de infiltración del suelo, el método consiste en utilizar un par de estructuras metálicas en forma de tubos con diferente diámetro que puede variar de 40 a 60 centímetros de largo y 30 centímetros de diámetro, estos deben ser lo suficientemente resistentes para que penetren en el suelo en forma concéntrica, así mismo los cilindros son introducidos en el suelo a una profundidad de 15 centímetros como se muestra en la figura. Al realizar la prueba esta debe realizarse en lugares representativos del área que se requiere estudiar.

Cilindros infiltrómetros para determinar la infiltración de un suelo. Una vez instalado, el inicio de la prueba consiste en aplicar agua en el espacio formado por los dos cilindros con el propósito de evitar el movimiento lateral del agua contenida en el cilindro interior, esto es importante ya que se pueden tomar las lecturas de la carga del agua que no corresponden a las reales lo que afecta seriamente a la prueba.

Posteriormente se agrega agua al cilindro interior procurando que la lámina de agua no exceda la carga esperada durante un riego normal que varía de 10 a 20 centímetros, en ese momento se procede a la toma de datos como es la profundidad de la lámina de agua desde el borde superior del cilindro interior al espejo del agua de dicho cilindro, así mismo es importante registrar la hora de inicio de la observación, durante este proceso se continúa tomando tiempos a criterio repetidamente a intervalos cortos al principio (1 minuto).

Después se continúa con los espacios más grandes (2, 3, 4, 5 minutos) conforme avanza la prueba hasta concluirla, es importante registrar las lecturas y los tiempos respectivos en cada observación, si es necesario recargar agua al cilindro interior debe registrarse la nueva lectura y continuar con el mismo procedimiento hasta alcanzar la infiltración básica del suelo, se recomienda elaborar un formato para la toma de datos.

Los datos obtenidos se procesan para determinar la ecuación de infiltración del suelo mediante los procedimientos que se analizarán a continuación:

Determinación de la ecuación de infiltración. La ecuación de infiltración se determina a partir de los datos obtenidos en las pruebas de campo, el análisis de la información puede realizarse por dos procedimientos:

- Método gráfico
- Método numérico

Si se sabe que la ecuación de la capacidad de infiltración, es una función exponencial negativa que puede ser linealizada mediante logaritmos, esto se efectúa como se señala en la ecuación:

Si la ecuación de infiltración es:

$$V_i = Kt^n \quad (1)$$

Al aplicar los logaritmos se tiene:

$$\text{Log } V_i = \text{Log } K + n \text{Log}(t) \quad (2)$$

Cuando es linealizada queda:

$$y = a + bx \quad (3)$$

la ecuación anterior corresponde a la línea recta

Donde:

$$y = \text{Log } (V_i) \quad (4)$$

$$a = \text{Log } (K) \quad (5)$$

$$b = n \quad (6)$$

$$x = \text{log } (t) \quad (7)$$

Conocido el principio teórico de infiltración, esta se analizará de acuerdo a la forma de determinarla mediante los métodos:

Método Gráfico. Este método se basa en que la información registra de campo se procesa para obtener pares de datos compuestos por las variables de tiempo (t) y velocidad de infiltración ( $V_i$ ), las cuales se definen a continuación:

T = tiempo acumulado de infiltración

$V_i$  = se considera la diferencia entre lecturas sucesivas de láminas de agua por la diferencia entre tiempos de observación.



Una vez que se tienen los pares de datos previamente determinados, para conocer la capacidad de infiltración, es necesario graficar en papel milimétrico dichos pares colocando en el eje de las ordenadas la velocidad de infiltración y en el eje de las abscisas el tiempo acumulado, al graficarse se puede observar que el comportamiento de la curva es de forma descendente, esto indica que la velocidad de infiltración disminuye a medida que el tiempo se incrementa.

Método numérico. El método numérico para determinar la ecuación de infiltración se basa en la utilización del método de los mínimos cuadrados para el ajuste lineal, este consiste en linealizar los datos de la ecuación de velocidad de infiltración como se explico anteriormente, es decir a los datos de campo será necesario identificarlos con los siguientes términos:

$\Sigma x$  = Sumatoria de tiempo acumulado

$\Sigma x^2$  = Sumatoria de cuadrado de tiempo acumulado

$\Sigma y$  = Sumatoria de capacidad de infiltración

$\Sigma xy$  = Sumatoria de la multiplicación de tiempo acumulado por capacidad de infiltración

N = Número de observaciones

Los parámetros para la ecuación de capacidad de infiltración se calculan mediante la aplicación de los siguientes modelos:

Determinación de la pendiente (n):

Para determinar el valor de la pendiente (n), es necesario aplicar la siguiente ecuación.

$$n = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{N}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N}} \quad (8)$$

A partir de la información anterior es posible determinar el modelo de la infiltración acumulada (Z), una vez realizada la metodología explicada anteriormente donde se calcula la constante de infiltración acumulada (K'), queda como se indica a continuación:

$$K' = \frac{K}{(n+1)60} \quad (9)$$

Finalmente quedando como:

$$V_i = K' t^{n+1} \quad (10)$$

(Rojas y Ramírez, 1998)

### Profundidad hasta el nivel freático

La profundidad hasta el nivel freático es igual al nivel dinámico del pozo, a lo que se refiere es que si se conoce el nivel dinámico, se conoce la profundidad hasta el nivel freático.

Para el tratamiento del agua residual es necesario disponer de una profundidad mínima de 0.9 a 1.2 metros, pero para cultivos de raíces profundas se necesitan profundidades mayores. Para profundidades mayores será necesario disponer de un sistema de drenaje inferior.

Para que la aptitud de la selección del Sistema de Tratamiento de Baja Carga sea óptima la profundidad hasta el nivel freático debe ser mayor de 1.5 metros, para sea conveniente de estar de 0.6 a 1.5 metros y la que no es muy recomendable cuando es menor de 0.6 metros.

#### Hidrología del terreno

El drenaje de tierras de tierras agrícolas se refiere a la operación para remover cualquier exceso de agua en la superficie del suelo, para prevenir que el agua en exceso entre sobre las tierras agrícolas y para remover el exceso de agua recogida fuera del área y a una salida propia. Son suelos profundos que tiene un buen drenaje y no habría problemas de inundación ya que tiene buena permeabilidad el suelo. (Estrada, 2000)

Este parámetro es muy importante ya que para el emplazamiento ideal para un sistema de baja carga debería estar situado a una zona no susceptible de inundación y en la que el acceso público este controlado.

#### Uso del Terreno

Este parámetro es importante en la Selección de Tratamiento de Baja Carga debido a que si es un terreno agrícola será el más apto para la instalación, porque el acceso público es controlado.

Si este fuera urbano e industrial, el acceso público no se podría controlar y la protección a la salud obligará a practicar un elevado grado de desinfección.

## **Estudio de Agua**

### **Calidad**

Este parámetro es de enorme interés en ecología, junto a la temperatura y la humedad, porque a ellos responden la mayoría de los seres vivos.

Los análisis químicos del agua sirven para saber la calidad, ya que esta es muy importante debido a que a la hora de aplicarla a los cultivos esta no los dañe y no afecte al suelo.

Pero para la selección de un Tratamiento de Baja Carga este no es un parámetro limitante, dado que para la selección el parámetro limitante sería el suelo.

### **Disponibilidad**

El agua disponible no es de mucha importancia como la aptitud del suelo para la selección de un Tratamiento de Baja Carga, el suelo es el que determina cual es el tipo de tratamiento de baja carga que se va aplicar.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El estudio de suelo en los sistemas de tratamiento de baja carga es de gran importancia debido a que es el que determina el tipo de tratamiento que se llevará en el terreno. Los resultados de

los criterios considerados para la selección de un sistema de baja carga se muestran en la Tabla 4. 1.

Tabla 4. 1.- Resultados de las características del sitio seleccionado.

Características	Muestra 1	Muestra 2
Profundidad (cm)	0 – 30	30 – 50
pH	8.01	7.81
PSI (%)	0.006	0.47
CE dS/m	1.66	1.49
Permeabilidad (mm/hr)	37	37
Profundidad hasta el nivel freático (m)	54	54
Pendiente (%)	0.4	0.4
Uso del terreno	Agrícola	Agrícola
Hidrología del terreno	Sin riesgo de inundación	Sin riesgo de inundación

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 4. 1, la muestra 1 se tomó de una profundidad de 0 a 30 centímetros, dando como resultados suelos de textura Migajón-Arcilloso, son suelos de textura áspera, con pH medianamente alcalinos, de una buena Conductividad Eléctrica, con una infiltración media, un buen drenaje y de uso agrícola.

La muestra 2 se tomó de una profundidad de 30 a 50 centímetros, presentando pedregosidad, de textura Migajón –

Arcillo – Arenoso, son suelos con pH medianamente alcalinos, de mediana disponibilidad de agua para las plantas, tienen una infiltración media, la labranza para ese tipo de suelos es fácil, tiene un buen drenaje y es de uso agrícola.

Una vez terminados los análisis de los criterios considerados para la selección de los sistemas de tratamiento de baja carga, se procedió a comparar los resultados con los mencionados por Metcalf y Eddy (1997). Esta comparación es mostrada en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2.- Comparación de los criterios de selección contra los resultados obtenidos

Características	Aptitud			Muestra 1	Muestra 2
	Optima	Conveniente	Pobre		
Profundidad (cm)				0 – 30	30 – 50
pH	5.5 - 8.4	5.2 - 5.5	<5.2;>8.4	8.01	7.81
PSI (%)	<5	5 - 10	>10	0.006	0.47
CE dS/m	<4	4 - 8	>8	1.66	1.49
Permeabilidad (mm/hr)	5 - 50	1.5 – 5; 50 - 150	<1.5; >150	37	37
Profundidad hasta el nivel freático (m)	>1.5	0.6 – 1.5	<0.6	54	54
Pendiente	0.2	2 – 15	>15	0.4	0.4
Uso del terreno	Agrícola	Baja intensidad	Urbano-Industrial	Agrícola	Agrícola
Hidrología del terreno	Sin riesgo de inundación	Bajo riesgo de inundación	Elevado riesgo de inundación	Sin riesgo de inundación	Sin riesgo de inundación

Comparando los criterios de selección de los Sistemas de Baja Carga, mencionados por Metcalf y Eddy (1997) con los resultados de la Tabla 4.2, se observa que son suelos aptos para la instalación de un sistema de tratamiento de baja carga de cualquiera de los dos tipos.

Se selecciona el tratamiento de baja carga de tipo 2, debido a que el objetivo de este tipo de tratamiento es reutilizar el agua



residual y a el agricultor le convendría más reutilizarla que tratarla, porque el riega con un agua de mejor calidad y al reutilizarla tendría una fuente adicional de agua y nutrientes.

En este caso no se opto por el tratamiento de baja carga de tipo 1, debido a que tendría que hacer una inversión para tratarla, pero para que la va a tratar si tiene agua de mejor calidad y en Saltillo se va hacer una planta tratadora de aguas residuales.

La calidad del agua no es un estudio que determine el tipo de tratamiento, pero es necesario saber su calidad y disponibilidad, para eliminar ciertos elementos que puedan dañar al suelo y a los cultivos. En la Tabla 4.3 se observa la calidad del agua de riego de la Hacienda María de la Luz.

Tabla 4.3 .- Análisis químico de la muestra de agua:

<b>pH</b>	7.36
C. E. dS/m	1.36
Carbonatos meq/l	0.9
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq/l	3.9
Ca <sup>++</sup> meq/l	7.2
Mg <sup>++</sup> meq/l	7.32
Cl <sup>-</sup> meq/l	4.06
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> meq/l	11.03
Na <sup>+</sup> meq/l	0.15

Calidad del agua:

Salinidad efectiva = 12.69

Salinidad Potencial = 9.57

Carbonato de Sodio Residual = 0.00

Por ciento de Sodio Posible = 1.18

Relación de adsorción de Sodio = 0.06

En Salinidad Efectiva = Condicionada

En Salinidad Potencial = Condicionada

En Carbonato de Sodio Residual = Buena

En Boro = Buena

En Cloro = Condicionada

Clasificación del agua según el USDA:

C3 = Alto

S1 = Bajo

Agua Altamente Alcalina (C3). No puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales de control de salinidad, debiendo por lo tanto, seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a las sales.

Agua Baja en Sodio (S1). Puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos, con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales o aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

En las Tablas 4.4 y 4.5 se mencionan los tipos de cultivos tolerantes y semitolerantes a este tipo de agua.

Tabla 4.4.- Los cultivos tolerantes a este tipo de agua

<b>Cultivo</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
Espinaca	66.54
Betabel	78.66
Pasto Ryegrass	94.18
Centeno Silvestre	77.26

Tabla 4.5.- Los cultivos semitolerantes a este tipo de agua son:

<b>Cultivo</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
Maíz	45.69
Arroz	59.19

Trigo	97.36
Caña de Azúcar	73.26
Lechuga	34.18

Continua.....  
 .....continuación

Pepino	98.87
Tomate	61.78
Brócoli	72.64
Cebolla	15.64
Zanahoria	24.64
Vid	53.02
Alfalfa	68.82

En el apéndice de la página 39 se encuentra el comportamiento de la velocidad de infiltración en el suelo.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de los análisis en el suelo ( $pH_1=8.01$  y  $pH_2=7.81$ ;  $PSI_1= 0.006\%$  y  $PSI_2=0.47\%$ ;  $CE_1= 1.66$  dS/m y  $CE_2= 1.49$  dS/m; permeabilidad<sub>1y 2</sub> = 37 mm/hr; profundidad hasta el nivel freático = 54 m, pendiente = 0.4 %, uso del terreno es principalmente agrícola y la hidrología del terreno no tiene riesgo de inundación) se concluye que los suelos ligeramente salinos, de textura Migajón-Arcillo-Arenoso, de tacto áspero, con una infiltración media y disponibilidad de agua media en las plantas, con buen drenaje y de labranza fácil. Comparando estos resultados con los criterios de selección que involucran a los parámetros analizados se concluye que es posible aplicar los dos tipos de tratamiento de baja carga.

Así mismo se tiene que para el sitio de estudio es más conveniente implantar el sistema de tratamiento de baja carga de tipo 2, ya que su objetivo es reutilizar el agua residual en la aplicación de cultivos.

En ese sitio no es conviene implantar el sistema de baja carga de tipo 1, debido a que su objetivo de este tipo de tratamiento es tratar el agua residual y ahí tienen agua de mejor calidad

## RECOMENDACIONES

- Se le recomienda al agricultor, el uso de sistemas de tratamiento de baja carga como una alternativa para enfrentar la problemática del agua en Saltillo, sugiriendo su uso en la agricultura, ya que de acuerdo a las características físicas y químicas del suelo es un terreno apto para regar con aguas residuales, haciendo énfasis en que se tendrá que establecer otro tipo de cultivos principalmente forrajeros y/o forestales.

## LITERATURA CITADA

Aceves N.E. 1979. El Ensalitramiento de los Suelos Bajo Riego, (Identificación, control, combate y adaptación). Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 382 p.

Caballero C. H., Iñiguez J. G. y Córtez J. J. M. 1981. Manual Teórico Practico de uso y Conservación del agua. UAAAN. Depto. Riego y Drenaje. Buenavista, Saltillo, Coahuila. Pág. 45-52

Estrada L. M. A. 2000. Tesis. Reubicación, Rehabilitación y Acondicionamiento de un Simulador de Drenaje. U.A.A.A.N. Saltillo, Coahuila. PP 8 - 27.

González T. J., Delijorge G. J. A. y Vázquez L. A. 2001. Recuperación y reutilización de las aguas residuales en la producción agrícola y pecuaria en las zonas áridas. Memoria. XI Congreso Nacional de Irrigación. Memoria. Pág. 206.

<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fultex/epa/guiacurt/guiaopci.htm>

<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind53/rys/rys.html#ryscap72>

[http://www.igme.es/internet/web\\_aguas/igme/publica/libro33/pdf/lib33/cap\\_3.pdf](http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/libro33/pdf/lib33/cap_3.pdf)

Metcalf y Eddy. 1996. Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw-Hill. Interamericana editores, S.A. de C.V. Tomo 1. PP 221 – 507.

Metcalf y Eddy. 1997. Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Edit. McGraw Hill. Tomo 2. México.

Palacios V.O. y E. Aceves N. 1970. Instructivo para el muestreo, Registro de Datos e Interpretación de la Calidad del Agua Para Riego y Drenaje. Serie de Apuntes No 15. Colegio de Postgraduados. Escuela Nacional de Agricultura S.A.G. Chapingo México. 49 p.

Rojas P.L. y Ramírez R.L.E. 1998. Uso y Manejo del Agua. UAAAN. Depto. Riego y Drenaje. Buenavista, Saltillo, Coahuila. Págs. 79 – 89.

Seoanez C. M. 1999. Ingeniería del medio ambiente aplicada al medio natural continental. Ediciones Mundi – prensa. 2ª Edición. PP 357 – 359.



## A P É N D I C E A

COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN Y LA  
INFILTRACIÓN ACUMULADA EN EL SUELO

### Grafica de la Velocidad de Infiltración

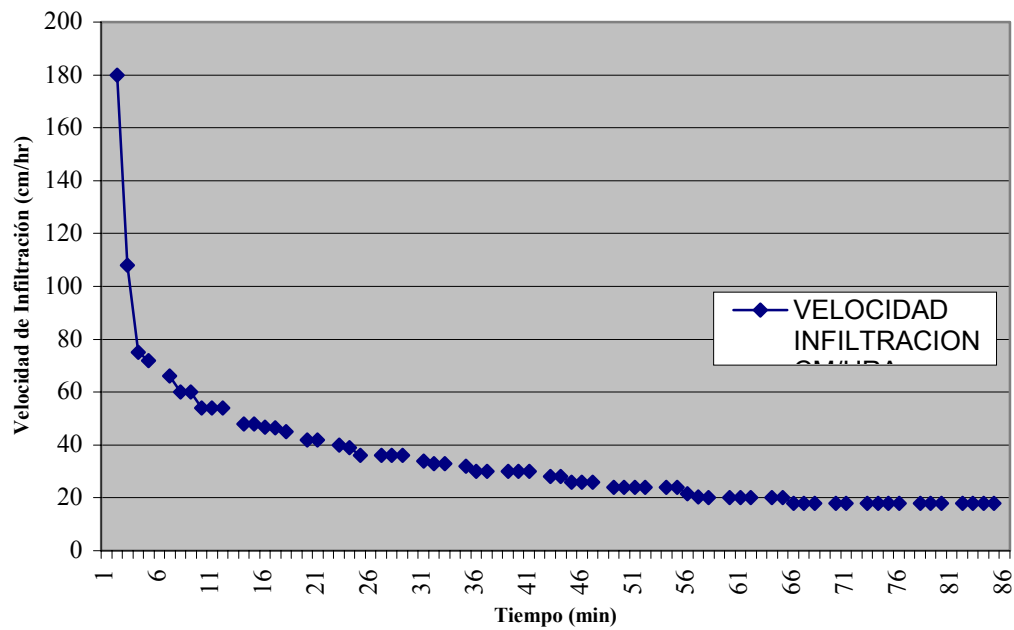


Figura 8.- Grafica de Capacidad de Infiltración

Ecuación de la velocidad de infiltración

$$V_i = 50.9 t^{-0.42}$$

Grafica logarítmica de Velocidad de Infiltración

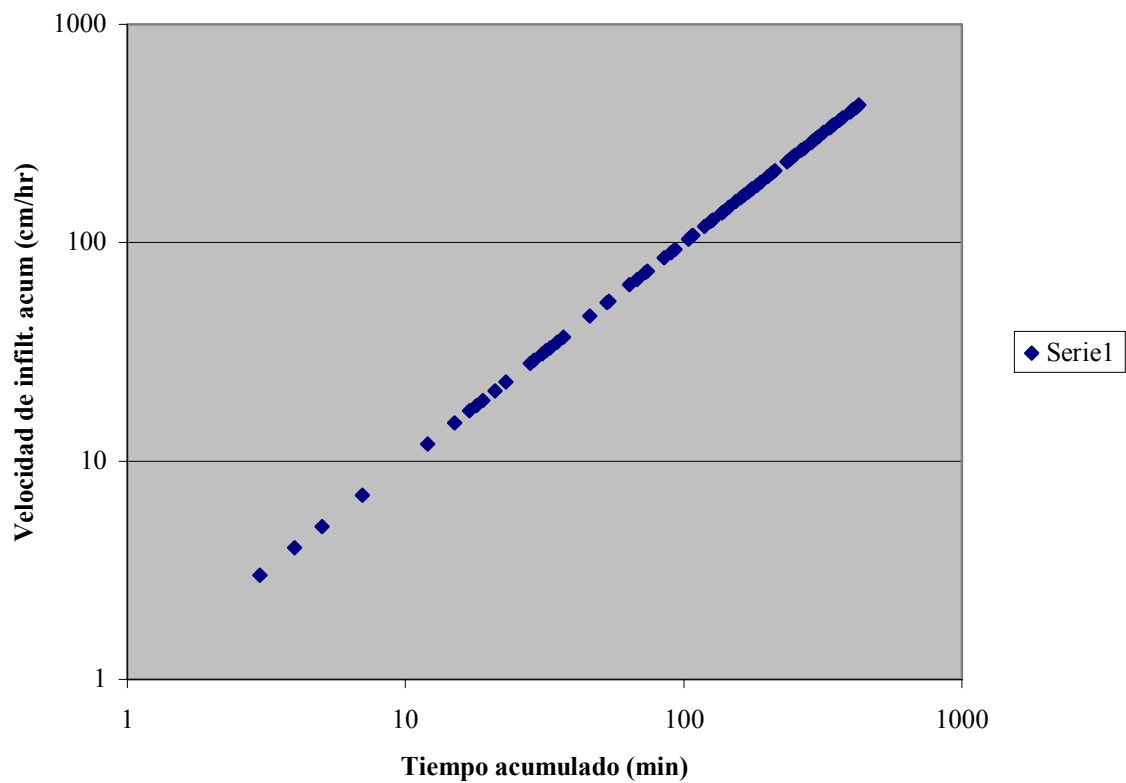


Figura 9.- Grafica de Capacidad de Infiltración e Infiltración Acumulada

Ecuación de la infiltración acumulada

$$Z = 1.46t^{0.58}$$