



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA  
SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS**

**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE AGUA DE TRES EFLUENTES  
PROVENIENTES DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES "ING. ARTURO PAZOS SOSA" PARA SU  
REUTILIZACION EN EL RIEGO DEL CULTIVO DE PEPINO *Cucumis  
sativus L.***

**INGA. AGRA. ALMA MARITZA GARCIA CHACLAN**

**GUATEMALA, ENERO DE 2006**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y  
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)



**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE AGUA DE TRES EFLUENTES  
PROVENIENTES DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES "ING. ARTURO PAZOS SOSA" PARA SU REUTILIZACIÓN  
EN EL RIEGO DEL CULTIVO DE PEPINO *Cucumis sativus L.***

## **ESTUDIO ESPECIAL**

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA  
SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

**INGA. AGRA. ALMA MARITZA GARCIA CHACLAN**

COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAESTRO EN RECURSOS HIDRÁULICOS, OPCIÓN CALIDAD DEL AGUA  
(MAGISTER SCIENTIFICAE)

GUATEMALA, ENERO DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y  
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)



**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE AGUA DE TRES EFLUENTES  
PROVENIENTES DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES "ING. ARTURO PAZOS SOSA" PARA SU REUTILIZACIÓN  
EN EL RIEGO DEL CULTIVO DE PEPINO *Cucumis sativus L.***

## **ESTUDIO ESPECIAL**

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA  
SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

**INGA. AGRA. ALMA MARITZA GARCIA CHACLAN**

COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAESTRO EN RECURSOS HIDRÁULICOS, OPCIÓN CALIDAD DEL AGUA  
(MAGISTER SCIENTIFICAE)

GUATEMALA, ENERO DE 2006

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR



Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

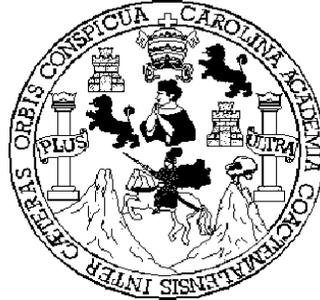
**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE AGUA DE TRES EFLUENTES  
PROVENIENTES DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES "ING. ARTURO PAZOS SOSA" PARA SU  
REUTILIZACIÓN EN EL RIEGO DEL CULTIVO DE PEPINO *Cucumis  
sativus L***

tema que fue autorizado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) en julio de 2004

**Inga. Agra. Alma Maritza García Chaclán**

Guatemala, enero de 2006

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR



### NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

|            |                                  |
|------------|----------------------------------|
| DECANO     | Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos  |
| VOCAL I    |                                  |
| VOCAL II   | Lic. Amahán Sánchez Álvarez      |
| VOCAL III  | Ing. Julio David Galicia Celada  |
| VOCAL IV   | Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz   |
| VOCAL V    | Br. Elisa Yasminda Vides Leiva   |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivonne Veliz Vargas |

### DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS

MSc. Ing. Pedro Saravia Celis

### TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

|            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| EXAMINADOR | MSc. Ing. Zenón Much Santos        |
| EXAMINADOR | MSc. Ing. Adán Pocasangre Collazos |
| EXAMINADOR | MSc. Ing. Joram Matías Gil Laroj   |

### ASESOR DE ESTUDIO ESPECIAL

Ing. MSc. Zenón Much Santos

## **DEDICATORIA**

**A:**

**DIOS**

Fuente de sabiduría y amor, por darme el conocimiento y la fortaleza para lograr mis objetivos y metas.

**Mi familia**

**GABRIEL GARCÍA SÁNCHEZ (Q.E.P.D)  
MAXIMINA CHACLÁN RIVAS DE GARCÍA  
CLARA LIDIA GARCÍA CHACLÁN  
SANDRA VERONICA GARCÍA CHACLÁN  
SONIA ELIZABETH GARCÍA CHACLÁN  
JAVIER ESTUARDO GARCÍA CHACLÁN**

Por ser los seres que más he amado en mi vida y con quienes he compartido alegrías y tristezas, y mis triunfos y derrotas. Con todo mi amor

## **AGRADECIMIENTOS**

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS)

Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA)

Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina"  
de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

Laboratorio de Agua del Plan de Acción para la Modernización y Fomento  
de la Agricultura bajo Riego (PLAMAR)

Mi asesor MSc. Ing. Zenón Much Santos

Mis evaluadores: MSc. Ing. Joram Gil y Dr. Adán Pocasangre

Ing. Agr. Wotzbelí Méndez

Señor Tereso de Jesús Pérez

Señor Leonardo Contreras

Señor Moisés Dubón

Mis compañeros y amigos de la Maestría, especialmente a Bárbara, Manlia,  
Isabel, Víctor, René, Paris, Ramón, Juan Carlos, Eugenio, Reinaldo, Alvaro,  
Nicolás, Jeovany, Claudio, Luis Enrique y Manuel

Mis amigas: Alejandrina Flores de Cabrera, Frida Faggioly de Cáceres y  
Jeaneth Alegría de Mejía.

A mi amigo MSc. Ing. Francisco Khalil de León Barrios.

**Por el apoyo, el cariño y la amistad que me brindaron, infinitas gracias**

## ÍNDICE GENERAL

|   |     |
|---|-----|
| <b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>                    | IV  |
| <b>RESUMEN</b>                                    | VI  |
| <b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>                 | VII |
| <b>JUSTIFICACIÓN</b>                              | IX  |
| <b>OBJETIVOS</b>                                  | X   |
| <b>HIPÓTESIS</b>                                  | XI  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                               | XII |
| <br>  |     |
| <b>1. MARCO TÉORICO</b>                           | 1   |
| 1.1 Evaluación del manejo de las aguas residuales | 1   |
| 1.1.1 Sustancias contaminantes del agua residual  | 1   |
| 1.1.1.1 Microorganismos patógenos                 | 2   |
| 1.1.1.2 Desechos orgánicos                        | 2   |
| 1.1.1.3 Nutrientes inorgánicos                    | 2   |
| 1.2 Descripción de las unidades de tratamiento    | 3   |
| 1.2.1 Lagunas de estabilización                   | 3   |
| 1.2.2 Filtros percoladores                        | 4   |
| 1.2.3 Reactor anaerobio de flujo ascendente       | 4   |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| 1.3       | Clasificación de la calidad de las aguas                          | 6  |
| 1.3.1     | Calidad del agua para riego                                       | 6  |
| 1.3.1.1   | Características que determinan la<br>calidad del agua para riego  | 8  |
| 1.3.1.2   | Clasificación de agua para riego                                  | 8  |
| 1.3.2     | Calidad microbiológica del agua par riego                         | 10 |
| 1.3.3     | Calidad nutricional de las aguas residuales                       | 11 |
| 1.4       | Requerimientos de calidad para irrigación con aguas<br>residuales | 12 |
| <b>2.</b> | <b>METODOLOGÍA</b>  | 13 |
| 2.1       | Etapa de laboratorio  | 13 |
| 2.1.1     | Toma de Muestras  | 13 |
| 2.1.2     | Traslado de muestras  | 14 |
| 2.1.3     | Determinaciones analíticas  | 15 |
| 2.1.3.1   | ERIS  | 15 |
| 2.1.3.2   | PLAMAR  | 15 |
| 2.1.3.3   | ICTA  | 15 |
| 2.2       | Etapa de gabinete   | 16 |
| 2.3       | Etapa de campo  | 16 |
| <b>3.</b> | <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>                                     | 17 |
| 3.1       | Calidad microbiológica  | 17 |
| 3.2       | Calidad agrícola  | 18 |

|                        |                                      |    |
|------------------------|--------------------------------------|----|
| 3.2.1                  | Conductividad eléctrica              | 19 |
| 3.2.2                  | Sodio intercambiable o soluble       | 21 |
| 3.2.3                  | Relación de absorción de sodio (RAS) | 22 |
| 3.2.4                  | Clasificación del agua de riego      | 23 |
| 3.3                    | Calidad Nutritiva                    | 24 |
| 3.3.1                  | Contenido de nitratos                | 25 |
| 3.3.2                  | Contenido de nitritos                | 26 |
| 3.3.3                  | Contenido de fósforo total           | 27 |
| 3.3.4                  | Contenido de potasio                 | 28 |
| 3.3.5                  | Contenido de calcio y magnesio       | 28 |
| 3.3.6                  | Contenido de micronutrientes         | 29 |
| <b>CONCLUSIONES</b>    |                                      | 32 |
| <b>RECOMENDACIONES</b> |                                      | 34 |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>    |                                      | 35 |
| <b>APÉNDICE</b>        |                                      | 37 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Contenido de coliformes fecales   | 17 |
| 2  | Valores del parámetro de conductividad eléctrica                                    | 19 |
| 3  | Porcentaje de sodio intercambiable o soluble  | 21 |
| 4  | Valores de la relación de absorción de sodios (RAS)                                 | 23 |
| 5  | Contenido de nitratos   | 25 |
| 6  | Contenido de nitritos   | 26 |
| 7  | Contenido de fósforo  | 27 |
| 8  | Contenido de potasio  | 28 |
| 9  | Plano de localización y ubicación de la planta                                      | 38 |
| 10 | Componente de los tres sistemas estudiados y localización de los puntos de muestreo | 39 |
| 11 | Formato e informe de análisis de suelos   | 40 |
| 12 | Formato de informe de análisis de agua  | 41 |

## TABLAS

|     |  |    |
|-----|--|----|
| I   | Directrices tentativas de calidad microbiológica para el reuso de aguas residuales en agricultura.   | 10 |
| II  | Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ a $25^{\circ}\text{C}$ ) a la que los rendimientos de los siguientes cultivos disminuyen en distintos porcentajes. | 21 |
| III | Contenido de calcio y magnesio   | 29 |
| IV  | Contenido de micronutrientes   | 29 |
| V   | Resumen de los parámetros físicos y químicos de suelo y que están directamente relacionados con el tipo de agua para riego.  | 30 |

## RESUMEN

El presente estudio fue realizado en la planta para el tratamiento de aguas residuales "Ing. Arturo Pazos Sosa", localizada en la colonia Aurora II de la zona 13 de la ciudad capital (Ver apéndice)

El objetivo principal de la investigación fue determinar si los efluentes provenientes de uno o más de los sistemas de tratamiento con que cuenta la planta piloto, pueden ser aprovechados para el riego del cultivo de pepino *Cucumis sativus L.* Y, para ello, se evaluó su calidad microbiológica, agrícola y nutritiva.

Los sistemas evaluados fueron: filtros percoladores, lagunas de estabilización y reactor anaerobio de flujo ascendente. Realizándose 10 muestreos durante los meses de agosto a octubre en el tubo de descarga al final de cada sistema.

Para las determinaciones analíticas de las muestras, se contó con la colaboración de tres distintos laboratorios: Laboratorio de agua de PLAMAR, Laboratorio de suelo, agua y plantas del ICTA y el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria de la ERIS.

La cantidad de coliformes fecales encontrados en los tres efluentes fue mayor de 2,500 NMP/100 cm<sup>3</sup> y la norma establece que se acepta un máximo de 1000 NMP/100 cm<sup>3</sup>, por lo tanto, no cumple con la calidad microbiológica requerida. En cuanto a la calidad agrícola, después de analizar cada uno de los parámetros, se clasificó en aguas de tipo C2S2, la cual no puede ser utilizada para el riego del cultivo de pepino.

La calidad nutritiva de los efluentes se ve satisfecha en relación al contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, lo cual representa una ventaja al verse disminuidas las cantidades de fertilizante químico a utilizarse para la implementación del cultivo.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

A nivel mundial existe una mayor conciencia e interés por la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y siendo el agua uno de los elementos indispensables para la vida de los seres humanos, animales y plantas es necesario tomar medidas tendientes a detener su contaminación y se haga un uso racional del recurso.

En el caso específico de Guatemala, se tiene un volumen potencial de 116 km<sup>3</sup>/año de agua, sin embargo, el recurso se encuentra mal distribuido y presenta altos índices de contaminación, por lo tanto, se tiene como una alternativa viable para contribuir al uso racional del recurso, el aprovechamiento de las aguas tratadas para riego de cultivos, siempre y cuando cumplan con las normas de calidad establecidas para este fin.

Como una alternativa se propone que sean utilizados para el riego de cultivos, en este caso en particular, para el cultivo de pepino, los efluentes provenientes del reactor anaerobio de flujo ascendente, los filtros percoladores y de las lagunas de estabilización. Sin embargo, para ello, se necesita responder a la pregunta ¿Cuentan estos efluentes con la calidad microbiológica, agrícola y nutritiva para ser aprovechados para el riego del pepino o cualquier otro cultivo que se consuma en fresco?

Por lo que es necesario hacer una evaluación de los efluentes desde los siguientes puntos de vista:

- a) calidad microbiológica -contenido de coliformes fecales-;
- b) calidad agrícola -la salinidad y su potencial daño para el crecimiento de los cultivos, la sodicidad y su efecto negativo en las propiedades del suelo-;
- c) calidad nutritiva -contenido de nutrientes-.

## JUSTIFICACIÓN

La planta piloto para el tratamiento de aguas residuales domésticas de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) se encuentra localizada en la colonia Aurora II en la zona 13, al sur de la Ciudad de Guatemala y en las inmediaciones del aeropuerto internacional La Aurora. Siendo su ubicación  $14^{\circ} 35'$  de latitud norte y  $90^{\circ} 32'$  de longitud oeste (Ver figura 9).

Esta planta cuenta con diversos sistemas para el tratamiento de las aguas residuales domésticas provenientes de la colonia Aurora II, cuyos efluentes resultantes (4.65 l/s) se utilizan, parcialmente, en siembras de maíz y pasto; y, el resto está siendo descargado, directamente, a los barrancos aledaños.

En ninguno de los casos -uso para riego o descarga directa- se está evaluando el efluente, desde el punto de vista de su contenido nutricional, efecto de la salinidad en la planta, efecto del sodio en el suelo y de su contenido de coliformes. Por lo que se desconoce su potencial a ser aprovechado, si se está contribuyendo al deterioro ambiental del área o se está causando daño a la salud humana.

Es por ello, que al evaluarse los efluentes desde el punto de vista agrícola, microbiológico y contenido de nutrientes, se podrán recomendar las aguas tratadas para su aprovechamiento en el riego de cultivos, con lo cual se contribuirá a generar una actividad económica que ayude a la sostenibilidad de la propia Planta.

## **OBJETIVOS**

- **General**

Evaluar la calidad de los efluentes generados en los sistemas de tratamiento de aguas residuales de la planta piloto de la ERIS para aprovecharse en el riego del cultivo de pepino.

- **Específicos**

1. Determinar la calidad agrícola del agua residual tratada por filtros percoladores, reactor anaerobio de flujo ascendente y lagunas de estabilización, para su reuso en el riego del cultivo.
2. Determinar la calidad microbiológica de los efluentes provenientes de los filtros percoladores, reactor anaerobio de flujo ascendente y lagunas de estabilización a través del análisis de coliformes totales y coliformes fecales.
3. Determinar la calidad nutritiva de los efluentes provenientes de los filtros percoladores, reactor anaerobio de flujo ascendente y lagunas de estabilización a través del análisis de macronutrientes y micronutrientes presentes en el agua residual tratada.

## **HIPÓTESIS**

El efluente proveniente de uno o más de los sistemas: filtros percoladores, reactor anaerobio de flujo ascendente y lagunas de estabilización cumple con los parámetros de calidad físicos, químicos y microbiológicos necesarios para ser utilizados en el riego del cultivo de pepino.

## INTRODUCCIÓN

La reutilización del agua residual cruda o tratada se basa, principalmente, en aprovecharla como agua para el riego de cultivos y, como agua de recarga para los acuíferos con el objeto de incrementar los recursos hídricos de un determinado lugar.

Una de las ventajas de la reutilización, es que puede evitar muchos de los problemas que ocasiona el vertido de las aguas residuales directamente a cuerpos de agua superficiales como los ríos, lagos y mares, dentro de estos problemas se puede mencionar el riesgo a la salud humana, esencialmente, por el contenido de patógenos; eutroficación, principalmente, por el contenido de nutrientes y riesgos al ambiente por el contenido de metales pesados.

Además, la reutilización permite que los recursos hídricos convencionales se puedan destinar para cubrir la demanda de agua para consumo humano o para cubrir aquellas demandas que exigen una calidad más elevada del agua.

Las aguas residuales han sido utilizadas para el riego de muchas especies vegetales y se han utilizado aguas no tratadas, aguas con tratamiento primario, secundario o terciario.

El interés de realizar el presente estudio se basa en aprovechar el agua residual tratada, proveniente de tres sistemas de tratamiento como lo son los filtros percoladores, las lagunas de estabilización y el reactor anaerobio de flujo ascendente; para el riego de pepino. De esta manera, se le estará dando un buen uso al recurso hídrico y, a la vez, se estará generando un recurso económico que contribuirá al sostenimiento de la planta piloto.

# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1 Evaluación del manejo de las aguas residuales**

Se consideran aguas residuales aquellas aguas de origen domiciliar, comercial e industrial a las que se les ha agregado una serie de contaminantes como heces fecales, restos de comida, partículas sólidas sedimentables y en solución, que ocasionan su degradación y en consecuencia el del cuerpo receptor donde descargan.

El desbalance entre el recurso hídrico y el crecimiento de las grandes ciudades, ha obligado a priorizar el uso de las aguas superficiales para el abastecimiento público y generación de energía eléctrica. Como consecuencia, la actividad agrícola ubicada en el área rural se ve afectada y su única alternativa en muchos de los casos es el uso de aguas residuales tratadas para el riego de sus cultivos.

### **1.1.1 Sustancias contaminantes del agua residual**

Dentro de los principales contaminantes del agua residual tenemos los microorganismos patógenos, los desechos orgánicos, nutrientes vegetales inorgánicos, compuestos orgánicos, sustancia químicas inorgánicas, sedimentos y materiales suspendidos.

Sin embargo se describen a continuación únicamente las sustancias contaminantes encontradas en las aguas residuales de origen doméstico.

### **1.1.1.1 Microorganismos patógenos**

Son los diferentes tipos de bacterias, virus o protozoos que pueden causar daño a la salud humana, es decir que causan enfermedades tales como el cólera, gastroenteritis diversas, hepatitis, etc.

Por lo general, estos microorganismos llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas. Por esto, un buen índice para medir la salubridad de las aguas en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes en el agua.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que en el agua para beber haya cero colonias de coliformes por 100 cm<sup>3</sup> de agua.

### **1.1.1.2 Desechos orgánicos**

Son el conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, se incluyen las heces y orina. También existen materiales que pueden ser descompuestos por bacterias aeróbicas y cuando este tipo de desechos se encuentra en exceso, la proliferación de bacterias agota el oxígeno.

### **1.1.1.3 Nutrientes inorgánicos**

Los nitratos y fosfatos son sustancias solubles en el agua y que las plantas necesitan para su desarrollo, pero si se encuentran en cantidades excesivas inducen al crecimiento desmesurado de algas y otros organismos provocando el fenómeno conocido como eutroficación de las aguas.

## **1.2 Descripción de las unidades de tratamiento, cuyos efluentes serán evaluados**

Dentro de la planta piloto para el tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes de la colonia Aurora II, encontramos los siguientes sistema: Lagunas de estabilización, filtros percoladores y reactor anaerobio de flujo ascendente, cuyos componentes se describen a continuación -ver apéndice, figura 10-

### **1.2.1 Lagunas de estabilización**

Las lagunas de estabilización son un proceso biológico natural, que se beneficia de las condiciones climatológicas, en especial de las temperaturas elevadas por lo que son un método sencillo para el tratamiento de aguas residuales, y sus objetivos principales son:

- Remover la materia orgánica de las aguas residuales, a través del proceso de sedimentación.
- Eliminar los microorganismos patógenos dañinos a la salud, a un estándar aceptable para riego.
- Utilizar el efluente para su reutilización con otras finalidades.

Los procesos naturales de degradación de la materia orgánica por la acción de las bacterias en las lagunas de estabilización puede darse bajo condiciones aerobias, anaerobias y/o facultativas, y si el diseño es correcto, operan adecuadamente para el abatimiento de orgánicos, con una DBO<sub>5</sub> de salida de 30 a 40 mg/l incluso en algunos casos, el decaimiento de coliformes fecales por debajo del valor de la norma.

### **1.2.2 Filtros percoladores**

El filtro percolador consiste en un lecho formado por un medio rocoso sumamente permeable al que se adhieren los microorganismos y, a través del cual, percola el agua residual.

En la Planta existen tres filtros en serie, el primero tiene una área interna de  $0,94\text{m}^2$  y una altura de  $2,00\text{m}$ ; y los otros dos tienen un área de  $0,40\text{m}^2$  y una altura de  $3,33\text{m}$ , donde el agua residual se distribuye uniformemente sobre la superficie del lecho filtrante. (Zeledón. 2004)

Parte de este sistema de filtros percoladores, lo constituye el sedimentador Dortmund, de flujo vertical, estructura de fondo cónico, y canales tipo dientes de sierra para la recepción del agua tratada, su diámetro en la parte superior es de  $3,40\text{m}$  y tiene una profundidad de  $3,00\text{m}$  (Saravia. 2004).

Este sedimentador trata el agua proveniente de la serie de tres filtros percoladores. El agua entra en la parte superior de la unidad y pasa en sentido ascendente donde deja los lodos al volver a subir a la superficie, donde el agua decantada es recolectada por unos canales. Después de este tratamiento, el agua es vertida en la ladera del terreno. Los lodos acumulados se depositan en el RAFA.

### **1.2.3 Reactor anaerobio de flujo ascendente**

En este proceso, el residuo que se quiere tratar se introduce por la parte inferior del reactor. El agua residual fluye en sentido ascendente a través de un manto de lodo constituido por gránulos o partículas formadas biológicamente.

El tratamiento se produce al entrar en contacto el agua residual y las partículas, los gases producidos en condiciones anaerobias provocan una circulación interior, que colabora en la formación y mantenimiento de los gránulos. Al reactor llega agua del sedimentador primario mediante una tubería. El caudal tratado es de unos 0,88 l/s. El RAFA, tiene un diámetro interno de 4,84m y una altura de 7,00m (Saravia. 2004)

Como parte del sistema encontramos las estructuras conocidas como filtro percolador, laguna de jacintos y filtro lento de arena pómez, por lo que a continuación damos una breve descripción de los mismos.

El filtro percolador, es un cuarto filtro con las mismas características que los tres anteriores, éste trata el agua proveniente del RAFA y, posteriormente, su caudal se dirige hacia un estanque con jacintos acuáticos. El filtro tiene un área de 1,00m<sup>2</sup> y una altura de 4,00m.

La laguna de jacintos es una unidad a la que llega el agua tratada por el filtro percolador antes descrito. Tiene la capacidad de absorber y almacenar en sus tejidos durante su etapa de activo crecimiento, contaminantes químicos como el arsénico, mercurio, plomo y metales pesados; nitratos y fosfatos.

Esta estructura tiene un ancho de 3,70m y 6,00m de largo, con una profundidad de 0,76m, el tubo que está en el centro tiene un diámetro interno de 0,90m (Saravia. 2004).

Al filtro lento de arena pómez llega el agua del estanque de jacintos acuáticos. La función de éste es mejorar la calidad del agua en cuanto a sólidos sedimentables y bacterias. Esta unidad tiene un diámetro de 1,10m y una altura de 2,70m (Saravia. 2004).

El lecho filtrante está compuesto por arena pómez, tiene una altura dentro de la estructura de 1,66m y 1,00m de agua sobrenadante (Ramírez. 1991). La descarga de este filtro esta conectada directo al barranco junto al filtro

### **1.3 Clasificación de la calidad de las aguas**

Existen muchos y diversos sistemas de clasificar la calidad de las aguas, en primer lugar suele distinguirse según el uso que se le vaya a dar, por ejemplo, para abastecimiento humano, para riego, para recreación, para vida acuática, etc.

Encontrándose en cada una de ellas, directrices que definen los límites que deben cumplirse para un amplio número de variables físicas, químicas y microbiológicas para que puedan ser utilizadas en cada una de estas categorías

#### **1.3.1 Calidad del agua para riego**

Es un término que se utiliza para indicar la conveniencia o limitación en el empleo del agua con fines de riego y se toman como base generalmente las características químicas, contenido de sales y el estado bacteriológico de la misma.

La fuente principal de sales en el suelo es la edafización de las rocas, sin embargo éstas rara vez tienen cantidad suficiente de sal acumulada como para formar un suelo salino. En regiones húmedas, la gran cantidad de lluvia que se recibe hace que percole a través del suelo y arrastre, fuera de la zona radicular de los cultivos, grandes cantidades de minerales solubles.

El efecto nocivo de las sales sobre las plantas se debe principalmente al aumento de la presión osmótica del suelo que está en contacto con las raíces, por lo que, si la cantidad arrastrada es menor que la incorporada por el agua de riego, la sal se acumulará, si el agua de riego es salina. La salinidad es un problema potencial para muchas zonas de regadíos, siendo las sales más comunes en el agua de riego las siguientes:

- Cloruro de Calcio ( $\text{CaCl}_2$ ), Cloruro de Magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ), Cloruro de Sodio ( $\text{NaCl}$ )
- Sulfato de Calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), Sulfato de Magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ), Sulfato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )
- Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), Carbonato de Magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ), Carbonato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
- Bicarbonato de Sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ), Bicarbonato de Potasio ( $\text{KHCO}_3$ )

Formas de expresar el contenido de sales en un agua para riego:

- Partes por millón (ppm): se refiere al número de gramos de soluto por millón de gramos de solución o mililitros de solución, es equivalente a miligramos por litro (mg/l)
- Miliequivalentes por litro (meq/l): es la relación entre el peso equivalente de una sustancia (peso molecular entre valencia) y un volumen conocido, generalmente un litro.
- Micro ohmios por centímetro ( $\mu\text{mhos/cm}$ ): Es una expresión en términos de conductividad eléctrica, la cual constituye una medida indirecta del contenido de sales en el agua.

### **1.3.1.1 Características que determinan la calidad del agua para riego**

La calidad del agua para riego debe evaluarse en función de su potencialidad para producir efectos dañinos al suelo y al rendimiento de los cultivos. Las características que determinan la calidad del agua para riego varían según el método de clasificación que se utilice, los métodos más difundidos son el del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) y el Método de la FAO (Fondo de las Naciones Unidas para la Agricultura), como se presentan a continuación:

- USDA: Concentración total de sales solubles -conductividad eléctrica- Concentración relativa de sodio con respecto a otros cationes de Ca y Mg (RAS, relación de adsorción de sodio), Concentración de Boro y Concentración de bicarbonatos con relación a la concentración de calcio y magnesio.
- FAO: Conductividad eléctrica, Relación adsorción de sodio ajustada (RASaj), Toxicidad específica de algunos iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Bo}$ ), Contenido de Nitratos, bicarbonatos y pH.

### **1.3.1.2 Clasificación de agua para riego**

Las características que intervienen en la calidad de un agua para riego son:

- a) contenido de sales solubles: El efecto nocivo de las sales se debe al aumento de la presión osmótica de la solución del suelo que está en contacto con la zona radicular.

- b) relación Adsorción de Sodio (RAS): Se calcula mediante la expresión (E.1), si la proporción de sodio es alta con relación al Ca y Mg, existe un peligro de sodificación del suelo, en cambio si la concentración de calcio y magnesio es la que predomina, el peligro es menor.

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad (E.1)$$

- c) concentración iones tóxicos: Algunos elementos pueden ser necesarios para el desarrollo de las plantas, sin embargo en altas concentraciones, pueden perjudicarlas, como el Boro y algunos cloruros.
- d) carbonato de sodio residual (CSR) y porcentaje de sodio posible (PSP): Cuando el sodio se presenta en grandes cantidades, puede causar sodificación en suelos que contienen menos de 4% de carbonatos alcalino – térreos.

$$CSR = (CO_3 + HCO_3) - (Ca + Mg) \quad (E.2)$$

$$PSP = \frac{Na \times 100}{Salinidad\ efectiva} \quad (E.3)$$

La expresión E.2 se expresa en meq/l y la expresión E.3 en porcentaje. (Castillo. 1989)

### 1.3.2 Calidad microbiológica del agua para riego

El conocimiento de las características biológicas del efluente proveniente de aguas residuales tratadas a utilizarse para irrigación es de importancia dado que el agua constituye el vehículo de diversos microorganismos que son causa de enfermedades. Las normas aplicables a aguas residuales recuperadas para usos específicos de riego se basan en la estimación del grado de contacto del hombre con el agua residual recuperada y en el destino previsto de los cultivos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), en 1989 dictó una serie de directrices sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales utilizadas en la agricultura, las cuales se presentan en la Tabla 1, para el riego restringido, se evalúa en base a la presencia de coliformes fecales y nemátodos intestinales.

**Tabla I. Directrices Tentativas de Calidad Microbiológica para el Reuso de Aguas Residuales en Agricultura**

| Proceso de Reuso   | nemátodos Intestinales (2) (Número geométrico medio de huevos viables por litro) | Coliformes Fecales (número geométrico medio por 100 cm <sup>3</sup> ) |
|--|--|---|
| <u>Riego restringido</u> (3)<br>Riego de árboles, cultivos industriales, cultivos de forrajes, árboles frutales (4) y pastizales (5) | < 1  | No aplicable (3)  |
| <u>Riego no restringido</u><br>Riego de cultivos comestibles, campos deportivos, y parques públicos (6)                              | < 1  | < 1000 (7)  |

Fuente. OMS Aspectos sanitarios de la utilización de aguas residuales y excretas en la agricultura y acuicultura. Sinopsis de La declaración de Engelberg.

1. Casos específicos, deben tenerse en cuenta los factores epidemiológicos locales, socioculturales e hidrogeológicos para modificar las directrices de acuerdo a ellos.
2. Ascaris, Trichuris y Uncinaria.
3. En todos los casos, se requiere de un grado mínimo de tratamiento equivalente a por lo menos una laguna anaerobia de un día, seguida de una laguna facultativa de 5 días o su equivalente.
4. El riego de cesar dos semanas antes de la recolección y no deben utilizarse los frutos caídos.
5. El riego debe cesar dos semanas antes de que los animales entren a pastar.
6. Los factores epidemiológicos locales tal vez requieran de una norma más rigurosa cuando se trata de jardines públicos, especialmente los jardines de hoteles que están ubicados en áreas turísticas.
7. En el caso que los cultivos comestibles siempre sean consumidos después de una cocción debida, esta recomendación puede ser menos estricta. (CEPIS, consulta electrónica).

### **1.3.3 Calidad nutricional de las aguas residuales**

En los efluentes se encuentran nutrientes que no se hallan presentes en el agua potable. Los efluentes contienen macroelementos -elementos que las plantas consumen en grandes cantidades, principalmente nitrógeno y fósforo-. Y microelementos -materiales que son imprescindibles para el desarrollo de las plantas y que son consumidos por ellas en cantidades muy pequeñas-. El nitrógeno es un elemento fundamental para las plantas y su proporción en la materia seca fluctúa entre 1% a 5%. El nivel de nitrógeno presente en las aguas residuales sin tratar y el método de tratamiento determina la concentración de nitrógeno en los efluentes que llegan al sistema de riego.

Las principales fuentes de nitrógeno en las aguas residuales están constituidas por los excrementos, la orinan y los residuos de alimentos. (Tarchitzky, 2004).

#### **1.4 Requerimientos de calidad para irrigación con aguas residuales**

Para que las aguas residuales tratadas puedan ser utilizadas para la irrigación de cultivo, los efluentes tienen que cumplir con requerimientos de calidad desde el punto de vista agrotécnico, medioambiental y sanitario. Estos requerimientos no siempre coinciden, como es el caso de los nutrientes, que desde el punto de vista ambiental la concentración de los efluentes debe ser lo más baja posible, mientras que para el punto de vista agrotécnico cierto nivel de nutrientes es bien recibido porque reemplaza la necesidad de aplicar fertilizantes.

Los principales requisitos de las categorías arriba mencionadas se listan a continuación:

- a) Sanitariamente, lo primero que se necesita son bajas concentraciones de patógenos, bacterias, parásitos y virus.
- b) Los requerimientos agrotécnicos son bajas concentraciones de sales.
- c) Los principales requerimientos medioambientales son baja concentración de metales pesados y compuestos xenobióticos, controlado nivel de nutrientes y sales. (Friedler. 2001)

## **2. METODOLOGÍA**

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se realizaron las siguientes etapas:

- Etapa de Laboratorio
- Etapa de Gabinete
- Etapa de Campo

### **2.1 Etapa de Laboratorio**

Para tomar las muestras y hacer las determinaciones analíticas se siguieron las indicaciones del Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.

Recomendándose tomar las muestras después de haber lavado el envase varias veces con el efluente a evaluar; utilizar envases estériles para los análisis microbiológicos, realizar el traslado de las muestras lo más rápidamente posible al laboratorio donde se van a analizar, además deberán ser trasladadas en las condiciones recomendadas.

#### **2.1.1 Toma de muestras**

Se realizó un total de 10 muestreos en la salida de cada uno de los sistemas a evaluarse, con una periodicidad octadal, sin embargo, el muestreo número 3, que correspondía al día 16 de septiembre, fue eliminado del análisis debido a que ese día los sistemas, no estaban trabajando por falta de alimentación con agua residuales domésticas.

El recipiente que se utilizó para la prueba microbiológica fue proporcionado por el Laboratorio de Química y Microbiología de la ERIS, ya que tenía que ser estéril al momento de tomar la muestra.

Para las pruebas de contenido de nutrimentos y evaluación de la calidad para riego, se utilizó un recipiente de plástico de 1 litro, del cual se destinó una botella para los análisis necesarios para determinar la calidad de agua para riego y el resto para la evaluación del contenido nutricional.

El recipiente estuvo estar limpio y fue enjuagado unas tres veces con el agua a muestrear.

Las muestras fueron analizarse lo mas pronto posible ya que algunas características como pH, conductividad eléctrica, nitratos y amonio, podían cambiar con el tiempo.

### **2.1.2 Traslado de muestras**

Una vez tomadas las muestras fueron trasladadas en condiciones de baja temperatura a los Laboratorios de la ERIS para las pruebas microbiológicas, toma del potencial de hidrógeno, temperatura, y determinación de nitratos y nitritos.

Posteriormente fueron trasladadas a los Laboratorios del ICTA y PLAMAR para continuar en los siguientes días con los análisis pertinentes.

### **2.1.3 Determinaciones analíticas**

#### **2.1.3.1 Laboratorio de Químicas y Microbiología de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos**

Aquí se determinaron el contenido de coliformes totales y coliformes fecales contenidas en los efluentes evaluados, a través del método Colilert.

Además se tomaron las lecturas de temperatura y potencial de hidrógeno (pH), y se determinó la concentración de nitratos y nitritos en cada una de las muestras.

#### **2.1.3.2 Laboratorio de Agua del Plan de acción para la modernización y fomento de la agricultura bajo riego**

Aquí se realizaron las determinaciones del contenido de sulfatos, carbonatos, cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio; cloruros, conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno, relación de absorción de sodio y sodio residual, los que sirvieron de base para clasificar el agua residual tratada que se deseaba utilizar para riego.

#### **2.1.3.3 Laboratorio de suelo, agua y planta del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas**

En este Laboratorio se evaluó la calidad nutritiva del agua de los efluentes provenientes de los filtros percoladores, reactor anaerobio de flujo ascendente y lagunas de estabilización a través del análisis de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, cobre, cinc y manganeso.

## **2.2 Etapa de gabinete**

La etapa de gabinete constó de dos partes, siendo la primera la que correspondió a la elaboración del presente protocolo. Para ello se visitaron las instalaciones donde funciona la Planta de tratamiento de aguas residuales y se realizó un recorrido por las áreas circundantes.

Se realizaron varias visitas a la biblioteca de la ERIS donde fueron consultadas Tesis de Grado, Estudios Especiales, libros, revistas, boletines, y otros documentos que permitieron recabar información sobre la planta y sus componentes.

También se realizaron visitas al Laboratorio de PLAMAR para obtener la información y la metodología a ser utilizadas en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Se contó además se recurrió al uso de Internet con el propósito de obtener mayor información sobre el tema, principalmente se consultaron documentos de la CEPIS, OMS y sobre trabajos realizados con aguas residuales en el ámbito de riego.

## **2.3 Etapa de campo**

Sobre la base de los resultados obtenidos en la etapa de laboratorio, se tenía planificado el diseño y construcción de un sistema de riego para evaluar en el cultivo de pepino *Cucumis sativus* L., para evaluar el efluente que reuniera las calidades microbiológica, agrícola y nutritiva necesarias para ser reutilizada en este cultivo.

Sin embargo, esta etapa no se realizó debido a que ninguno de los efluentes cumplió con las expectativas esperadas.

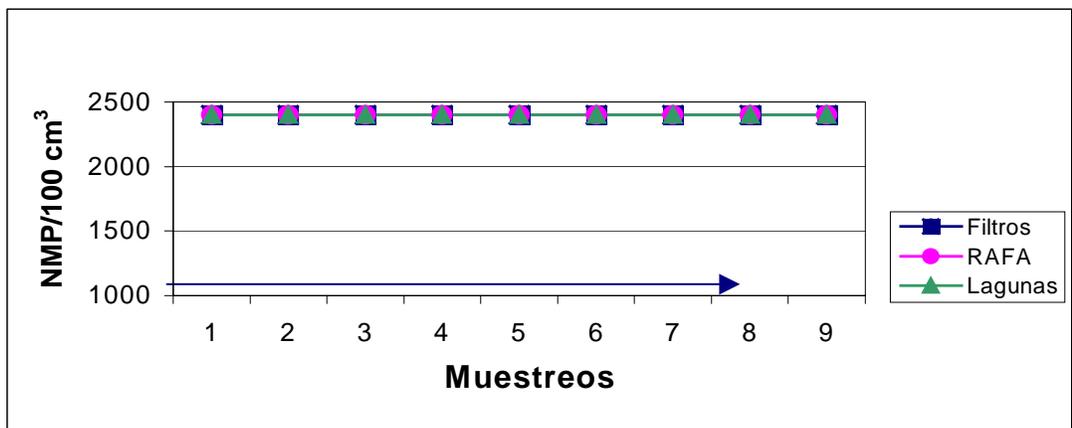
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A pesar que estos efluentes evaluados no pueden ser reutilizados para el riego de pepino ni de ningún cultivo que sea destinado para su consumo en fresco, debido a que no presenta seguridad a la salud humana, sí podría utilizarse para regar cultivos con riego restricto o bien haciendo una desinfección del efluente antes de ser utilizado.

#### 3.1 Calidad Microbiológica

La calidad microbiológica de los tres efluentes evaluados, se estableció a partir del número de coliformes fecales presentes en cada uno de los muestreos realizados.

**Figura 1. Contenido de coliformes fecales**



En la figura 1, se observa que no existe diferencia significativa para el parámetro contenido de coliformes fecales entre los efluentes provenientes de tres sistemas de tratamiento de aguas residuales para lo que fue el contenido de coliformes totales y coliformes fecales. La uniformidad en los datos se debe a que para su determinación se utilizó la técnica de Colilert, la que permite determinar un rango máximo de 2419 NMP/100 cm<sup>3</sup> al trabajarse sin realizar diluciones.

En este caso no fue necesaria la determinación del número exacto de coliformes totales y fecales que tenían las diferentes muestras debido a que según la norma establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el uso seguro de agua residual en la agricultura (1989), el rango máximo permitido de coliformes totales y fecales en una muestra de agua destinada para el riego de vegetales que se consumen en fresco es de 1,000 NMP/100 cm<sup>3</sup>

Sobre la base de los resultados encontrados en cada uno de los sistemas evaluados (filtros percoladores, reactor anaerobio de flujo ascendente y lagunas de estabilización), ninguno de los tratamientos reúne la calidad microbiológica necesaria para poder ser utilizada como agua de riego para el cultivo de pepino *Cucumis sativus* L, ni para ningún otro cultivo que se consuma en fresco.

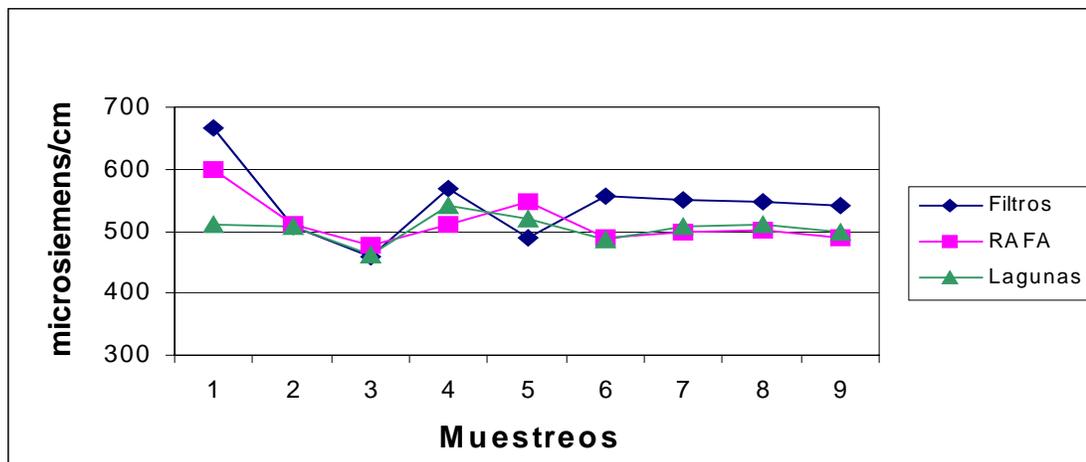
### **3.2 Calidad Agrícola**

Para establecer si la calidad de agua es apropiada para riego de un cultivo, se deben tomar en cuenta principalmente para que tipo de cultivo se trate y las características físicas del suelo donde se sembrará el mismo. Sin embargo para determinar a que clasificación corresponde fue necesario el estudio de los parámetros que a continuación se presentan.

### 3.2.1 Conductividad eléctrica

Los valores obtenidos para el parámetro de conductividad eléctrica, estuvieron entre el rango de 458 a 665  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , para el efluente proveniente de los filtros percoladores; con respecto al efluente proveniente del reactor anaerobio de flujo ascendente el rango estuvo comprendido entre 476 y 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; mientras que para el efluente proveniente de las lagunas de estabilización la conductividad eléctrica se mantuvo entre el rango de 462 a 511  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Figura 2. Valores del parámetro de Conductividad Eléctrica**



En la figura 2, podemos observar el comportamiento de la conductividad eléctrica de los diferentes efluentes durante la época de muestreo (agosto-noviembre). Aquí también se puede observar que el valor máximo registrado durante el tiempo que duró el muestreo fue de 665  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y se registró en el efluente proveniente de los filtros percoladores durante el primer muestreo.

El valor mínimo registrado fue de 458  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y se determinó en el efluente proveniente de los filtros percoladores en el cuarto muestreo.

La conductividad eléctrica es un parámetro que expresa la concentración total de sales presentes en el agua de riego y sirve para poder clasificarla dentro de los diferentes grupos que determinan si es apta para riego.

En el caso en estudio, sus valores demuestran que los efluentes evaluados están dentro de la clasificación de aguas de mediana salinidad, ya que están comprendidas dentro del rango de 250 a 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (C2).

En términos agronómicos es muy importante la determinación del parámetro de conductividad eléctrica ya que el crecimiento de las plantas se ve fuertemente influenciado por las condiciones de salinidad, y el cultivo de pepino no es una excepción a esto.

Siendo el cultivo del pepino medianamente tolerante a la salinidad, si se riega con este tipo de agua se elevará la concentración de sales en el suelo y tendrá dificultad en absorber el agua, disminuirá el rendimiento y la cantidad y calidad de los frutos es menor.

Como se muestra en la tabla II, existe una significativa variación en la tolerancia de esta especie a la salinidad, por lo que teóricamente con valores mayores de 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , estaríamos reduciendo en un 25% su rendimiento si nos basamos en esta información.

**Tabla II. Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$  a  $25^\circ\text{C}$ ) a la que los rendimientos de los siguientes cultivos disminuyen en distintos porcentajes.**

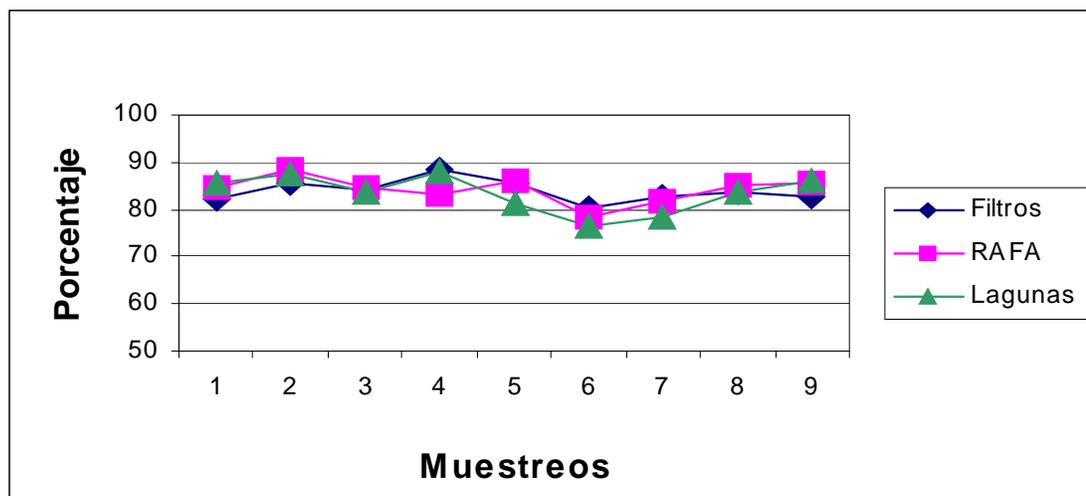
| <b>Valores de conductividad eléctrica</b> |            |            |            |
|---|------------|------------|------------|
| <b>Cultivo</b>                            | <b>10%</b> | <b>25%</b> | <b>50%</b> |
| Tomate                                    | 400        | 600        | 800        |
| <b>Pepino</b>                             | <b>300</b> | <b>400</b> | <b>600</b> |
| Lechuga                                   | 200        | 300        | 500        |
| Zanahoria                                 | 200        | 300        | 400        |
| Frijol                                    | 150        | 200        | 400        |

Fuente: R. Saucedo (2003)

### 3.2.2 Sodio intercambiable o soluble

Los resultados obtenidos para el parámetro de porcentaje de sodio intercambiable o soluble presenta valores arriba del 70%, y cuyos rangos se muestran en la figura 3.

**Figura 3. Porcentaje de sodio intercambiable o soluble**



Como se aprecia en la figura 3, los rangos encontrados fueron de 80,45 % a 88,51% para el efluente proveniente de los filtros percoladores; 78,34% a 88,50% en el efluente del reactor anaerobio de flujo ascendente; y de 71,24% a 87,93% en el efluente de las lagunas de estabilización.

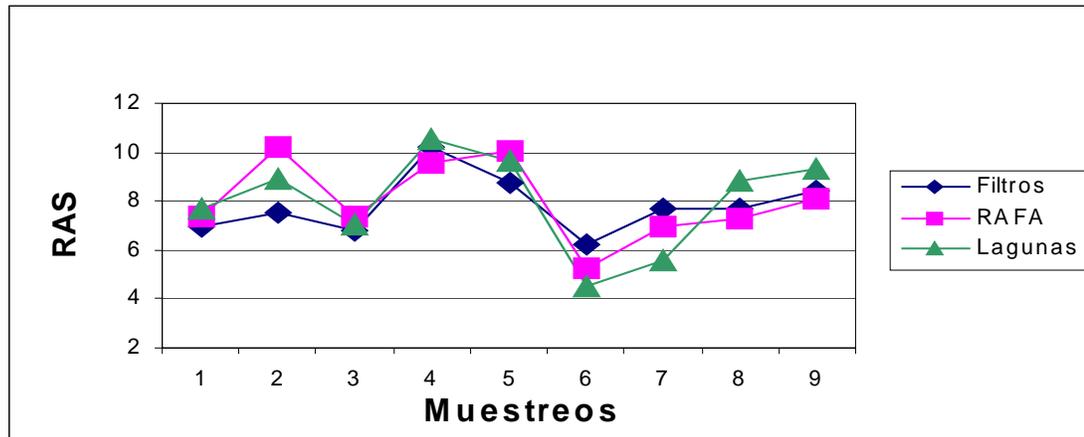
A pesar que la presencia del sodio en agua destinada a riego, no causa daño a las plantas o los cultivos, es capaz de provocar efectos nocivos en la parte física, química y biológica del suelo. Por ejemplo, en el área donde se descargan los efluentes de los sistemas de filtros y el reactor anaerobio; así como a orillas del barranco, frente a las lagunas se tienen texturas arcilloso y arcillo arenoso, por lo que si éstas son regadas constantemente con este tipo de agua podría llegar a tener problemas de impermeabilidad con lo cual se dificultaría la penetración de las raíces de los cultivos.

### **3.2.3 Relación de absorción de sodio (RAS)**

En la figura 4, se muestra el comportamiento de los tres efluentes evaluados con respecto al parámetro de relación de absorción de sodio, durante la etapa de muestreo. En los filtros percoladores, el rango del RAS fue de 6,23 a 10,22; en el efluente del reactor anaerobio de flujo ascendente el RAS estuvo entre 5,22 a 10,2; y para las lagunas de estabilización el RAS muestra valores dentro del rango de 4,55 a 10,52

Con estos valores, el agua proveniente de los sistemas evaluados, se ubica dentro de la categoría (S2), que corresponde a aguas con mediano contenido de sodio por lo que pueden ser utilizadas en suelos con textura media y gruesa pero con un buen drenaje.

**Figura 4. Valores de la relación de absorción de sodio**



Para las áreas muestreadas (M1 y M8) en la planta de tratamiento de la ERIS, los suelos corren el riesgo de sodificarse debido a que son suelos con texturas arcillosas y arcillo arenosas y con alta capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo el área cercana a la laguna de maduración (M2) podría regarse con estos efluentes ya que cuenta con una textura franco arcillo arenosa y su capacidad de intercambio catiónico está alrededor de 11 meq/100ml.

### **3.2.4 Clasificación del agua de riego**

Tomando en cuenta los resultados de los parámetros arriba evaluados, se clasificaron los efluentes provenientes de los filtros percoladores, reactor anaerobio de flujo ascendente y lagunas de estabilización, dentro del área que se señala en el diagrama para la clasificación de aguas de riego, como un agua **C2S2** -mediana salinidad y mediano contenido de sodio-.

De acuerdo a esta clasificación, ninguno de los efluentes cumple con la calidad agrícola necesaria para ser utilizada en el riego del cultivo de pepino *Cucumis sativus L.* en el área estudiada y que se encuentra ubicada en terrenos de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales "Ing. Arturo Pazos Sosa".

Sin embargo, estos efluentes se podrían aprovechar para riego de otros cultivos que no sean susceptibles a la salinidad como podría ser el caso de algunos cereales como sorgo *Sorghum vulgare*, trigo *Triticum vulgare*; algunas especies forestales casia *Cassia spp*, casuarina *Casuarina equisetifolia*, eucalipto *Eucalyptus pps*), leucaena *Leucaena leucocephala* y algunos pastos.

Además deberán buscarse áreas donde la clase textural sea arenosa, franca arenosa o franco arcillo arenosa, por ejemplo, el área contigua a las lagunas de estabilización, donde en la actualidad se tiene siembra de maíz, ya que ésta cuenta con una textura franco arcillo arenosa, lo que favorecería el lavado de las sales y por lo tanto no existiría el peligro de sodificarse el suelo.

### **3.3 Calidad Nutritiva**

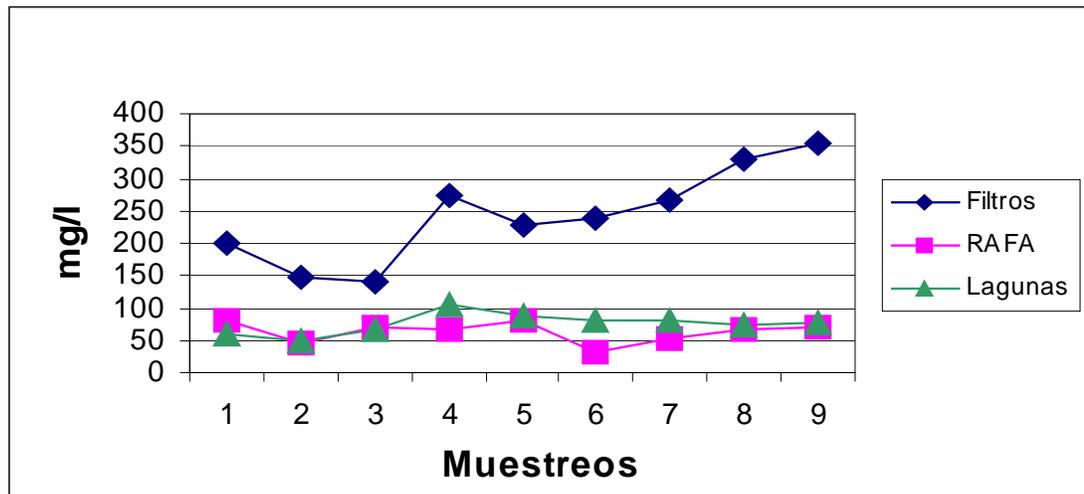
Los parámetros que se evaluaron para determinar la calidad nutritiva de los efluentes provenientes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales doméstica: filtros percoladores, reactor anaerobio de flujo ascendente y lagunas de estabilización se tienen los siguientes: contenido de nitratos y nitritos, fósforo, potasio, calcio, magnesio; así mismo también fueron evaluados cuatro microelementos, que fueron cobre, hierro, manganeso y cinc.

### 3.3.1 Contenido de nitratos

El contenido de nitratos en los efluentes evaluados muestra por primera vez una diferencia entre los tres sistemas, presentando el efluente proveniente de los filtros percoladores los valores más altos.

El rango encontrado en el efluente de los filtros fue de 139 mg/l a 353 mg/l.; y para los efluentes del reactor anaerobio de flujo ascendente y las lagunas de estabilización, los rangos fueron de 46 mg/l a 81 mg/l; y de 48 mg/l a 107 mg/l, respectivamente como se observa en la figura 5.

**Figura 5. Contenido de nitratos**



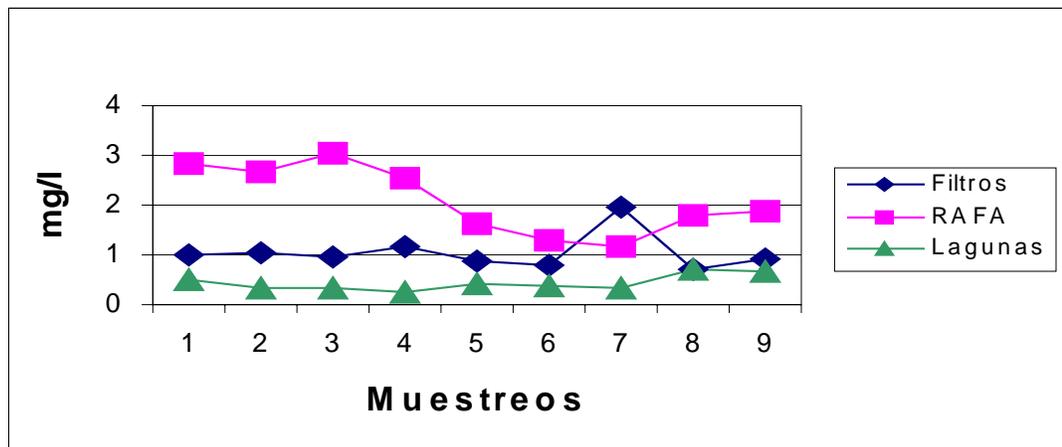
### 3.3.2 Contenido de nitritos

El contenido de nitritos en los efluentes evaluados muestra al igual que la figura 5, que existieron diferencias entre los efluentes.

Aquí no se mantuvo la tendencia de que los filtros percoladores continuaran siendo los de mayor contenido, lo cual es comprensible ya que se dio una reacción de óxido reducción debido a la presencia de bacterias degradadoras del nitrógeno.

El rango encontrado en los filtros percoladores fue de 0,72 mg/l a 1,44 mg/l, y para el reactor anaerobio de flujo ascendente y lagunas de estabilización, los rangos fueron de 1,18 mg/l a 3,03 mg/l; y de 0,25 mg/l a 0,71 mg/l, respectivamente como se muestra en la figura 6.

**Figura 6. Contenido de nitritos**



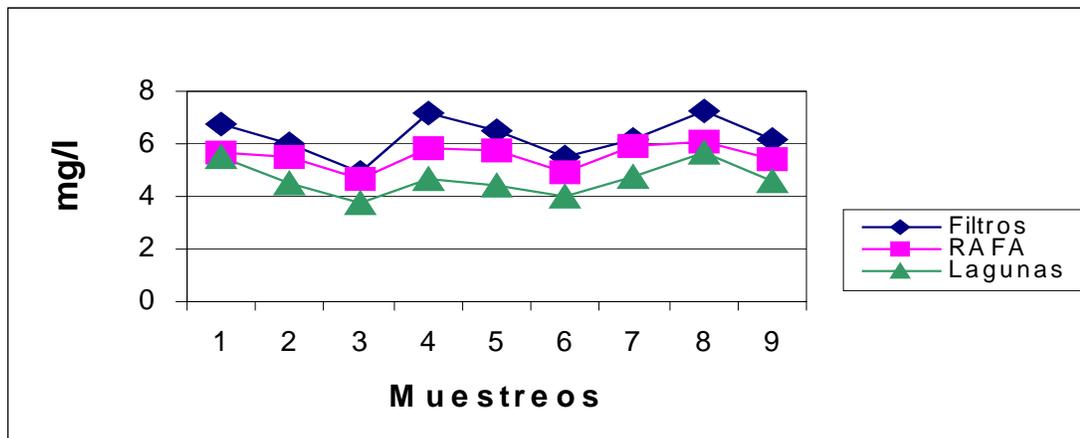
Como se pueden observar en las figuras anteriores (5 y 6), los efluentes estudiados contienen cantidades apreciables de nitrógeno, por lo que estas cantidades podrían cubrir en muchos casos las necesidades de nitrógeno para un cultivo. Sin embargo, el contenido de nitrógeno en las formas de nitratos y nitritos en algún momento podrían llegar a ser perjudiciales al cultivo, y en el caso de los nitratos al haber un aumento en su lixiviación podrían llegar a contaminar las aguas subterráneas.

Además, un problema adicional del aporte de nitrógeno por el agua residual tratada, es que la demanda del cultivo por el nitrógeno y por el agua puede no coincidir en el tiempo, ya que en la mayoría de cultivos tiene una demanda de agua durante todo su ciclo, mientras que la demanda de nitrógeno se da en la fase de crecimiento, es decir que en su fase inicial y/o en la fase en la que su ciclo ya fue completado es muy baja o nula.

### 3.3.3 Contenido de fósforo total

El contenido de fósforo en los efluentes evaluados muestra la misma tendencia entre los tres sistemas evaluados (figura 7). El rango encontrado en los filtros percoladores fue de 6 a 7 ppm (miligramos/litro), para el reactor anaerobio de flujo ascendente el rango fue de 5 a 6 ppm (miligramos/litro), y para las lagunas de estabilización fue de 4 a 5 ppm (miligramos/litro).

**Figura 7. Contenido de fósforo total**

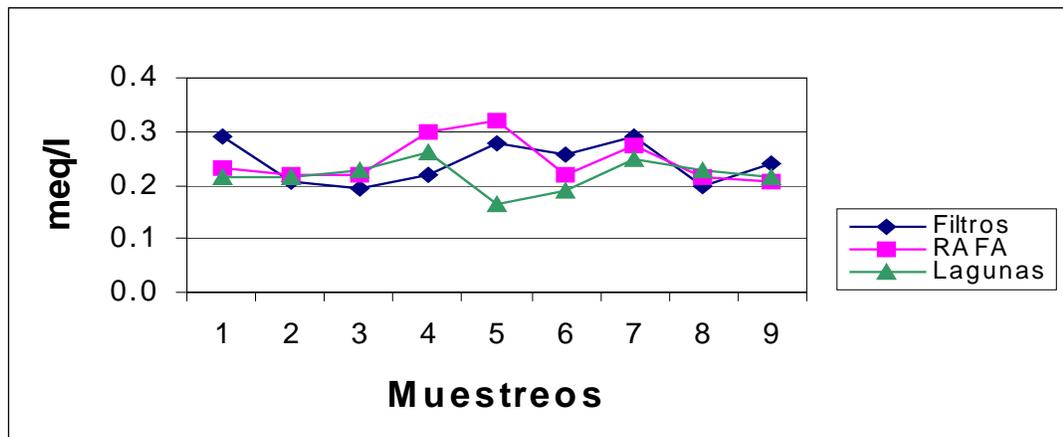


Como se puede observar el aporte de fósforo por las aguas residuales domésticas, es inferior al nitrógeno, pero conviene tenerlo en cuenta para disminuir el aporte para la implementación de un cultivo.

### 3.3.4 Contenido de potasio

Con respecto al contenido de potasio se encontró que los efluentes analizados cuentan con cantidades significativas de este nutriente, por lo que pueden ser aprovechado para la nutrición de cultivos. En las gráficas 8 se observa el comportamiento de este elemento durante la fase de muestreo.

**Figura 8. Contenido de potasio**



En la gráfica 8 se muestra que el contenido de potasio en las muestras se mantuvo entre el rango de 0.2 y 0.3 meq/l; presentándose en un rango adecuado para ser utilizado con fines de nutrición.

### 3.3.5 Contenido de calcio y magnesio

Con respecto al contenido de calcio y magnesio se encontró que los efluentes analizados no cuentan con cantidades significativas que pudieran ser aprovechados por los cultivos por lo que únicamente se muestran en la tabla III los rangos en que se presentaron durante el período de muestreo.

**Tabla III. Contenido de calcio y magnesio**

| <b>Elemento</b> | <b>Rango</b>     | <b>Significancia</b> |
|-----------------|------------------|----------------------|
| Calcio          | 0,05 - 0,3 meq/l | 4 meq/l              |
| Magnesio        | 0,2 - 0,3 meq/l  | 1 meq/l              |

La tabla III, muestra el comportamiento del calcio y magnesio durante el período de muestreo, como se puede observar el contenido de calcio estuvo entre el rango de 0,05 a 0,3 meq/l. Y el contenido de magnesio en los efluentes analizados se mantuvo entre el rango de 0,2 a 0,3 meq/l.

### 3.3.6 Contenido de micronutrientes

Al analizar el contenido de micronutrientes en los tres efluentes evaluados se estableció que ninguno contenía cantidades significativas para el crecimiento de un cultivo, por lo que no se discute sobre los mismos, limitándonos únicamente a mostrar los resultados encontrados (tabla IV).

**Tabla IV. Contenido de micronutrientes.**

| <b>Micronutriente</b> | <b>Cobre (mg/l)</b> | <b>Hierro (mg/l)</b> | <b>Manganeso (mg/l)</b> | <b>Cinc (mg/l)</b> |
|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|
| Valor encontrado      | < 0,01              | < 0,01               | < 0,01                  | <0,01              |

### 3.4 Análisis de Suelos

Dentro del estudio también se contempló el muestreo de suelos de tres áreas dentro del terreno que ocupa la planta de tratamiento de aguas residuales "Ing. Arturo Pazos Sosa" con el propósito de conocer sus características físicas y químicas, en caso de la implementación de un cultivo.

**Tabla V. Resumen de los parámetros físicos y químicos de los suelos que están directamente relacionados con el tipo de agua para riego.**

| Area Muestreada | CICE meq/100ml | pH  | % M.O. | % Arcilla | % Limo | % Arena | Clase Textural         |
|-----------------|----------------|-----|--------|-----------|--------|---------|------------------------|
| M1              | 25.0           | 7.0 | 4.3    | 45        | 18     | 37      | Arcilloso              |
| M2              | 11.6           | 6.3 | 2.7    | 27        | 12     | 61      | Franco Areno-Arcilloso |
| M8              | 25.0           | 7.0 | 4.8    | 37        | 17     | 46      | Arcillo-Arenoso        |

M1= Aledaña al área de descarga de los sistemas de tratamiento

M2= A la par de la laguna de maduración

M8= Orilla de barranco frente a lagunas

CICE= Capacidad de intercambio catiónico efectiva

M.O.= Materia Orgánica

En base a la clasificación de aguas para riego en la cual se determinó que los efluentes evaluados pertenecen a la categoría **C2S2** (mediana salinidad y mediano contenido de sodio), se propone como el suelo más apropiado para que sean reutilizados los efluentes el área M2 que corresponde al área contigua a las lagunas de estabilización; debido a su alto contenido de arena (61%), adecuado contenido de materia orgánica y con una capacidad de intercambio catiónica de 12 meq/100 ml.

## CONCLUSIONES

1. La hipótesis planteada no es válida debido a que ninguno de los efluentes evaluados cumple con la calidad microbiológica necesaria para resguardar la seguridad de la salud humana. Además, se clasifica como aguas de riego clase C2S2, la cual no es apta para el cultivo de pepino por ser éste susceptible al sodio.
2. Los efluentes podrían ser utilizados para regar cultivos que no sean susceptibles al sodio y que sean medianamente tolerantes a la salinidad, ya que su clasificación C2S2 -mediana salinidad y mediano contenido de sodio- les permite ser utilizados en otros cultivos tales como algunos cereales -sorgo, trigo-, especies forestales -casia, eucalipto leucaena, casuarina- y algunos pastos de corte. Además su contenido de fósforo y nitrógeno reduce los costos por concepto de uso de fertilizantes químicos.
3. Los efluentes de los sistemas evaluados, pueden ser aprovechados para el riego de cultivos como pastos, cereales y árboles. Ya que, en el caso de cultivos para consumo en fresco, deberá hacerse una desinfección del efluente antes de ser utilizado.
4. El reuso de agua residual es una alternativa viable para aquellos lugares donde el recurso hídrico es limitado, sin embargo, deben cuidarse los impactos negativos, tales como: el deterioro de la calidad del suelo por presencia de sales y el deterioro a la salud humana por presencia de organismos patógenos.

5. De acuerdo a la calidad del agua procedente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Ing. Arturo Pazos Sosa" el suelo que más se adapta es el del punto M2 -suelo franco arcillo arenoso- y que corresponde al área contigua a las lagunas de maduración.

## **RECOMENDACIONES**

1. Con la base de la experiencia adquirida en este estudio, se recomienda que en futuras evaluaciones de los efluentes con fines de ser reutilizados para riego, se seleccionen cultivos que no sean para consumo en fresco, ya que, debido a su contenido de patógenos deberá contar con un sistema de desinfección antes de ser utilizado. Además, el cultivo que se seleccione para comprobar la eficiencia del uso de las aguas residuales tratadas deberá contar con suficiente información de su comportamiento ante este tipo de riego.
2. Continuar con estudios que permitan demostrar las bondades de la reutilización de las aguas residuales.

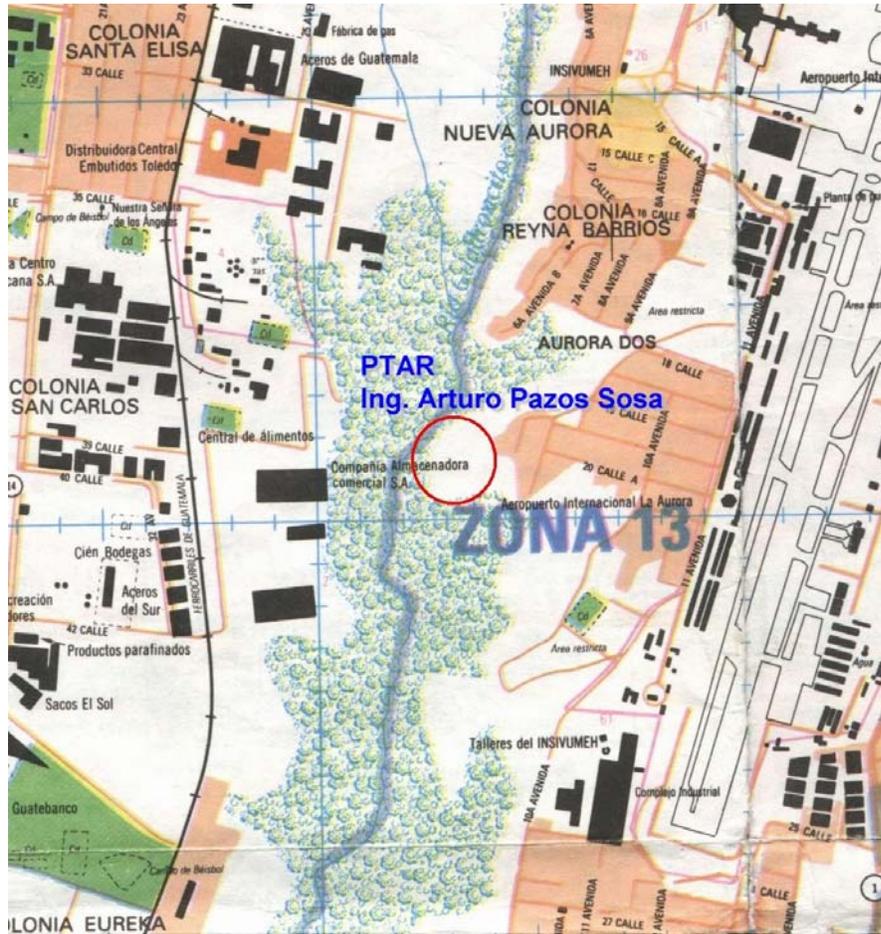
## BIBLIOGRAFIA

1. Alvarado Cuadra, Lydiester. Utilización de Eichhornia Crassipes (Jacintos Acuáticos) para la remoción de nitratos y fosfatos de un efluente tratado biológicamente. Tesis Ingeniería Sanitaria. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos hidráulicos. 1992.
2. Castillo, Salvador. **Análisis y calidad del agua con fines de riego**. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 1989
3. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS). Perú. **HDT 37: Aspectos sanitarios de la utilización de aguas residuales y excretas en la agricultura y acuicultura**. Sinopsis - La declaración de Engelberg (en línea). 2004. Disponible en <http://www.cepis-opsoms/textos completos.htm>.
4. Friedler, Eran. **Wastewater reclamation and reuse: Quality and treatment requirements for wastewater reuse in agriculture**. Israel: Ministry of Agriculture and Rural Development. 2001
5. Hernández, Max. Diagnostico de la planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Aurora II". Tesis Ingeniería Sanitaria. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos hidráulicos. 1995
6. Mayorga, Francisco. Eficiencia en el tratamiento de aguas servidas, por medio de Un sistema de filtros percoladores construidos en serie. Tesis Ingeniería Sanitaria. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos hidráulicos. 1980
7. Metcalf y Eddy. **Ingeniería de las aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización**. (Tomos I y II). México: Editorial McGraw Hill. 1996
8. Much Santos, Zenón. Notas del curso de Química y Microbiología Sanitaria. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de ingeniería, Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos. 2003

9. Ramírez Barboza, María. Transformación de un Tanque Imhoff en un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente y su Evaluación Sanitaria. Tesis Ingeniería Sanitaria. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos hidráulicos. 1990
10. Ramírez Regalado, Walter Arturo. Evaluación de un filtro percolador como tratamiento posterior al agua Tratada en un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente. Tesis Ingeniería Sanitaria. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos hidráulicos. 1991
11. Sandoval Illesca, Jorge. **Principios de riego y drenaje**. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 1989
12. Sparks, D. **Methods of soil analysis** (part 3: Quimical Methods) USA: 1996
13. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19<sup>th</sup> edition. USA: APHA, AWWA, WEF. 1995
14. Tarchitzky, Jorge. **Riego con efluentes-nitrógeno en los efluentes**. Israel: Ministerio de agricultura y Desarrollo Rural. 2004
15. Zeledón, Juan Carlos. Evaluación de la operación y mantenimiento y propuesta de sostenibilidad operacional y financiera de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas "Ingeniero Arturo Pazos Sosa". Tesis Ingeniería Sanitaria. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos hidráulicos. 2004

## **APÉNDICE**

**Figura 9. Plano de localización y ubicación de la planta de tratamiento de Aguas residuales "Ing. Arturo Pazos Sosa"**



**Figura 10. Componentes de los tres sistemas evaluados y la localización de los puntos de muestreo**

**Figura 11. Formato e informe de resultados de análisis de suelo**

**Figura 12. Formato de informe de resultados de análisis de agua**