

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA.**  
**DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



**Eficiencia de un Sistema Natural de Tratamiento para la  
Remoción de Materia Orgánica.**

**Por:**

**Luci Yeni Alvaro Arcos**

**TESIS**

**Presentada como requisito parcial**

**Para obtener el título de:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México    Febrero del 2013**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Eficiencia de un Sistema Natural de Tratamiento para la Remoción de  
Materia Orgánica.

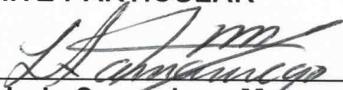
POR:  
Luci Yeni Alvaro Arcos

TESIS

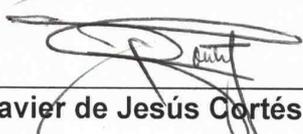
Que somete a consideración del Comité Particular de Asesoría y Aprobada  
como requisito parcial para obtener el título de:  
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN.

COMITE PARTICULAR

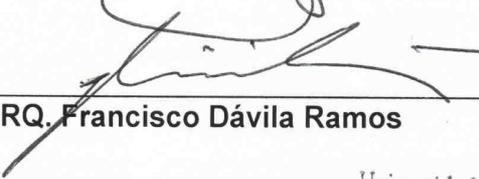
Asesor Principal:

  
DR. Luis Samaniego Moreno

Co-Asesor:

  
DR. Javier de Jesús Cortés Bracho

Co-Asesor:

  
ARQ. Francisco Dávila Ramos

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA.

  
MC. Luis Rodríguez Gutiérrez

Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Coordinación de  
Febrero del 2013

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	V
ÍNDICE DE CUADROS .....	VI
<b>RESUMEN</b> .....	<b>VII</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Objetivos .....	3
1.2. Hipótesis .....	3
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
2.1. Aguas Residuales .....	4
2.2. Composición de los Caudales de Aguas Residuales .....	4
2.3. Sistemas de Tratamientos Naturales .....	5
2.4. Métodos Acuáticos .....	6
2.4.1. Lagunajes .....	7
2.4.2. Humedales .....	7
2.4.3. Cultivos acuáticos .....	8
2.5. Eficiencia de Remoción en los Sistemas Naturales de Tratamiento .....	8
2.5.1. Ventajas de los sistemas naturales de tratamiento .....	8
2.5.2. Desventajas de los sistemas naturales de tratamiento .....	9
2.6. Parámetros Físicos para la Caracterización de Aguas Residuales .....	9
2.6.1. Sólidos totales (ST) .....	9
2.6.2. Sólidos sedimentables .....	10
2.6.3. Sólidos suspendidos totales (SST) .....	10
2.6.4. Sólidos filtrables .....	10
2.6.5. Turbidez .....	11
2.6.6. Conductividad eléctrica (CE) .....	12
2.6.7. Temperatura .....	12
2.7. Parámetros Químicos para la Caracterización de Aguas Residuales .....	13

2.7.1. Potencial de hidrógeno (pH).....	13
2.7.2. Oxígeno disuelto (OD).....	13
2.7.3. Materia orgánica.....	14
2.8. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	15
2.8.1. Aplicación de la DBO.....	16
2.8.2 Limitaciones del ensayo de la DBO.....	16
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
3.1. Localización del Sitio de Estudio .....	17
3.2. Características del Sistema de Tratamiento. ....	18
3.3 Procesos del Sistema de Tratamiento de la UAAAN .....	22
3.3.1. Proceso de homogenización y sedimentación .....	22
3.3.2. Proceso de depuración.....	22
3.3.3. Proceso de filtración .....	23
3.3.4. Almacenamiento y estabilización .....	23
3.4. Características del Influyente del Sistema.....	23
3.5. Fechas y Puntos de Muestreo .....	23
3.6. Condición de Temperatura .....	24
3.7. Determinación de Concentración de Materia Orgánica Biodegradable.....	24
3.8. Procedimiento para la DBO .....	25
3.9. Determinación de la Cantidad de Materia Suspendida.....	27
3.10. Procedimiento de Sólidos Suspendedos Totales.....	27
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>29</b>
4.1. Determinación de DBO .....	31
4.2. Parámetros Físico-Químicos del Agua del Sistema.....	33
4.3. Comparación de Concentraciones de DBO con Relación a los Parámetros Físico-químicos .....	40
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>48</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>50</b>
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>52</b>

## **DEDICATORIA**

### **A MI DIOS:**

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

### **A MIS PADRES:** Ana C. Arcos Cruz y Lucio Alvaro Peñate

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo. Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

### **A MIS HERMANAS:**

Paty, Karina y Mezli por estar conmigo y apoyarme siempre, las quiero mucho.

### **A MIS AMIGOS.**

Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora seguimos siendo amigos: Sandra, Juana, Julia, William, Roberto, José A., Eligio, Hugo, Carlitos y todos aquellos amigos que no recordé al momento de escribir esto.

## **AGRADECIMIENTOS**

**A MI CREADOR:** *“Y todo lo que hacéis, sea de palabra o de hecho, hacedlo todo en el nombre del señor Jesús, dando gracias a Dios Padre por medio de el” Filipenses 4:6*

Te agradezco infinitamente por las bendiciones que me has dado, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad, gracias DIOS.

**A MIS PADRES:** Ana C. Arcos Cruz y Lucio Alvaro Peñate

Les agradezco por apoyarme en todo momento, por confiar en mí, y sobre todo por el gran regalo de haberme dado, mis estudios, sin ustedes no lo habría logrado, y no solo les doy las gracias, también les digo que los amo y los respeto.

**A MI “ALMA TERRA MATER”**

A mi Universidad por haberme acogido y por darme la oportunidad de ser Ing. Agrónomo en Irrigación.

**Al DR. Luis Samaniego Moreno**

Por compartir sus conocimientos, enseñanzas, por la paciencia, apoyo, amistad, y dedicación que me brindo al revisar mi proyecto.

**Al DR. Javier de Jesús Cortés Bracho**

Por sus sugerencias en la revisión del presente escrito, por su apoyo y amistad que me brindo.

**Al ARQ. Francisco Dávila Ramos**

Por su valiosa asesoría y su orientación en el presente proyecto.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del sistema de tratamiento de la UAAAN .....	17
Figura 2. Esquema del sistema de tratamiento de la UAAAN.....	19
Figura 3. Tanques igualadores de gasto.....	20
Figura 4. Sistema de pantano construido de flujo subsuperficial .....	20
Figura 5. Estanque de sedimentación.....	21
Figura 6. Laguna aerobia.....	21
Figura 7. Método de determinación de materia orgánica biodegradable por medio de la prueba de DBO .....	26
Figura 8. Concentración de DBO en cada punto de muestreo. ....	32
Figura 9. Representación del pH en relación a cada punto de muestreo ...	33
Figura 10. Representación de la CE en cada punto de muestreo.....	34
Figura 11. Representación de SD en cada punto de muestreo .....	35
Figura 12. Representación de la T° en cada punto de muestreo .....	36
Figura 13. Representación turbidez en cada punto de muestreo.....	37
Figura 14. Representación de OD en cada punto de muestreo .....	38
Figura 15. Representación de SST en cada punto de muestreo .....	39
Figura 16. Comparación de pH con respecto a DBO .....	40
Figura 17. Comparación de CE con respecto a DBO .....	41
Figura 18. Comparación de SD con respecto a DBO .....	42
Figura 19. Comparación de T° con respecto a DBO.....	43
Figura 20. Comparación de turbidez con respecto a DBO .....	44
Figura 21. Comparación de OD con respecto a DBO .....	45
Figura 22. Comparación de SST con respecto a DBO .....	46

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Diluciones recomendadas para diferentes valores esperados de DBO. ....	25
Cuadro 2. Variables de parametros físico-químicos del agua en la planta de tratamiento. ....	29
Cuadro 3. Concentraciones de DBO en cada punto de muestreo .....	29
Cuadro 4. Eficiencia de remoción en cada punto de muestreo .....	30

## RESUMEN

Los sistemas naturales son una opción tecnológica viable para la depuración de aguas residuales, especialmente si estas son de origen urbano por su alta eficiencia, bajo costo de operación, mantenimiento y fácil construcción. La determinación de la eficiencia del sistema natural de tratamiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) se realizó en función a la concentración de materia orgánica biodegradable en el agua residual de influente y efluente del sistema medida como demanda bioquímica de oxígeno (DBO), en cinco puntos de muestreo y empleando el método de diluciones de acuerdo a la NMX-AA-028-SCFI-2001.

En laboratorio se determinaron los sólidos suspendidos totales resultando con una concentración de  $437 \text{ mg L}^{-1}$  a  $120 \text{ mg L}^{-1}$ , además se midieron "*in situ*" los parámetros físico-químicos del agua resultando en un rango de pH entre 8.73 a 8.9; para la conductividad eléctrica fue de  $1.41$  a  $1.76 \text{ mS cm}^{-1}$ ; para la temperatura de  $21.9$  a  $19.8^{\circ}\text{C}$ ; para sólidos disueltos de 700 a 890 ppm; para turbidez de 727.67 a 50.39 NTU y para oxígeno disuelto de 0.98 a 7.14 ppm.

Entre los rangos observados en la presente investigación, los parámetros físico-químicos: turbidez, OD, SST tienen relación con la remoción de materia orgánica en DBO, mientras que los parámetros físico-químicos: pH, CE, SD, temperatura no la tienen.

Los resultados indican que la eficiencia de remoción de materia orgánica biodegradable en el sistema de tratamiento alcanza un porcentaje de 62.84% en el periodo de estudio, siendo en los pantanos construidos el lugar en donde se encuentra la mayor remoción.

**Palabras clave:** humedal de flujo subsuperficial, aguas domésticas, contaminación orgánica, degradación microbiana, depuración, DBO.

## I. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales que forma parte del desarrollo de cualquier país; es el compuesto químico más abundante del planeta y resulta indispensable para el desarrollo de la vida. Su disponibilidad es paulatinamente menor debido a la contaminación por diversos medios, incluyendo a los mantos acuíferos, lo cual representa un desequilibrio ambiental, económico y social.

La Comisión Nacional del Agua (Conagua) en México señala en particular los siguientes usos: el agropecuario, que incluye el agrícola, el pecuario y la acuicultura; el abastecimiento público, para uso público urbano y doméstico, que incluye todas las industrias y servicios que toman agua de las redes municipales; y el uso industrial, servicios y generación de energía eléctrica. Una vez ocupada el agua para cualquiera de estos destinos, su calidad se altera en diferente grado, por lo que es necesario evaluarla. Las medidas de calidad del agua se clasifican de diferentes maneras, en la mayoría de los casos como características físicas, químicas y biológicas (Conagua, 2007b).

En México se generan alrededor de  $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de aguas residuales, de las cuales reciben tratamiento solo 36 por ciento, lo que indica que se requiere de mayor infraestructura y recursos humanos para mejorar la calidad de este bien, además de propuestas innovadoras que permitan implementar el tratamiento en diferentes condiciones ambientales y socioeconómicas (Conagua, 2007a).

Existen sistemas naturales de tratamiento que se definen como el proceso o técnicas que eliminan sustancias contaminantes presentes en las aguas residuales, sin el empleo de algún aditivo químico. Habitualmente se diferencian dos grandes grupos: los métodos de tratamiento mediante aplicación en el terreno y los sistemas acuáticos. En ambos, 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 (Moreno, *et al.*, 2003).

Los sistemas naturales pueden ser evaluados mediante la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) ya que representa la concentración de materia orgánica biodegradable en el sistema. Se utiliza para determinar la contaminación de las aguas. En la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAA), se cuenta con un sistema de tratamiento natural que cuenta con 25 años de funcionamiento, el cual se encarga de disminuir la carga contaminante generada en diferentes áreas de la universidad. Sin embargo, no se cuenta con registros de evaluaciones anteriores de la eficiencia de tratamiento en remoción de materia orgánica.

Los sistemas de tratamiento natural pueden tener una importante contribución en la remoción de contaminantes orgánicos por lo que en la UAAAN se opta por evaluar la demanda bioquímica de oxígeno, complementando la información con el análisis de los parámetros físico-químicos: pH, Conductividad Eléctrica (CE), Temperatura (T°), Sólidos Disueltos (SD), Turbidez, Oxígeno Disuelto (OD) y Sólidos Suspendidos Totales (SST).

## **1.1. Objetivos**

Evaluar la eficiencia del sistema natural de tratamiento de aguas residuales de la UAAAN para la remoción de materia orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno.

Evaluar la existencia de una relación entre la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), respecto a los parámetros físico-químicos: pH, CE, SD, T°, OD, Turbidez y SST.

Establecer recomendaciones de uso y manejo según la eficiencia del sistema natural de tratamiento para la remoción de materia orgánica.

## **1.2. Hipótesis**

Existe remoción de carga orgánica medida por DBO a través de cada proceso de tratamiento y de manera global del sistema.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

Toda comunidad genera residuos tanto sólidos como líquidos. La fracción líquida de los mismos –aguas residuales- es esencialmente el agua de que se desprende la comunidad una vez ha sido contaminada durante los diferentes usos para los cuales ha sido empleada (Metcalf & Eddy, 1996).

### **2.1. Aguas Residuales**

Se les determina como aguas residuales a aquellas que tienen composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos y en general de cualquier otro uso, que por su naturaleza no puede utilizarse nuevamente en el proceso que la generó y, al ser vertida en cuerpos receptores, puede implicar una alteración a los ecosistemas acuáticos o afectar la salud humana (Conagua, 2007a).

### **2.2. Composición de los Caudales de Aguas Residuales**

La composición de los caudales de aguas residuales de una comunidad depende del tipo de sistemas de recogida que se emplee, y puede incluir los siguientes componentes (Metcalf & Eddy, 1996):

1. Agua residual doméstica (o sanitaria). Procedente de zonas residenciales o instalaciones comerciales, públicas y similares.
2. Agua residual industrial. Agua residual en la cual predominan vertidos industriales.

3. Infiltración y aportaciones incontroladas. Agua que entra tanto de manera directa como indirecta en la red de alcantarillado. La infiltración hace referencia al agua que penetra en el sistema a través de juntas defectuosas, fracturas y grietas, o paredes porosas. Las aportaciones incontroladas corresponden a aguas pluviales que se descargan a la red por medio de alcantarillas pluviales, drenes de cimentaciones, bajantes de edificios y tapas de pozos de registro.

4. Aguas pluviales. Agua resultante de la escorrentía superficial.

### **2.3. Sistemas de Tratamientos Naturales**

El tratamiento de las aguas residuales es una cuestión prioritaria a nivel mundial, ya que es importante disponer de agua de calidad y en cantidad suficiente, lo que permitirá una mejora del ambiente, la salud y la calidad de vida. En México, debido a la insuficiente infraestructura, los altos costos, la falta de mantenimiento y de personal capacitado, sólo 36 por ciento de las aguas residuales generadas reciben tratamiento, lo cual crea la necesidad de desarrollar tecnologías para su depuración (Romero, *et al.*, 2009).

Existen sistemas naturales de tratamiento que se definen como el proceso o técnicas que eliminan sustancias contaminantes presentes en las aguas residuales, sin el empleo de algún aditivo químico. Habitualmente se diferencian dos grandes grupos: los métodos de tratamiento mediante aplicación en el terreno y los sistemas acuáticos. En ambos, 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 (Delgadillo, *et al.*, 2010).

Los métodos naturales se presentan como una opción tecnológica sostenible para las pequeñas y medianas comunidades dada su alta eficacia, bajo costos de operación y mantenimiento y fácil construcción. Además, el aprovechamiento de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas

residuales, no solo representa una fuente de agua, sino también una fuente potencial de entrada de nutrientes, con beneficios económicos y ambientales, convirtiéndose de este modo en una alternativa que toma fuerza a nivel mundial y que es conveniente considerar. Un factor limitante, requieren mayor superficie de terreno disponible que los métodos convencionales lo que limita su uso a pequeños núcleos de población donde la presión urbanística es menor. El segundo factor limitante hace que estos sistemas sólo puedan ser empleados con éxito para determinado tipo de vertidos, pues han de ser totalmente degradables (Bernal, *et al.*, 2003).

Los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales más comunes en México son las lagunas de estabilización y, en menor grado, los humedales construidos. Sus costes son menores a los sistemas convencionales en cuanto a operación y mantenimiento se refiere. En México se encuentran 110 humedales construidos, los cuales tratan  $442.5 \text{ L s}^{-1}$  distribuidos en 16 estados del país y en cuanto a lagunas de estabilización existen en el país 662, tratando  $13,808.5 \text{ L s}^{-1}$  en 27 estados (González, *et al.*, 2011).

El rasgo común a todos ellos es que la depuración se consigue a través de los procesos físicos, químicos y biológicos naturales, desarrollados en un sistema planta–suelo–agua. El avance en el conocimiento de los mecanismos de dichos procesos ha permitido desarrollar criterios científicos de diseño y operación para estos sistemas de depuración (Moreno, *et al.*, 2003).

#### **2.4. Métodos Acuáticos**

En este grupo de métodos naturales de depuración de aguas residuales, se incluyen aquellos cuya acción principal de depuración se ejerce en el seno del medio acuático, participando en el proceso plantas emergentes (especialmente sus raíces) y la actividad microbiológica asociada. Son sistemas que pueden funcionar estacionalmente o a la largo de todo el año, dependiendo fundamentalmente del clima, y que con frecuencia se diseñan para mantener un

flujo continuo. Los sistemas más empleados son: lagunajes, humedales y cultivos acuáticos (Moreno, *et al.*, 2003).

#### **2.4.1. Lagunajes**

Una laguna de estabilización es un estanque impermeable de tierra donde el agua residual se almacena para su tratamiento por medio de la actividad bacteriana con acciones simbióticas de las algas y otros organismos, con profundidades variables, que retienen el agua residual por periodos de cuatro a cincuenta días (Bernal, *et al.*, 2003).

La misión principal de estas lagunas de estabilización es la sedimentación de la mayor parte de los sólidos en suspensión y la eliminación de parte de la materia orgánica por medio de las bacterias presentes. El tratamiento o proceso de depuración se produce gracias a reacciones biológicas, químicas y físicas, que tienen lugar en las lagunas y que tienden a estabilizar el agua residual (Moreno, *et al.*, 2003).

#### **2.4.2. Humedales**

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantenerla en saturación. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm con plantas emergentes como espadañas, carrizos y juncos. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas y permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar (Lara, 1999).

### **2.4.3. Cultivos acuáticos**

Los cultivos acuáticos o sistemas de plantas acuáticas flotantes son básicamente una variante de los humedales artificiales, en la que se introduce un cultivo de plantas flotantes, como los jacintos de agua o las lentejas de agua, cuya finalidad principal es la eliminación de determinados componentes de las aguas a través de sus raíces, que constituyen un buen sustrato responsable de una parte importante del tratamiento (Moreno, *et al.*, 2003).

## **2.5. Eficiencia de Remoción en los Sistemas Naturales de Tratamiento**

La eliminación de la materia orgánica en sistemas naturales alcanza rendimientos entre el 90 a 95 %, alcanzando fácilmente concentraciones en el efluente de 20 mg L<sup>-1</sup> para la DBO y 60 mg L<sup>-1</sup> para la DQO (Lahora, 2003).

### **2.5.1. Ventajas de los sistemas naturales de tratamiento**

Entre algunas ventajas de estos sistemas se encuentran:

Altos rendimientos en la remoción de la DBO, la DQO, los SST, los metales y algunos compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas.

El bajo costo de instalación y mantenimiento, comparado con sistemas físicos, químicos y biológicos convencionales, así como la generación de un paisaje agradable.

Permite regular y almacenar agua que por sus características es sanitaria y agrícolamente apta para el riego (Moreno, *et al.*, 2003).

### **2.5.2. Desventajas de los sistemas naturales de tratamiento**

Entre algunas desventajas se puede mencionar que estos sistemas tienen la necesidad de espacio, las nuevas tecnologías están permitiendo reducir esta necesidad, un efluente con elevado contenido de algas y son de difícil adaptación a los cambios climáticos, además existen pérdidas de agua debido a la evaporación e infiltración, que en zonas de escasez pueden ser importantes (Moreno, *et al.*, 2003).

## **2.6. Parámetros Físicos para la Caracterización de Aguas Residuales**

Los parámetros físicos dan una idea aproximada de la calidad del agua residual, del proceso que se realiza y de los posibles problemas existentes en el tratamiento, en una estación depuradora de aguas residuales.

Los parámetros físicos más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otros parámetros físicos importantes son la temperatura, la conductividad eléctrica y la turbidez (Delgadillo, *et al.*, 2010).

### **2.6.1. Sólidos totales (ST)**

Los sólidos totales son la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a una temperatura entre 103 °C y 105 °C hasta que se evapore (Delgadillo, *et al.*, 2010).

Metcalf y Eddy (1996) clasifican a los sólidos totales en sólidos suspendidos y sólidos filtrables. La fracción de sólidos que quedaría retenida por un filtro de membrana con un tamaño de poro de 1.2 micras, constituye los denominados “sólidos suspendidos”, y el resto los “sólidos disueltos o filtrables”.

### **2.6.2. Sólidos sedimentables**

Se consideran sólidos sedimentables a aquellos sólidos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) en un tiempo de 60 min. Se utiliza para conocer el volumen y la densidad que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual. Su análisis se realiza por volumetría y gravimetría, previa decantación y tamizado. Los tamaños de estos sólidos son mayores de 0.01 mm. Los sólidos sedimentables pueden ser expresados en unidades de mL L<sup>-1</sup> o mg L<sup>-1</sup> (Metcalf & Eddy, 1996).

### **2.6.3. Sólidos suspendidos totales (SST)**

Las actividades domésticas, pecuarias, agrícolas e industriales, además de algunas ocurrencias naturales, son fuentes potenciales de aporte de sólidos en suspensión a las aguas residuales (Conagua, 2007a).

Los efectos de los sólidos suspendidos en los cuerpos receptores varían según el tamaño y naturaleza de los sólidos; pero que desde un punto de vista general, los efectos más notables son: interferencia con la penetración de la luz solar (turbiedad) y el azolve de los cuerpos de agua (Delgadillo, *et al.*, 2010).

### **2.6.4. Sólidos filtrables**

Los sólidos filtrables son la fracción de materia sólida que pasa por un filtro de membrana de vidrio con un tamaño de poro de 1.2 micras. De la misma forma, estos autores clasifican y definen a los sólidos filtrables, según el diámetro de sus partículas, en sólidos coloidales y sólidos disueltos (Delgadillo, *et al.*, 2010).

La fracción coloidal está compuesta por las partículas de materia de tamaños entre 0.00001 mm y 0.01 mm. No es posible eliminar la fracción coloidal por sedimentación. Para este fin, normalmente es necesaria la

oxidación biológica o la coagulación y floculación complementadas con la sedimentación

Los sólidos disueltos están compuestos por moléculas orgánicas e inorgánicas, e iones en disolución en el agua. Los sólidos disueltos tienen un tamaño menor a 0.00001 mm. Se relacionan con el grado de mineralización del agua, ya que son iones de sales minerales que el agua ha disuelto a su paso. Por ejemplo, un tratamiento prolongado en una piscina con compuestos clorados aumentaría la cantidad de sólidos disueltos y la conductividad en el tiempo (Metcalf & Eddy, 1996).

#### **2.6.5. Turbidez**

La turbidez (o turbiedad) es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. Las algas, los sedimentos en suspensión (arcillas, limos, partículas de sílice) y la materia orgánica en el agua pueden aumentar la turbidez hasta niveles peligrosos para ciertos organismos (Abarca, 2002).

Si la turbidez del agua es alta, habrá muchas partículas suspendidas en ella. Estas partículas sólidas bloquearán la luz solar y evitarán que las plantas acuáticas obtengan la luz solar que necesitan para la fotosíntesis. Las partículas suspendidas en el agua también absorberán calor adicional de la luz solar lo cual ocasionará que el agua sea más caliente. El agua caliente no es capaz de guardar tanto oxígeno como el agua fría, así que los niveles de OD bajarán, especialmente cerca de la superficie (Conagua, 2007b).

Para la medición de la luz se utilizan unos instrumentos llamados turbidímetros o nefelómetros; los resultados de las mediciones se expresan en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU por sus siglas en inglés). Se ha averiguado que existe una fuerte correlación entre el nivel de turbidez y el valor de DBO (Campos, 2003).

### **2.6.6. Conductividad eléctrica (CE)**

La conductividad eléctrica representa la capacidad de una solución para transmitir una corriente eléctrica. Su valor depende del tipo de iones involucrados, concentraciones, estado de oxidación de los mismos, así como la concentración relativa de cada uno y la temperatura. En general, las soluciones de ácidos, bases y sales son buenas conductoras, pero la de compuestos orgánicos lo son escasa o nulamente. Se puede evaluar con ella el contenido de sólidos disueltos en forma rápida si se conoce el factor de conversión, el cual oscila, para agua potable, entre 0.55 y 0.9 (Jiménez, 2001).

### **2.6.7. Temperatura**

La temperatura del agua residual es mayor que la temperatura de agua para abastecimiento, como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente del uso doméstico e industrial del agua. Es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como sobre la aptitud del agua para ciertos usos útiles (Jiménez, 2001).

El oxígeno es menos soluble en agua caliente que en agua fría. El aumento en las velocidades de las reacciones químicas que produce un aumento de la temperatura, combinado con la reducción del oxígeno presente en las aguas superficiales, es causa frecuente de agotamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto durante los meses de verano. Estos efectos se ven amplificados cuando se vierten cantidades considerables de agua caliente a las aguas naturales receptoras (Metcalf & Eddy, 1996).

## **2.7. Parámetros Químicos para la Caracterización de Aguas Residuales**

Los parámetros químicos están relacionados con la capacidad de solvencia del agua, por lo que no resultan ser tan fáciles de determinar como los parámetros físicos. Para la determinación de los parámetros químicos, se necesita de un laboratorio que realice pruebas específicas (Campos, 2003).

### **2.7.1. Potencial de hidrógeno (pH)**

La concentración de ion hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El intervalo de concentraciones adecuado para la adecuada proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico. La concentración de ion hidrógeno presente en el agua está muy estrechamente relacionada con la cuantía en que se disocian las moléculas de agua (Aznar, 2000).

El agua residual con concentraciones de ion hidrógeno inadecuadas presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar la concentración de ion hidrógeno en las aguas naturales si ésta no se modifica antes de la evacuación de las aguas (Metcalf & Eddy, 1996).

### **2.7.2. Oxígeno disuelto (OD)**

El oxígeno disuelto adecuado se necesita para una buena calidad del agua. El oxígeno es un elemento necesario para todas las formas de vida.

El principal factor que contribuye a los cambios en los niveles de oxígeno disuelto es el crecimiento de residuos orgánicos. El decaimiento de los residuos orgánicos consume oxígeno y frecuentemente se concentra en el verano, cuando los animales acuáticos requieren más oxígeno para soportar altos metabolismos (Campos, 2003).

El valor máximo de OD es un parámetro muy relacionado con la temperatura del agua y disminuye con ella. La concentración máxima de OD en el intervalo normal de temperaturas es de aproximadamente  $9 \text{ mg L}^{-1}$ , considerándose que cuando la concentración baja de  $4 \text{ mg L}^{-1}$ , el agua no es apta para desarrollar vida en su seno (Aznar, 2000).

### **2.7.3. Materia orgánica**

Materia orgánica son todas aquellas sustancias químicas basadas en carbono, hidrógeno y oxígeno, y muchas veces con nitrógeno, azufre, fósforo, boro y halógenos. No son moléculas orgánicas los carburos, los carbonatos y los óxidos del carbón.

En las aguas residuales la materia orgánica proviene de residuos alimenticios, heces, material vegetal, sales minerales, materiales orgánicos y materiales diversos como jabones y detergentes sintéticos (García, 2004).

Existen tres métodos principales para medir la cantidad de materia orgánica en el agua: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Carbono Orgánico Total (COT). Todos los métodos se basan en la valoración de la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar diferentes fracciones de la materia orgánica presente en el agua (Jiménez, 2001).

Demanda bioquímica de oxígeno. Este parámetro se aplica a las aguas residuales y en menor medida a las aguas superficiales. Es la cantidad de oxígeno consumido (durante 5 días en oscuridad y a una temperatura de  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), para oxidar la materia orgánica presente en el agua por medio de procesos aerobios (biodegradación)

Demanda química de oxígeno. Esta es la cantidad de oxígeno necesario para descomponer químicamente, la materia orgánica degradable y biodegradable en un periodo de tres horas. Se trata de un ensayo empleado

para medir el contenido de materia orgánica de una muestra de agua residual bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo.

Carbono orgánico total. Es un parámetro que permite medir la cantidad de materia orgánica biodegradable y no degradable presente en el agua. Su determinación requiere un equipo muy costoso y un cuidadoso manejo de las muestras, y que por esta razón no es de uso muy generalizado (Delgadillo, et al., 2010).

## **2.8. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

La DBO es una medida de la cantidad de oxígeno consumido en la degradación bioquímica de la materia orgánica mediante procesos biológicos aerobios (principalmente por bacterias y protozoarios). Representa, por tanto, una medida indirecta de la concentración de materia orgánica degradable o transformable biológicamente. Se utiliza para determinar la contaminación de las aguas. Cuando los niveles de la DBO son altos, los niveles de oxígeno disueltos serán bajos, ya que las bacterias están consumiendo ese oxígeno en gran cantidad. Al haber menos oxígeno disponible en el agua, los peces y otros organismos acuáticos tienen menor posibilidad de sobrevivir (Abarca, 2002).

Relacionado con la DBO, encontramos a la  $DBO_5$ , que es la prueba en el laboratorio en el cual una muestra de agua se alimenta con bacteria y nutrientes, y se hace una incubación a una temperatura de 20°C durante 5 días en la oscuridad. El valor de DBO se determina comparando el valor de oxígeno disuelto (OD) de una muestra de agua tomada inmediatamente con el valor de la muestra incubada descrita anteriormente. La diferencia entre los dos valores de OD representa la cantidad de oxígeno requerido para la descomposición de material orgánico en la muestra y es la mejor aproximación del nivel de la DBO. La DBO se mide en ppm o  $mg L^{-1}$  (Jiménez, 2001).

### **2.8.1. Aplicación de la DBO.**

(1) Determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente; (2) dimensionar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales; (3) medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento, y (4) controlar el cumplimiento de las limitaciones a que están sujetos los vertidos. No se usa como parámetro de control en aguas potables (Metcalf & Eddy, 1996).

### **2.8.2 Limitaciones del ensayo de la DBO**

Las limitaciones de la determinación de la DBO incluyen la necesidad de disponer de una elevada concentración de bacterias activas y aclimatadas que desarrollen el papel de inóculo, la necesidad de un pretratamiento cuando haya residuos tóxicos y la necesidad de reducir el efecto de los organismos nitrificantes, el arbitrario y prolongado periodo de tiempo requerido para la obtención de resultados, el hecho de que sólo se midan los productos orgánicos biodegradables y, por último, que el ensayo no tenga validez estequiométrica una vez haya sido utilizada la materia orgánica soluble presente en la muestra.

Posiblemente, la mayor limitación la constituya el hecho de que el periodo de 5 días puede no corresponderse con el momento en el que ya se haya usado toda la materia orgánica soluble. La falta de validez estequiométrica reduce la utilidad de los resultados del ensayo (Metcalf & Eddy, 1996).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Localización del Sitio de Estudio

El estudio se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en la Ciudad de Saltillo, Coahuila, México, en el sistema de tratamiento, ubicado a los 25° 21' 14" Latitud Norte y 101° 01' 2" Longitud Oeste. Colindando al norte con el jardín botánico "Ing. Gustavo Aguirre Benavides", al sur con el jardín hidráulico, al este con el Departamento de Fitomejoramiento y al oeste con el Departamento de Horticultura (Figura 1). El clima de la región es semiseco con pocas lluvias en verano e invierno con una temperatura media anual es de entre 14 y 18 °C. Los inviernos son frescos siendo comunes las temperaturas inferiores a los 0 °C y con probabilidad de nieve.



Figura 1. Localización del sistema de tratamiento de la UAAAN.

### 3.2. Características del Sistema de Tratamiento.

El sistema de tratamiento de la UAAAN, consta de los siguientes elementos, (Figura 2).

- a). Dos tanques igualadores de gasto (Figura 3) con medidas de 8 m de largo, 10 m de ancho y 0.6 m de profundidad, cada uno. Con plantas acuáticas o macrófitas (también llamadas plantas hidrofíticas o hidrofitas) principalmente lirio acuático (*Eichhornia crassipes*).
  
- b). Sistema de pantanos construidos (Figura 4) que cuenta con dos celdas paralelas de 40 m de largo, 10 m de ancho y 0.6 m de profundidad cada una, el flujo de aguas es subsuperficial, la planta dominante es el carrizo (*Phragmites australis*) y el lecho está constituido de grava de construcción de 0.02 m de diámetro. Una pendiente del 1 por ciento asegura un flujo del agua.

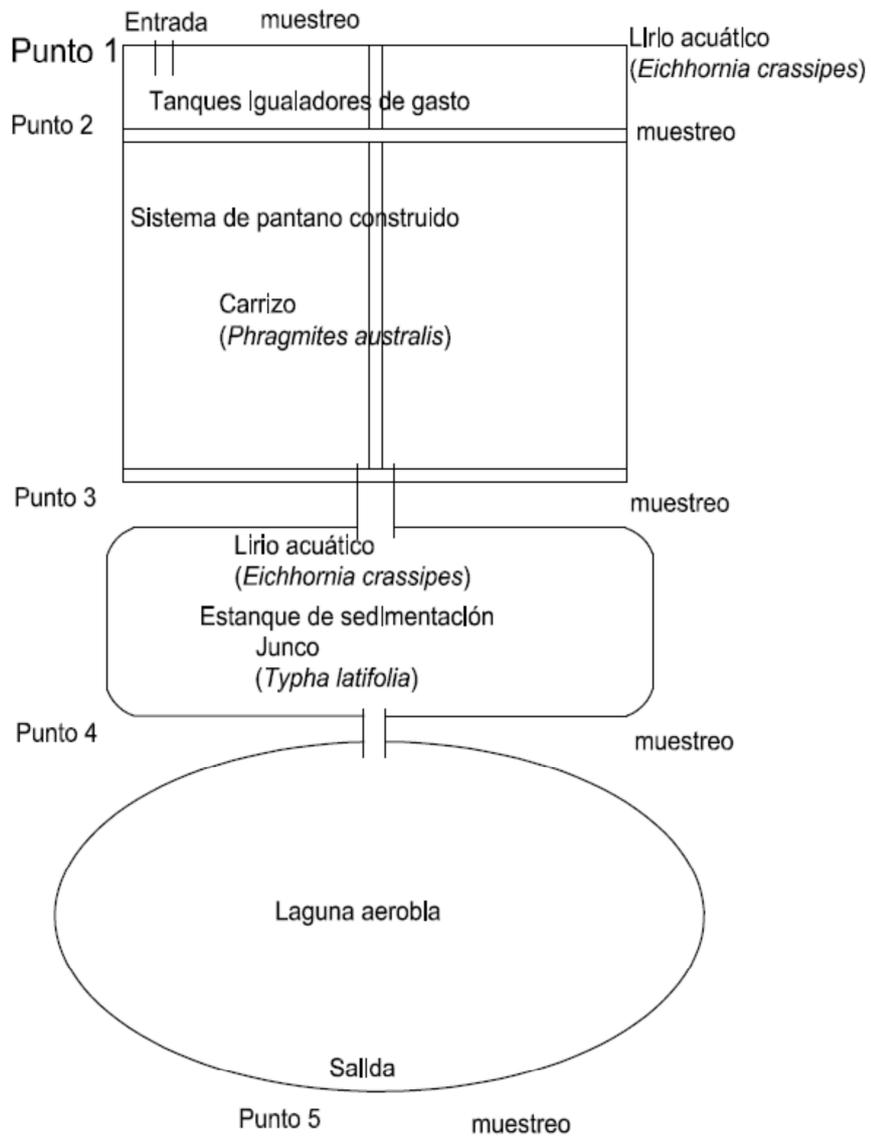


Figura 2. Esquema del sistema de tratamiento de la UAAAN (Sin escala).



Figura 3. Tanques igualadores de gasto.



Figura 4. Sistema de pantano construido de flujo subsuperficial.

c). Estanque de sedimentación (Figura 5) de capacidad aproximada de 250 m<sup>3</sup> con 17.0 m de largo, 24.5 m de ancho y 0.6 m de profundidad. En esta etapa existe una variedad de plantas. La salida del agua de este proceso es de manera puntual.



Figura 5. Estanque de sedimentación.

d). Laguna aerobia (Figura 6) de capacidad aproximada de 1098 m<sup>3</sup>, de 61 m de largo, 30 m de ancho y 0.6 m de profundidad. Su disposición final es el riego agrícola para los proyectos de prácticas agropecuarias y de emprendedores.



Figura 6. Laguna aerobia.

### **3.3 Procesos del Sistema de Tratamiento de la UAAAN**

El sistema natural de tratamiento de la UAAAN somete al agua residual por varios procesos, eliminando así contaminantes. Los procesos son: Homogenización, sedimentación, depuración, filtración, estabilización y almacenamiento.

#### **3.3.1. Proceso de homogenización y sedimentación**

Los tanques igualadores de gasto llevan a cabo los procesos de homogenización y sedimentación. El primer proceso consiste en la homogenización de gasto, esto para asegurar una distribución adecuada de agua residual de los pantanos, así obtener una mayor eficiencia en la depuración y disminuir la velocidad del influente. En el segundo proceso se lleva a cabo un pretratamiento, donde se realiza la sedimentación ya que en estos tanques igualadores ocurren una separación de lo sólido y líquido.

#### **3.3.2. Proceso de depuración**

En el sistema de pantano construido de flujo subsuperficial se lleva a cabo la depuración del agua residual que se derivan de los tanques igualadores de gasto. Contiene un sustrato de grava y por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del sustrato. Esta se encuentra plantada por carrizo (*Phragmites australis*).

Este proceso se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de las plantas y el apoyo físico del lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento, además de servir como material filtrante. En conjunto, estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos.

### **3.3.3. Proceso de filtración**

El estanque de sedimentación lleva a cabo el proceso de filtración, en donde se depositan las partículas de mayor tamaño, en donde se le da un pulimiento al agua.

### **3.3.4. Almacenamiento y estabilización**

Una vez tratada, el agua se almacena en la laguna aerobia la cual es utilizada en el desarrollo de proyectos agrícolas. También se lleva a cabo la descomposición y estabilización de la materia orgánica por medio aerobio, el oxígeno disuelto permite muy bien el desarrollo y multiplicación de las algas.

El efluente final es de color verde debido a la gran cantidad de algas que lleva en suspensión.

## **3.4. Características del Influyente del Sistema**

La composición del agua que entra al sistema natural de tratamiento es de origen doméstico, procede de varias partes de la Universidad que van desde dormitorios, área del comedor y otros edificios que se dedican a la docencia, así como áreas de investigación científica en el área de la agronomía, por lo que está formada por una mezcla de aguas de sanitarios, jabonosas y de laboratorios, por lo que probablemente aportan una cierta cantidad de materia orgánica e inorgánica.

## **3.5. Fechas y Puntos de Muestreo**

Para saber el nivel de eficiencia del sistema natural de tratamiento se recolectaron y analizaron muestras tomadas el 1 de noviembre del 2012 en 5 puntos de muestreo que se presentan en la Figura 2. Para el análisis de

demanda bioquímica de oxígeno se tomaron muestras de agua de los siguientes puntos:

Punto 1. Entrada de agua al sistema.

Punto 2. Entrada al pantano poniente.

Punto 3. Entrada al estanque de sedimentación.

Punto 4 y 5. Entrada y salida, respectivamente, de la laguna aerobia.

El muestreo se hizo con envases de polietileno, las cuales enseguida fueron llevadas al Laboratorio de Calidad de Aguas del Departamento de Riego y Drenaje de la UAAAN, no siendo necesario colocarlas en hielo, debido a la cercanía del sistema de tratamiento y el laboratorio.

### **3.6. Condición de Temperatura**

La temperatura ambiente del 1 de noviembre del 2012 fue de 18.4 °C, sin precipitación, se presentó una condición óptima para la recolección de muestras y la lectura de parámetros ( pH, CE, SD, T°, Turbidez, OD ) *“in situ”*.

### **3.7. Determinación de Concentración de Materia Orgánica Biodegradable**

La determinación de la concentración de materia orgánica biodegradable se llevó a cabo mediante el ensayo de demanda bioquímica de oxígeno que indica la NMX-AA-028-SCFI-2001 en cada uno de los puntos de muestreo del sistema de tratamiento.

Para la determinación de oxígeno disuelto se empleó el método electrométrico con el aparato llamado oxímetro que establece la norma mexicana NMX-AA-012-SCFI-2001.

### 3.8. Procedimiento para la Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La determinación de la concentración de demanda bioquímica de oxígeno en cada uno de los puntos de muestreo del sistema de tratamiento se siguió con la siguiente secuencia:

Preparación de la disolución amortiguadora de fosfato. Mezclando fosfato monobásico de potasio, fosfato dibásico de potasio, fosfato dibásico de sodio heptahidratado, cloruro de amonio, disolviendo en agua destilada.

Preparación del agua para dilución. Colocando el volumen requerido de agua en un frasco y añadiendo por cada litro de agua 1 mL de cada una de las siguientes disoluciones: disolución de sulfato de magnesio, disolución de cloruro de calcio, disolución de cloruro férrico y disolución amortiguadora de fosfatos, saturándolo con oxígeno durante 1 h por lo menos.

Los mililitros de muestra a utilizar se obtuvieron de acuerdo al Cuadro 1.

Cuadro 1. Diluciones recomendadas para diferentes valores esperados de DBO (Metcalf & Eddy, 1996).

mL. de muestra	Rango de DBO	mL. de muestra	Rango de DBO
0.02	30,000-105,000	2.0	300-1,050
0.05	12,000-42,000	5.0	120-420
0.10	6,000-21,000	10.0	60-210
0.20	3,000-10,500	20.0	30-105
0.50	1,200-4,200	50.0	12-42
1.0	600-2,100	100.0	6-21

En un frasco Winkler se agregan los mililitros de muestra, llenando con suficiente agua de dilución, una vez preparada se mide el oxígeno disuelto inicial, utilizando un oxímetro, finalmente se ajusta herméticamente el tapón, poniendo un sello hidraulico y la contratapa y se coloca en la incubadora a 20 °C por un periodo de 5 días (Figura 7).

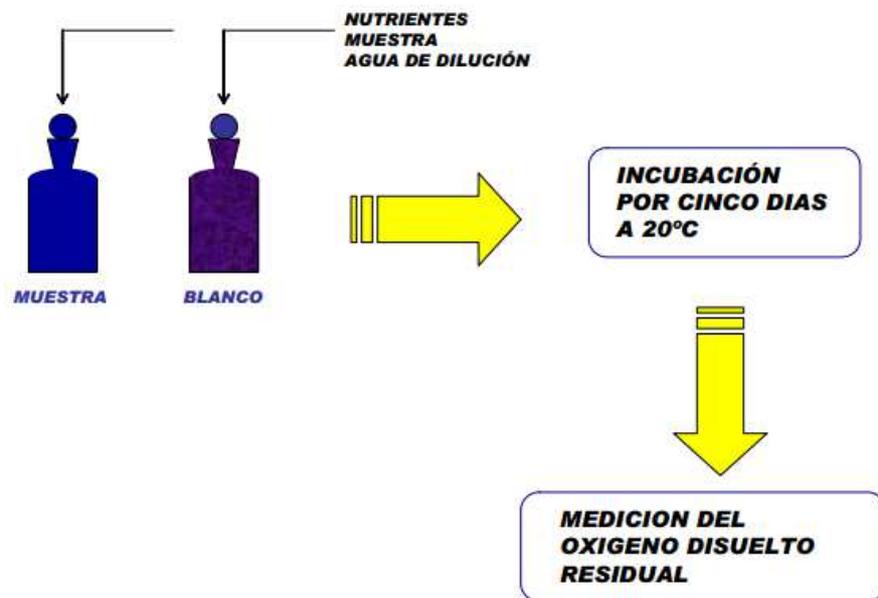


Figura 7. Método de determinación de materia orgánica biodegradable por medio de la prueba de DBO.

El procedimiento es de la misma manera con cada una de las muestras y se coloca un blanco o testigo junto con las muestras analizadas.

Después de 5 días de incubación se determina el oxígeno disuelto final en cada una de las botellas Winkler.

La demanda bioquímica de oxígeno se calculó con la siguiente ecuación:

$$DBO_5 (mg L^{-1}) = \frac{(D1 - D2) - (B1 - B2)}{P} \times 1000$$

Donde:

$D1$  = oxígeno disuelto de la muestra con agua dilución, antes de incubación,  $\text{mg L}^{-1}$ .

$D2$  = oxígeno disuelto de la muestra con agua dilución, después de incubación,  $\text{mg L}^{-1}$ .

$P$  = fracción volumétrica de la muestra, mL .

$B1$  = concentración de oxígeno disuelto del blanco, antes de incubacion,  $\text{mg L}^{-1}$ .

$B2$  = concentración de oxígeno disuelto del blanco, después de incubacion,  $\text{mg L}^{-1}$ .

### **3.9. Determinacion de la Cantidad de Materia Suspendida**

La determinacion de la cantidad de materia suspendida en cada uno de los puntos de muestreo del sistema de tratamiento se utilizó el parametro físico de sólidos suspendidos totales (SST).

### **3.10. Procedimiento de Sólidos Suspendidos Totales**

El procedimiento para determinar la concentracion de sólidos suspendidos totales (SST) es el siguiente:

Cada uno de los filtros son colocados en el aparato de filtracion, donde son lavados al aplicarle agua destilada y vacio.

Son acomodados los papeles filtro en discos de aluminio, colocándolos en la estufa, durante 1 o 2 horas. Posteriormente se sacan y colocan al desecador. Luego se pesan en la balanza analitica.

Nuevamente los filtros son colocados al embudo de filtración, agregándole 10 mL de muestra y aplicándole vacio. Se acomodan y colocan en la estufa a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  por un periodo de 24 horas. Por último se pesan en la balanza analítica.

Cálculo de los sólidos suspendidos totales:

$$SST (mg L^{-1}) = \frac{(A - B) \times 1000}{Volumen de muestra, mL}$$

Donde:

$A$  = Peso del filtro mas residuo seco, mg

$B$  = peso del filtro, mg

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras fueron tomadas el 1 de noviembre del 2012 en un periodo comprendido entre las 9:30 a.m. y las 12:00 p.m., al momento el sistema contaba con un gasto de entrada aproximadamente de  $2.50 \text{ L s}^{-1}$  y un gasto en la salida del pantano poniente de  $0.011 \text{ L s}^{-1}$ . Así mismo se midieron, “*in situ*”, los parámetros físico-químicos: pH, CE, T°, SD, turbidez, OD y se determinó en laboratorio los SST, los cuales son presentados en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Variables de parámetros físico-químicos del agua en la planta de tratamiento.

Punto de muestreo	pH	CE $\text{mScm}^{-1}$	SD ppm	T° °C	Turbidez NTU	OD ppm	SST $\text{mg L}^{-1}$
1	8.73	1.41	700	21.9	727.67	0.98	437
2	7.60	1.78	890	21.5	89.00	1.08	80
3	7.98	2.08	1040	17.05	33.79	2.62	45
4	8.92	1.88	930	18.35	79.67	13.78	25
5	8.90	1.76	890	19.8	50.39	7.14	120

pH= potencial de hidrógeno; CE=Conductividad eléctrica; T°=temperatura; SD= Sólidos disueltos; OD= oxígeno disuelto, SST= Sólidos suspendidos totales.

En el Cuadro 3 se presentan las concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) obtenidas en cada punto de muestreo.

Cuadro 3. Concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno en cada punto de muestreo.

Punto de muestreo	DBO $\text{mg L}^{-1}$
1	465.5
2	499
3	125
4	218
5	173

En el Cuadro 4 se presentan las eficiencias de remoción en materia orgánica en cada punto de muestreo. Lo cual indica la existencia de una reducción en materia orgánica en la planta de tratamiento.

Cuadro 4. Eficiencia de remoción en cada punto de muestreo.

Puntos de muestreo	Eficiencia de remoción en DBO%
1-2	-7.20
2-3	74.95
3-4	-74.40
4-5	20.64
1-5	62.84

Con el gasto de entrada y el volumen del tanque igualador de gasto del lado oriente se calculó el tiempo de retención.

$$Tr = \frac{LWy}{Q}$$

Donde:

L= largo de la celda del tanque, m.

W=ancho de la celda del tanque, m.

y = profundidad del tanque, m.

Q= caudal de entrada, m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

$$Tr = \frac{8 * 10 * 0.6}{0.0025}$$

$$Tr = 19,200.00 \text{ s}$$

$$Tr = 5.33 \text{ h}$$

El gasto del tanque igualador oriente es repartido en dos partes, uno al tanque igualador poniente y el otro al pantano oriente. El tiempo de residencia en el tanque oriente fue de 5.33 h, como consecuencia no hubo remoción de materia orgánica en la salida del tanque poniente, ya que posiblemente hay un aporte de materia orgánica por la descomposición de las plantas presentes (lirio acuático).

Para determinar el tiempo de retención o residencia es necesario hacer pruebas de trazadores debido a las pobres condiciones del sistema y por consiguiente a los cortos circuitos y zonas muertas que presenta.

#### **4.1. Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno**

En la evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica, se encontró una reducción en las concentraciones de DBO que fue de  $465.5 \text{ mg L}^{-1}$  (en el punto 1) a  $173 \text{ mg L}^{-1}$  (en el punto 5), conforme el agua avanza en el sistema, lo que se aprecia en la Figura 8. El cambio se debe a los procesos de sedimentación, depuración, filtración y estabilización en los que el sistema natural de tratamiento somete al agua residual. Las variaciones en las tasas de remoción se deben a las condiciones del sistema tales como cortos circuitos y zonas muertas.

En los primeros dos puntos de muestreo (tanques igualadores de gasto) la concentración de DBO es alta debido al aporte de materia orgánica del influente y a los depósitos de natas de grasas, material flotante y restos de vegetación. La mayor reducción de DBO se llevó a cabo del punto 2 al 3 (entrada y salida del pantano poniente), posiblemente por la sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización, ya que el agua pasa entre el sustrato de grava y los carrizos (*Phragmites australis*). Continuando el tratamiento del agua entra a la laguna aerobia en donde la concentración de DBO aumento muy poco, posiblemente por la descomposición de los residuos de las plantas y otra materia orgánica presente en el pantano

ponente o por un corto circuito. Se termina el proceso cuando el agua se almacena en la laguna aerobia (punto 5) en donde se obtuvo una DBO de 173 mg L<sup>-1</sup> por lo que indica que el sistema no está operando de una manera eficiente, ya que el nivel de referencia para estos tipos de sistemas naturales es de 20 mg L<sup>-1</sup> (Lahora, 2003).

La NOM-001-ECOL-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, indicando una concentración de DBO del 75 – 150 mg L<sup>-1</sup> en embalses artificiales para uso en riego agrícola. La concentración del efluente final (punto 5) señala que se encuentra fuera del límite máximo permisible.

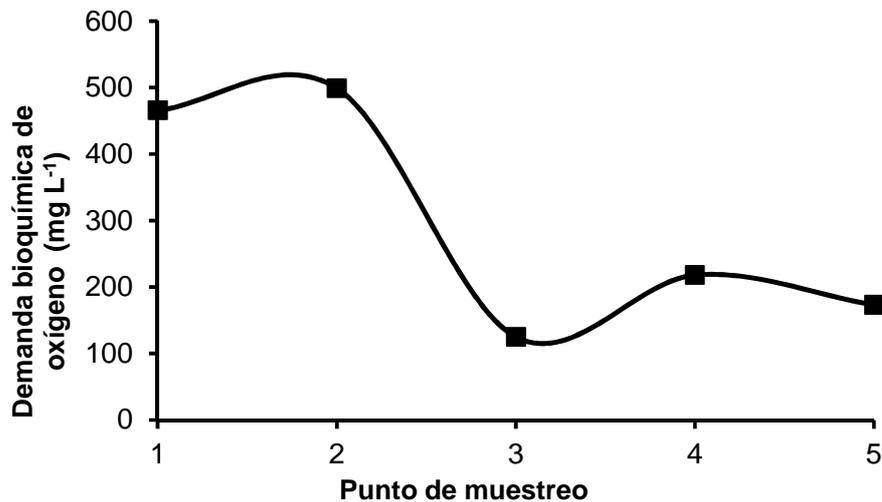


Figura 8. Concentración de Demanda bioquímica de oxígeno en cada punto de muestreo.

## 4.2. Parámetros Físico-Químicos del Agua del Sistema

Se realizaron mediciones de los parámetros físico-químicos del agua del sistema, para evaluar si existe una relación entre la reducción de DBO con respecto a pH, CE, T°, SD, Turbidez, OD, SST. Los cuales se presentan en las Figuras, 9 a 15.

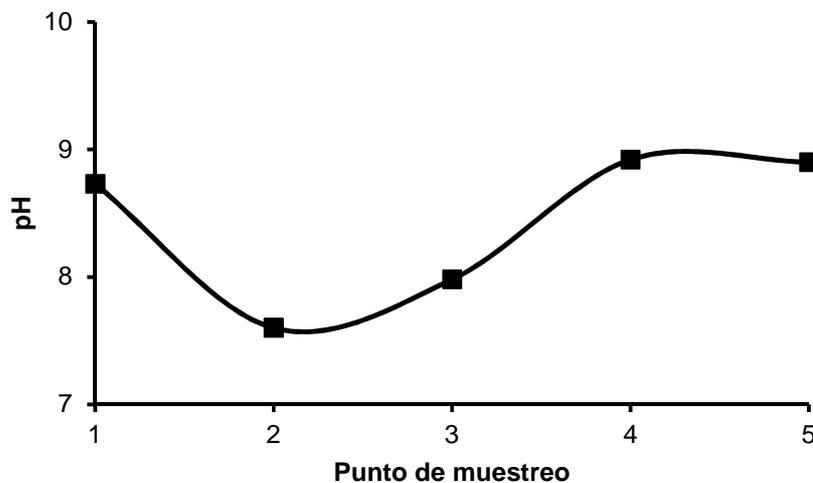


Figura 9. Representación del pH en relación a cada punto de muestreo.

En la Figura 9 se muestran los cambios de concentración en pH en el sistema. El pH del influente de entrada al sistema fue de 8.73 debido a las características del agua residual doméstica. En el punto 2 (salida del tanque igualador de gasto poniente) se observa una disminución del pH al pasar el agua por los tanques igualadores de gasto, en estos se encuentra una capa gruesa de sedimentos (materia orgánica), al descomponerse liberan ácidos aportando iones de hidrogeno y reduciendo la alcalinidad del agua. El valor de pH fue aumentando hasta llegar a 8.9, ya que en el pantano se llevan a cabo procesos, físicos, químicos y biológicos.

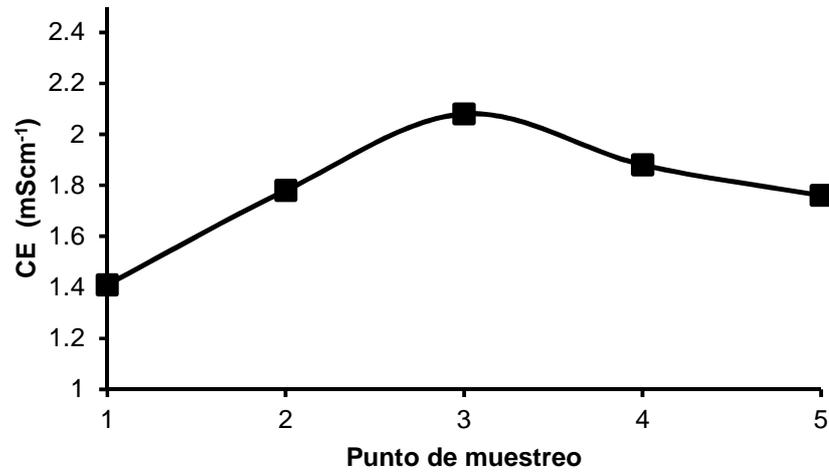


Figura 10. Representación de la conductividad eléctrica en cada punto de muestreo.

En la Figura 10 se muestran los cambios de valores en conductividad eléctrica en el sistema. El influente de entrada muestra un valor de CE menor ( $1.41 \text{ mS cm}^{-1}$ ), al continuar el paso del agua por el sistema muestra un aumento, por la presencia o aportes de iones que hacen que el agua aumente la capacidad de transmitir corriente eléctrica ( $1.76 \text{ mS cm}^{-1}$ ).

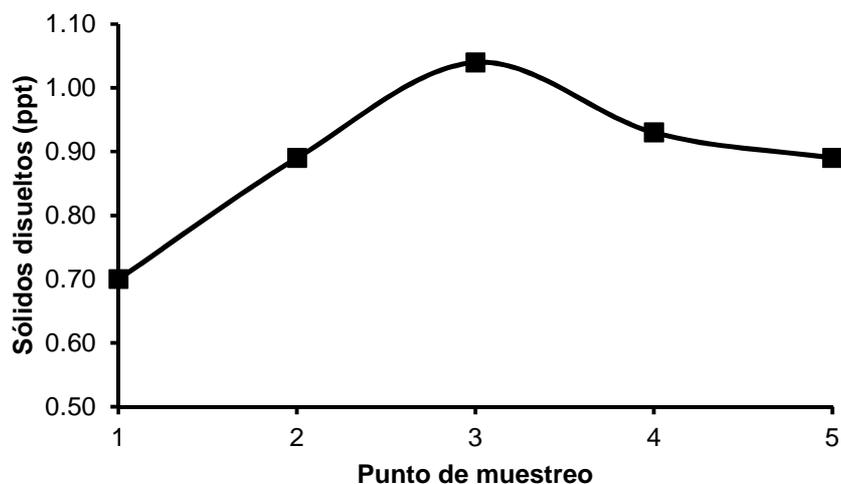


Figura 11. Representación de sólidos disueltos en cada punto de muestreo.

En la Figura 11 se muestra un incremento en la concentración de sólidos disueltos al pasar por el sistema. El agua del influente (punto 1) entra con menor cantidad de sólidos disueltos, pero al pasar por el sistema va aumentando. El mayor aumento de sólidos disueltos fue en la entrada del tanque de sedimentación (punto 3) posiblemente por la evapotranspiración y un posible lavado de sales acumuladas en los periodos de estiaje del sistema (periodo vacacional de la Universidad) que contribuyen a que el agua concentre más cantidad de sales disueltas, otra posible razón del aumento es que se esté aportando agua de una fuente externa.

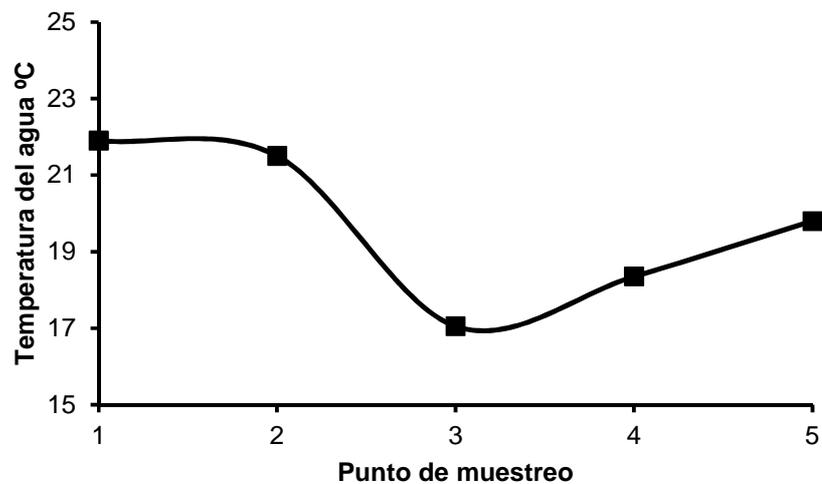


Figura 12. Representación de la temperatura °C en cada punto de muestreo.

En la Figura 12 se muestran los valores de temperatura en los diferentes puntos de muestreo. La temperatura de entrada del influente al sistema fue de 21.9 °C ya que hay incorporación de agua caliente procedente del comedor, laboratorios, oficinas e internados. Del punto 2 al 3 (pantano poniente) la temperatura del agua se ve disminuida a 17.05 °C, porque es retenida en donde pasa lentamente entre el sustrato y las raíces de los carrizos, actuando estos como termorreguladores y evitando el contacto directo del agua con la radiación ultravioleta solar. Al pasar el agua por el estanque de sedimentación (punto 3) y almacenándose en la laguna aerobia (punto 4 y 5) la temperatura se fue elevando llegando a 19.8 °C, ya que el agua se encuentra al aire libre en contacto directo con la radiación ultravioleta solar y por partículas suspendidas en el agua también absorben calor adicional de la luz solar lo cual ocasiona que el agua sea más caliente.

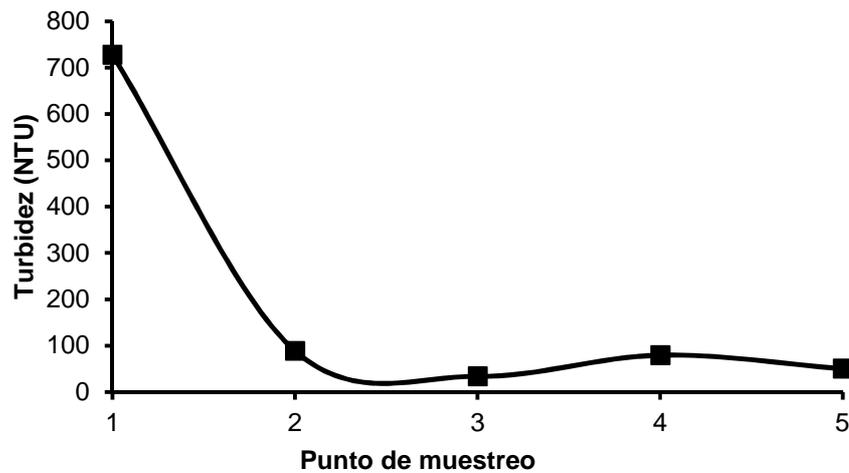


Figura 13. Representación turbidez en cada punto de muestreo.

En la Figura 13 se muestra una reducción en los valores de turbidez. El agua que entra al sistema tiene una mayor turbidez y al pasar por los tanques igualadores de gasto se ve reducida por el proceso de sedimentación. Continuando el recorrido del agua por el sistema entra en el pantano poniente (punto 2) depurando el agua por filtración y sedimentación, disminuyendo aún más la turbidez, valor que en los demás puntos de muestreo se mantienen de casi de igual forma.

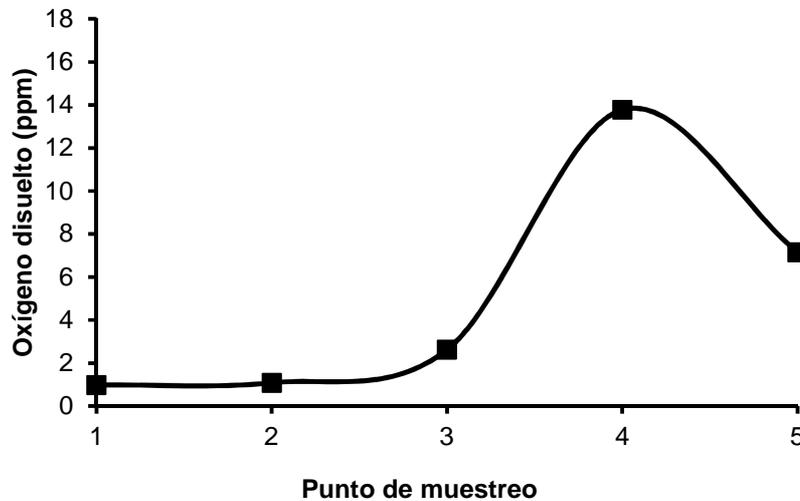


Figura 14. Representación de oxígeno disuelto en cada punto de muestreo.

En la Figura 14 se muestra la concentración de oxígeno disuelto en el agua. En los primeros puntos (tanques igualadores de gasto) existe una nata de grasas, material flotante, restos de vegetación que no permiten el paso del oxígeno al agua, por lo que en estos primeros puntos el agua residual es rica en materia orgánica. Siguiendo su curso el agua entra al pantano poniente (punto 3), pasando por entre los carrizos, de manera superficial por el sustrato aumentando así la concentración de oxígeno disuelto. El mayor aumento que se muestra en la concentración de oxígeno posiblemente se deba que al entrar el agua al estanque de sedimentación (punto 3) cae generando burbujas y se golpea dispersándose en gotas más pequeñas ayudando esto a su oxigenación. Al pasar el agua por la laguna aerobia o de almacenamiento el oxígeno disminuye posiblemente a la descomposición de las algas que aportan sólidos en suspensión.

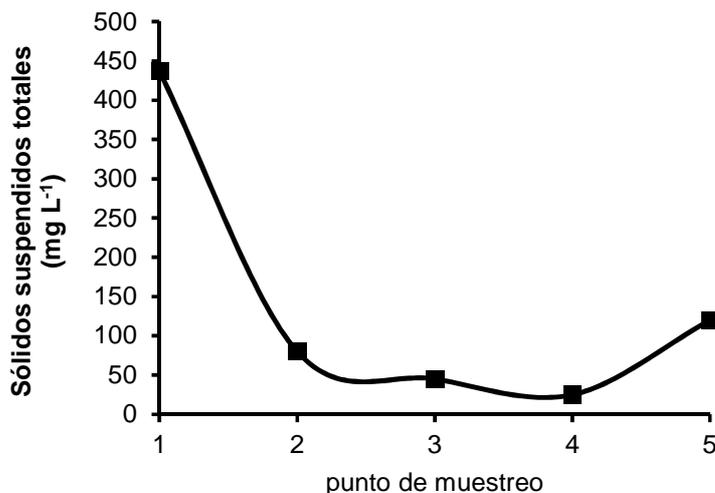


Figura 15. Representación de sólidos suspendidos totales en cada punto de muestreo.

En la Figura 15 se muestra una reducción de sólidos suspendidos totales. Entra el agua residual a los tanque igualadores de gasto (punto 1) aportando sólidos suspendidos como desechos humanos, desperdicios de alimentos, papel, trapos y células biológicas que forman una masa de sólidos suspendidos en el agua. Uno de los procesos que llevan a cabo estos tanques igualadores de gastos son la sedimentación (separación de lo sólido con lo líquido), posiblemente sea la razón de la disminución de sólidos suspendidos totales a la salida de estos.

Después de pasar el agua por los tanques igualadores de gasto entra al pantano poniente (punto 2), en donde se lleva a cabo la depuración del agua por los procesos de sedimentación, degradación microbiana y acción de las plantas, posiblemente sea la razón por la que la cantidad de sólidos suspendidos se vea reducida aún más.

Al pasar el agua por el pantano poniente entra más depurada al estanque de sedimentación (punto 3) donde se filtran partículas de mayor tamaño, continuando su recorrido el agua entra y se almacena en la laguna aerobia (punto 4 y 5). En ella se encuentran presentes algas que posiblemente se estén descomponiendo y aportando sólidos suspendidos.

#### 4.3. Comparación de Concentraciones de Demanda Bioquímica de Oxígeno con Relación a los Parámetros Físico-químicos

En las Figuras 16-22 se realiza una comparación de la concentración de demanda bioquímica de oxígeno y los parámetros físico-químicos medidos en cada punto de muestreo.

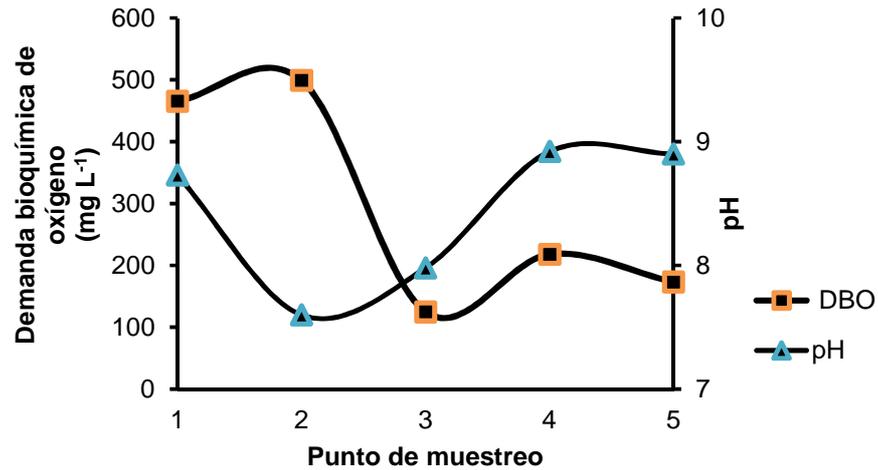


Figura 16. Comparación de pH con respecto a demanda bioquímica de oxígeno.

En la Figura 16 se observan los cambios de pH del agua. El pH de entrada fue de 8.73 y disminuyó a 7.6 al pasar el agua por los tanques igualadores (punto 1 y 2) posiblemente se esté llevando a cabo la descomposición de materia orgánica y liberación de ácidos. Al pasar el agua por los demás componentes del sistema (puntos 3,4 y 5) el pH aumentó poco a poco hasta llegar a 8.9, ya que en ellos se llevan a cabo procesos biológicos al degradarse la materia orgánica e inorgánica, algunos de los procesos pueden ser oxidación de compuestos de azufre, reducción bacteriana desasimilatoria de sulfatos, amonificación, desnitrificación, nitrificación, metanogénesis y reducción de hierro (Johnson y Hallberg, 2005).

A pesar de los cambios de pH del agua y el valor adecuado para diferentes procesos de tratamiento, para la existencia de la mayoría de la vida biológica puede ser muy restrictivo y crítico, generalmente es de 6,5 a 8,5

siendo el ambiente más confortable de trabajo para las bacterias (Metcalf & Eddy, 1996), no se observa una relación con la DBO.

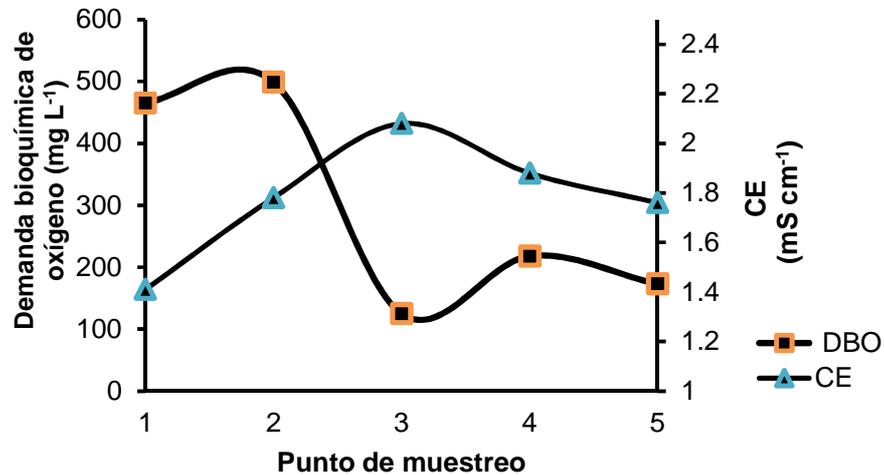


Figura 17. Comparación de conductividad eléctrica con respecto a demanda bioquímica de oxígeno.

En la Figura 17 se muestra el valor de la conductividad eléctrica en cada punto de muestreo, pero esta no afecta a las concentraciones de DBO, ya que la conductividad eléctrica representa la capacidad de una solución para transmitir una corriente eléctrica. Su valor depende del tipo de iones involucrados, concentraciones, estado de oxidación de los mismos, así como la concentración relativa de cada uno y la temperatura. Los compuestos orgánicos no se disocian en el agua y, en consecuencia, no afectan la conductividad eléctrica. Se puede evaluar con ella el contenido de sólidos disueltos en forma rápida si se conoce el factor de conversión (Jiménez, 2001).

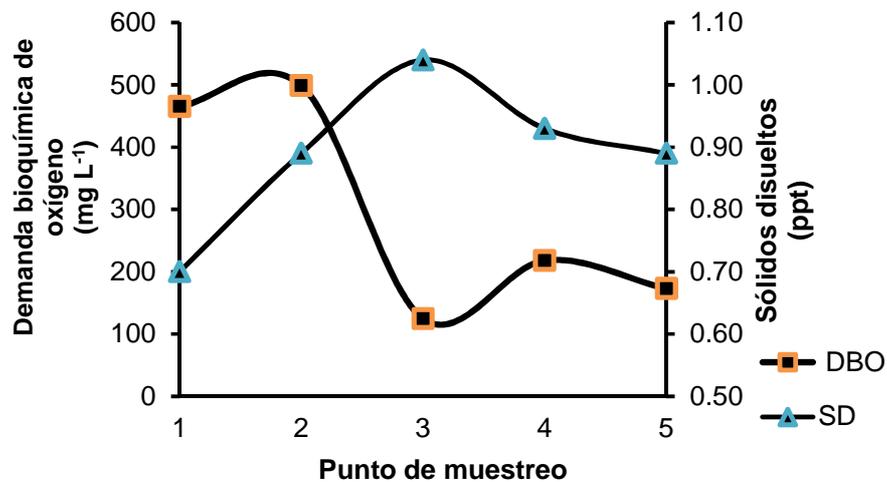


Figura 18. Comparación de sólidos disueltos con respecto a demanda bioquímica de oxígeno.

En la Figura 18 se muestra un incremento en la concentración de sólidos disueltos en el sistema, posiblemente por la evapotranspiración de las plantas y un posible lavado de sales acumuladas en los periodos de estiaje del sistema (periodo vacacional de la universidad) que contribuyen a que el agua se concentre más cantidad de sales disueltas, otra posible razón del aumento de los sólidos disueltos es que se esté aportando agua residual de una fuente externa, en la parte oriente del sistema pasa una tubería que conduce agua residual pero esta se encuentra rota.

Los sólidos disueltos son moléculas e iones (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, sodio, potasio, calcio y magnesio); que se encuentran diluidos en el agua. No existe relación entre la SD y la DBO, ya que la materia soluble de un agua residual está compuesta mayoritariamente por materia inorgánica, mientras que la materia en suspensión es predominante de naturaleza orgánica (Jiménez, 2001). Tal motivo los sólidos disueltos no influyen sobre las concentraciones de DBO.

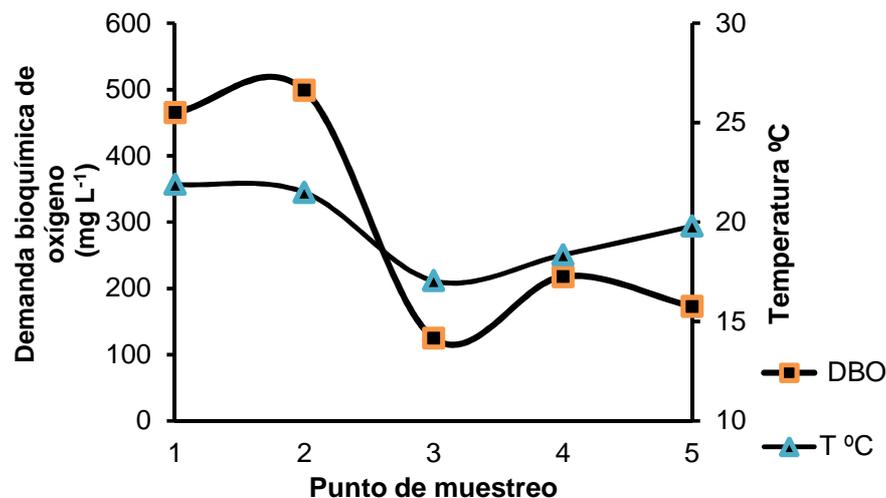


Figura 19. Comparación de temperatura con respecto a demanda bioquímica de oxígeno.

En la Figura 19 se observa una disminución de la temperatura del agua de 21.9 °C a 19.8 °C. A pesar de que la temperatura es determinante para el desarrollo de la actividad bacteriana, reacciones químicas y velocidades de reacción (Metcalf & Eddy, 1996) no se observa una relación con la remoción de carga orgánica en DBO.

Investigadores (Griffin, *et al.*, 1999) han informado de que la variación estacional de la temperatura de las aguas residuales tiene poco o ningún efecto sobre la remoción de demanda bioquímica de oxígeno en humedales de flujo subsuperficial.

La retención de la materia en suspensión, empieza a degradarse y así representa una fuente interna de materia orgánica. La retención de estos sólidos podría estar relacionada con que en un sistema subsuperficial no se nota una mejora en la eliminación del DBO en periodos cálidos. Los sólidos en suspensión se descomponen más rápidamente en estos períodos siendo mayor la generación interna de materia orgánica, esto enmascararía un efecto favorable de la temperatura en la eliminación de DBO (Sánchez, 2010).

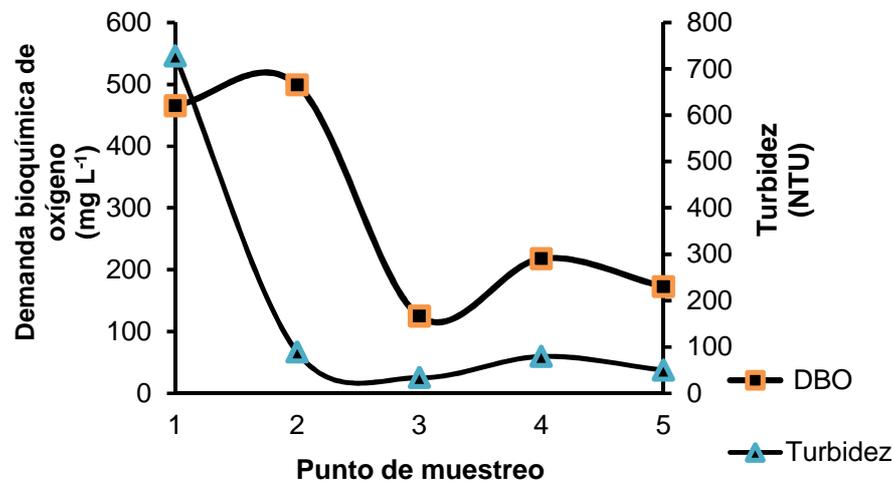


Figura 20. Comparación de turbidez con respecto a demanda bioquímica de oxígeno.

En la Figura 20 se muestran la disminución de turbidez en el sistema que fue de 727.67 NTU a 50.39 NTU. El cambio se debe a los procesos (sedimentación, depuración, filtración y estabilización) en los que el sistema somete al agua residual. Los niveles altos de turbidez son causados por sólidos suspendidos, por lo que la podemos considerar como una medida del efecto de ellos. Se ha averiguado que existe una fuerte correlación entre el nivel de turbidez y el valor de DBO (Jiménez, 2001).

Se observa una relación entre el nivel de turbidez y el valor de DBO en los puntos de muestreo 2 al 5, el cambio en el punto de muestreo 2 (entrada al pantano poniente) se debió posiblemente a la sedimentación de los sólidos suspendidos en los tanques igualadores de gasto, pero el aumento en la DBO a las malas condiciones en que se encuentran los tanques igualadores de gasto donde existe una gran acumulación de sedimentos, natas de grasa, material flotante, que evitan la entrada de oxígeno.

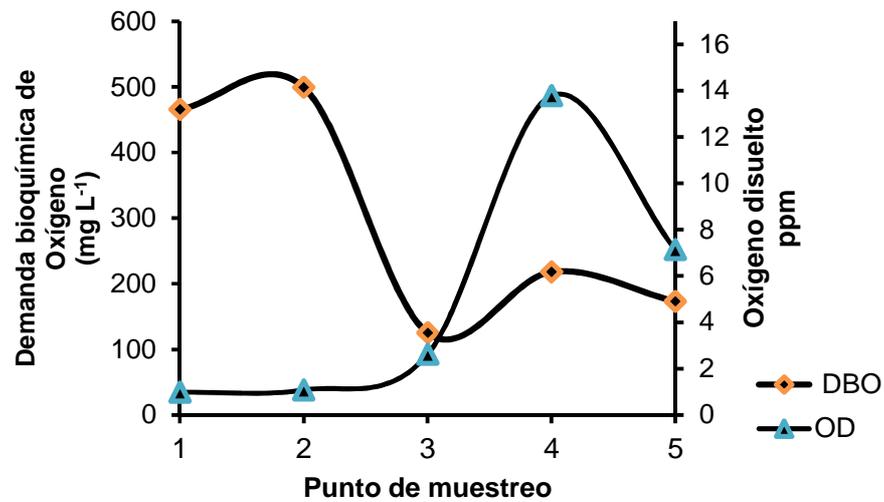


Figura 21. Comparación de oxígeno disuelto con respecto a demanda bioquímica de oxígeno.

En la Figura 21 se observa una variación en la concentración de oxígeno disuelto en el sistema debido principalmente a los procesos bioquímicos que realizan los microorganismos presentes en el agua residual los cuales consumen el oxígeno para llevar a cabo los procesos de transformación y eliminación. La cantidad de oxígeno disuelto es inversamente proporcional a la DBO, ya que si aumenta la producción de oxígeno disminuirá la DBO (Jiménez, 2001), por lo que se concluye que existe relación entre el OD y la DBO.

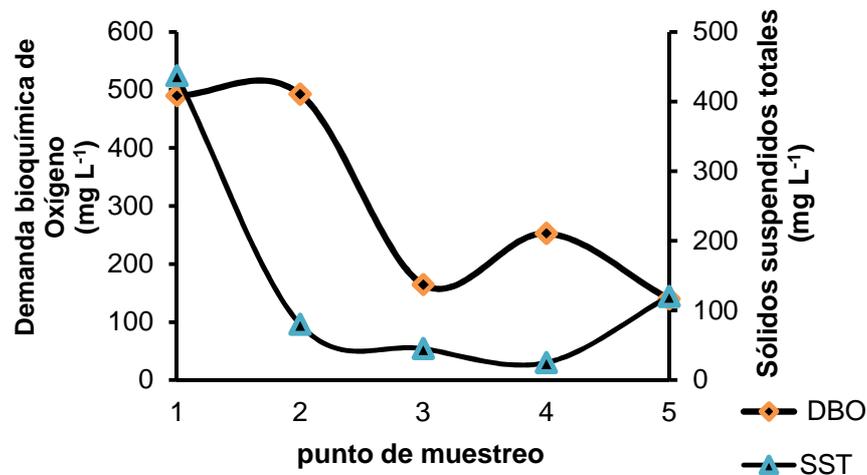


Figura 22. Comparación de sólidos suspendidos totales con respecto a demanda bioquímica de oxígeno.

Como se observa en la Figura 22, la remoción de sólidos suspendidos totales en el sistema fue de  $437.7 \text{ mg L}^{-1}$  a  $120 \text{ mg L}^{-1}$ . El cambio se debe a los procesos en los que el sistema somete al agua residual. Esto influyó en la concentración de DBO en el sistema, ya que los sólidos suspendidos al ser removidos quedan sedimentados ya sea por el proceso de sedimentación o filtración, aportando así materia orgánica que empieza a degradarse y así representa una fuente interna de materia orgánica. La retención de sólidos suspendidos podría estar relacionada con la concentración alta de DBO (Sánchez, 2010).

El concentración del efluente final fue de  $120 \text{ mg L}^{-1}$  y la remoción de sólidos suspendidos totales fue del 72.52%, investigadores han encontrado que la remoción de solidos suspendidos totales ocurre de igual forma con la DBO en los sistemas naturales, con remoción del 90 a 95 % y con una concentración en el efluente de  $20 \text{ mg L}^{-1}$ , por lo que se concluye que el sistema no se encuentra trabajando en óptimas condiciones, por falta de mantenimiento (Lahora, 2003).

Como se observa en las figuras anteriores, y dentro de los rangos de valores evaluados existe relación entre los parámetros físico-químicos: turbidez, OD, SST y la concentración de demanda bioquímica de oxígeno, ya que al aumentar o disminuir uno de ellos, la DBO se ve afectada, estableciendo el comportamiento de los determinantes de contaminación del agua en la salida del sistema, con respecto a la entrada, estimando así la eficiencia de remoción en carga orgánica.

Mientras que en pH, SD, CE, temperatura no se exhibe una relación tan marcada con la DBO, ya que sus concentraciones son debido al rango evaluado, a los procesos propios del sistema en la degradación de materia orgánica e inorgánica, la retención y aporte de iones (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, sodio, potasio, calcio y magnesio).

## V. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, la eficiencia de remoción de materia orgánica en DBO de manera global en el sistema es del 62.84%, y la concentración del efluente final de  $173 \text{ mg L}^{-1}$ , otros investigadores han obtenido eficiencias de remoción del 90% al 95 %, y con un nivel de efluente en sistemas naturales de tratamiento de  $20 \text{ mg L}^{-1}$  (Lahora, 2003), por lo que se concluye que el sistema no muestra una eficiencia óptima en la remoción de materia orgánica, situación posiblemente influida por la producción de DBO residual y por la acumulación de sedimentos, natas de grasas ,basura, descomposición de los residuos de plantas, otra materia orgánica natural presente, ausencia de las actividades de limpieza y mantenimiento del sistema.

La NOM-001-ECOL-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, indicando una concentración de DBO de 75 a  $150 \text{ mg L}^{-1}$  en embalses artificiales para uso en riego agrícola. El resultado de concentración del efluente final es de  $173 \text{ mg L}^{-1}$ , señalando que se encuentra fuera del límite máximo permisible.

La mayor parte de la eliminación de carga orgánica en DBO del sistema se llevó a cabo en el pantano construido de flujo subsuperficial con un porcentaje de remoción del 74.95%, comparado con los demás elementos del sistema (Cuadro 4).

Dentro de los rangos de valores evaluados existe relación entre los parámetros físico-químicos: turbidez, OD, SST y la concentración de demanda bioquímica de oxígeno, ya que al aumentar o disminuir uno de ellos, la DBO se ve afectada, establecen el comportamiento de los determinantes de contaminación

del agua en la salida del sistema, con respecto a las concentraciones de ellos en la entrada del mismo, se estima la eficiencia de la remoción en carga orgánica.

Por otro lado, los parámetros de pH, SD, CE, temperatura no exhiben una relación tan evidente con la DBO, debido, posiblemente, al rango evaluado, ya que aquellos son influenciados por procesos propios del sistema como la degradación de materia orgánica e inorgánica, retención y aporte de iones (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, sodio, potasio, calcio y magnesio).

## **VI. RECOMENDACIONES**

De acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación de la eficiencia del sistema natural de UAAAN, se recomienda.

Que toda el agua residual cruda de la universidad entre al tanque Imhoff para llevarse a cabo un tratamiento primario, posteriormente sea depositada al sistema natural, ya que el agua residual cruda de la universidad es descarga en dos partes, una de manera puntual al sistema natural, proveniente del área de comedor y dormitorios, la otra parte es depositada al tanque Imhoff, proveniente de algunos de los edificios que se dedican a la docencia y áreas de investigación científica. El agua que sale del tanque Imhoff es conducida y descargada en el tanque igualador de gasto oriente, mezclándose nuevamente con el agua residual cruda.

Reparar las fugas de la tubería conductora de agua residual del tanque imhoff.

Se recomienda la limpieza y un plan de mantenimiento del sistema natural el cual se basa en la eliminación de sólidos, remoción de material flotante, retiro de materia vegetal, corte y poda, para evitar los cortos circuitos y zonas muertas del sistema.

Se recomienda el monitoreo constante de gasto para evaluar tiempos de residencia.

Se aconseja realizar pruebas de trazadores para evaluar la hidrodinámica del sistema, determinando así zonas muertas y de estancamiento.

Es necesario seguir monitoreando la calidad del agua, mediante los parámetros físico-químicos y los indicadores de contaminación para estimar la eficiencia del sistema e identificar los problemas potenciales.

Se recomienda emplear especies acuáticas tales como peces y tortugas, para el monitoreo el efluente final (laguna aerobia) ya que son indicadores de los impactos de la contaminación por que inducen cambios en la estructura de sus diversas comunidades, de sus poblaciones, y la de los propios organismos.

Las especies de peces indicadoras, que muestran tolerancia principalmente a contaminantes de origen urbano, industrial y/o agrícola están como primer grupo: *Oreochromis aereus*, *Aastyanax faciatus* y *Sicydium multipuctatum*. *Xenotoca variata*, *O. mossambicus* y *Cyprinus carpio* altas concentraciones de nitratos, sulfatos y fosfatos. El segundo grupo lo conforman las especies sensibles a pequeñas concentraciones de contaminantes tales como *Ictalurus dugesi*, *Girardinichthys multiradiatus* y *Ictiobus bubalus*.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, F. J. 2002. Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos.  
<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/533/tecnicas.pdf>
- Aznar, J. A. 2000. Determinación de los Parámetros Físico-Químicos de Calidad de las Agua. <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/ingenieria-ambiental/otros-recursos-1/OR-F-001.pdf>
- Bernal, D.P., Cardona D.A., Galvis, A. y Peña M.R. 2003. Guía de Tecnología para el Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas por Métodos Naturales. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/agua2003/berna.pdf>
- Campos, G. I. 2003. Saneamiento Ambiental. 1ª. Edicion. EUNED. San José, C. R. Pág. 46-48.
- Conagua. (Comisión Nacional del Agua). 2007a. Fundamentos Técnicos para el Muestreo y Análisis de Aguas Residuales. Pág. 1-8.
- Conagua. (Comisión Nacional del Agua). 2007b. Identificación de Sistemas Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. Pág. 7-27.
- Delgadillo, O., Camacho A., Pérez L.F. y Andrade M. 2010. Depuración de Aguas Residuales por Medio de Humedales Artificiales. Chobamba, Colombia. Pág. 27.
- García, J. M. 2004. Nuevos Criterios para el diseño y Operación de Humedales Construidos.  
[http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10034/2/ANEXOS%20A\\_B\\_C.pdf](http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10034/2/ANEXOS%20A_B_C.pdf)

- González, M. R., Barrios D. J. M., Rivas H. A. y Vidal T. J. M. 2011. Remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) Mediante Sistemas Naturales: Humedales y Lagunas de Estabilización. [www.uaemex.mx/Red\\_Ambientales/docs/...Y.../TBA066.doc](http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/...Y.../TBA066.doc)
- Griffin, D.M., Raj B. R., and Hongjian X. 1999. The Effect of Temperature on Biochemical Oxygen Demand Removal in a Subsurface Flow Wetland. {HIPERLINK "<http://www.jstor.org/stable/25045241>"}
- Jiménez, C. B. E., 2001. La Contaminación Ambiental en Mexico: Causas, Efectos y Tecnología Apropriada. 1<sup>a</sup>. Edición. Vol.I. Limusa. México. Pág.147-150.
- Johnson, D.B. and Hallberg K.B. 2005. Acid Mine Drainage Remediation Options: A Review. Sci. Total Environ.
- Lahora, C. A. 2003. Depuración de Aguas Residuales Mediante Humedales Artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almeria). [dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2244838.pdf](http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2244838.pdf)
- Lara, B. J. A. 1999. Introducción a los Sistemas Naturales de Tratamiento de Aguas Residuales, Bogotá, D.C. Colombia. <http://www.slideshare.net/jalarab/introduccion-sistemas-naturales-presentation>.
- Metcalf y Eddy. 1996. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. 3<sup>a</sup>. Edición. Vol.I. McGraw-Hill. México. Pág.1-80.
- Moreno, M. L., Fernández J. M. A., Rubio C. J. C., Calaforra, Ch. J. M., López G. J. A., Beas T. J., Alcaín, M. G., Murillo, D. J. M. y Gómez L. J. A. 2003. La Depuración de Aguas Residuales Urbanas de Pequeñas Poblaciones Mediante Infiltración Directa en el Terreno Fundamentos y Casos Prácticos. [http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion\\_aresidual/indice.htm](http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/indice.htm) consultado en septiembre del 2003.

Romero, A. M., Colín C. A., Sánchez S. E. y Ortiz H. Ma. 2009. Tratamiento de Aguas Residuales por un Sistema Piloto de Humedales Artificiales: Evaluación de la Remoción de la Carga Orgánica. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=37012012004>

Sánchez, F. D. 2010. Depuración de Aguas Residuales de una Población Mediante Humedales Artificiales. [http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10034/2/ANEXOS%20A\\_B\\_C.pdf](http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10034/2/ANEXOS%20A_B_C.pdf)