



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA TRATADA EN UN SISTEMA DE  
HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL, PARA USO RECREATIVO.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:**

**B I Ó L O G O**

**P R E S E N T A N:**

**Cervantes García Daniel**

**Mora Ángel Cesar**

**DIRECTORA DE TESIS: BIÓL. MARICELA ARTEAGA MEJÍA**

**MÉXICO; D,F**

**SEPTIEMBRE,2013.**

## Agradecimientos

A Dios  
Simplemente, te lo debemos todo... Gracias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, máxima casas de estudios del país y la mejor universidad de Iberoamérica.

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, nuestro segundo hogar que nos abrió las puertas para pertenecer a ella, por prepararnos, capacitarnos, darnos el conocimiento de sus aulas para nuestro desarrollo académico y profesional, muchas gracias.

Directora Biól. Maricela Arteaga Mejía, por su asesoramiento, paciencia, tiempo, dedicación y amistad en la realización de este documento.

A cada uno de nuestros sinodales: M. en C. Manuel Faustino Rico Bernal, M. en C. Armando Cervantes Sandoval, M. en C. Eloísa Adriana Guerra Hernández y Biól. Elvia García Santos de igual manera muchas gracias.

A todos nuestros maestros y profesores desde el inicio de nuestra vida académica.

Al Biól. Lauro Sanchez y todo su equipo de trabajo; al campamento club de pesca Arcoíris Sport Fishing por brindarnos las facilidades para la realización de este documento y permitirnos trabajar en sus instalaciones y disfrutar de su gran entorno de paz.

A todos nuestros amigos

Y a todas esas personas que de manera directa e indirecta, contribuyeron con sus observaciones, conocimientos sugerencias o simplemente con su interés, para la realización y finalización de este trabajo. Sería injusto nombrar a unos cuantos, ya que hemos sido afortunados en tener muchos buenos amigos. Este espacio es para ustedes por igual, ya que han sido apoyo en nuestras vidas.

“Los buenos amigos son como las estrellas a veces no se ven, pero siempre están allí”

## Dedicatoria César Mora Ángel

Primeramente a Dios

Por permitirme lograr algo que para mí era inalcanzable pero que hoy está consumado, Señor le reconozco todo su abastecimiento, sabiduría y protección que me ha dado.

A mi directora de Tesis Biol. Maricela Arteaga Mejía por ser un gran ejemplo, mentor, líder y una persona de gran calidad humana que me ha tenido paciencia, dedicación y empeño en todo momento y por compartir su conocimiento en el área de la enseñanza. Gracias maestra por permitirme entrar a la FEZ Zaragoza usted me vió desde que pedí un cambio de facultad y ahora estoy terminando mi carrera en el lugar indicado.

A la familia Mora Ángel

- A mis padres porque siempre declararon que llegaría a ser un Biólogo.
- A mi padre Bernardino Mora Pérez por su confianza y credibilidad en mí.
- A mi madre Adelia Margarita Ángel Vázquez por su amor, apoyo y sustento.
- A mi hermano José Antonio por su apoyo y ayuda en los primeros años de la carrera. Te quiero hermano.
- A mi hermano menor Juan Carlos porque siempre has sido una bendición para mi vida. Te aprecio mucho, eres alguien muy importante para mí

A mi familia: Mora Peñaloza

- A mi linda, bonita y gran esposa porque me alentaste y apoyaste a terminar y concluir mi sueño. Te amo Yazmín Peñaloza Domínguez.
- A mi hijo Alan Mora Peñaloza porque quiero dejarte el ejemplo de que todo se puede siempre y cuando confíes en Dios.

Proverbios

- 1:7 El principio de la sabiduría es el temor de ADONAI.
- 2:6 Porque Dios da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia.

A Daniel Cervantes García por todo el tiempo, apoyo, comprensión, paciencia y conocimiento que me has dado.

Dany no solo logramos el título sino que logramos una gran amistad.

“Te quiero carnal”

#### Dedicatoria Daniel Cervantes García

Es un trayecto difícil, con demasiados obstáculos y trampas en el camino sin embargo hoy se cumple una meta más y quiero dedicarles este trabajo a todas las personas que me acompañan incondicionalmente en este trayecto por que de todas ellas llevo un pedazo en mi corazón, no sé si son muchas o pocas pero son las que deben estar y por creer en mí. Pero bueno es momento de festejar y agradecer mucho a todos, gracias infinitas, nunca les fallaré. César Mora gracias por seguirme en mis locuras, espero que el resultado del trabajo sea lo que ambos esperábamos.

#### A mis padres

Víctor Cervantes Ibarra y Rosa María García Ruíz por brindarme todo su amor, valores, valor, apoyo moral, así como por todos sus afectuosos esfuerzos, desvelos, carreras, apoyo económico, brindarme afecto cuando las cosas se tornan difíciles. Los amo.

#### Hermanos

A mi hermano Víctor Cervantes García, a mi hermana Delia Cervantes García; por qué son un ejemplo y ayudarme a esforzarme a ser mejor cada día, por alentarme, por sus ideas, consejos y charlas, gracias por estar allí cuando más los necesito. Por creer en mí y apreciar mis esfuerzos. Los amo.

#### Sobrinos

Rubén Ramírez Cervantes; Atzhiry Ramírez Cervantes y Esteban Ramírez Cervantes que me hacen sonreír y alegrarme el día con sus ocurrencias; que les sirva este trabajo de ejemplo, motivación y espero lleguen a cumplir sus sueños y metas como lo he hecho yo. Sigán adelante, los amo mucho.

#### Mis raíces

A mi abuelita Consuelo Ruíz por darnos ese amor y unión familiar, a mis tíos Rosario-Silvia, Teresa-Abdón, Consuelo(†)-Roberto, Luis-Josefina, Félix-Lourdes, Ignacio, Lidia-Jesús, Lourdes-Víctor. Y a todos mis primos que sé que de igual forma creen en mí y cuento con ellos en todo momento. Los amo.

#### Los que se adelantaron

A mi abuelo materno Ignacio García(†); a mis abuelos paternos Silvestre Cervantes(†) y Natividad Ibarra(†)

#### Amigos

No quiero omitir a nadie pero, espero mencionarlos con estas líneas introductorias. A todos los que he conocido desde el inicio de mi vida académica y laboral tanto musical como de biología, pero con un enorme cariño y dedicatoria especial a: Biól. Adriana Espinosa Ortega, Biól. Ricardo Medina Calvario, Biól. Víctor M. Zamayoa Montenegro, Biól. Luis Zamayoa Navarrete, T.S.U. Edgar Zúñiga Ibarra, Ing. Sandra Solis López, Biól. Ramiro Gómez Valencia, T.S.U. Eliel Escamilla Villasana, Geog. Carlos Ramón Jaurez Zarza, Biól. Silvia Yazmin Martinez Garcia. Lic. Gerardo Hernández, Lic. Rodolfo Alejandri Gonzalez, Geog. Xochitl Galván Flores, Geog. Beatriz Rivero, Biól Elizabeth Moreno Castro, Biól Paloma Michel García M., C. César Mora Ángel, Biól. Omar Beltrán Vinalay, Biól. Edgar Andres Zariñana, a los nuevos alumnos tesistas del Laboratorio de Proyectos Ambientales. L3-PB-05. UNAM-FESZ.

Que de igual manera agradezco sus opiniones, comentarios, sugerencias, críticas y por compartir un ratito de convivencia que todo en conjunto me han enriquecido, hecho crecer y fortalecer para siempre seguir adelante. GRACIAS A TODOS. MÉXICO, PUMAS, UNIVERSIDAD!!!

## Agradecimientos

A Dios  
Simplemente, te lo debemos todo... Gracias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, máxima casa de estudios del país y la mejor universidad de Iberoamérica.

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, nuestro segundo hogar que nos abrió las puertas para pertenecer a ella, por prepararnos, capacitarnos, darnos el conocimiento de sus aulas para nuestro desarrollo académico y profesional, muchas gracias.

Directora Biól. Maricela Arteaga Mejía, por su asesoramiento, paciencia, tiempo, dedicación y amistad en la realización de este documento.

A cada uno de nuestros sinodales: M. en C. Manuel Faustino Rico Bernal, M. en C. Armando Cervantes Sandoval, M. en C. Eloísa Adriana Guerra Hernández y Biól. Elvia García Santos de igual manera muchas gracias.

A todos nuestros maestros y profesores desde el inicio de nuestra vida académica.

Al Biól. Lauro Sanchez y todo su equipo de trabajo; al campamento club de pesca Arcoíris Sport Fishing por brindarnos las facilidades para la realización de este documento y permitirnos trabajar en sus instalaciones y disfrutar de su gran entorno de paz.

A todos nuestros amigos

Y a todas esas personas que de manera directa e indirecta, contribuyeron con sus observaciones, conocimientos sugerencias o simplemente con su interés, para la realización y finalización de este trabajo. Sería injusto nombrar a unos cuantos, ya que hemos sido afortunados en tener muchos buenos amigos. Este espacio es para ustedes por igual, ya que han sido apoyo en nuestras vidas.

“Los buenos amigos son como las estrellas a veces no se ven, pero siempre están allí”

## Dedicatoria César Mora Ángel

Primeramente a Dios

Por permitirme lograr algo que para mí era inalcanzable pero que hoy está consumado, Señor le reconozco todo su abastecimiento, sabiduría y protección que me ha dado.

A mi directora de Tesis Biol. Maricela Arteaga Mejía por ser un gran ejemplo, mentor, líder y una persona de gran calidad humana que me ha tenido paciencia, dedicación y empeño en todo momento y por compartir su conocimiento en el área de la enseñanza. Gracias maestra por permitirme entrar a la FEZ Zaragoza usted me vió desde que pedí un cambio de facultad y ahora estoy terminando mi carrera en el lugar indicado.

A la familia Mora Ángel

- A mis padres porque siempre declararon que llegaría a ser un Biólogo.
- A mi padre Bernardino Mora Pérez por su confianza y credibilidad en mí.
- A mi madre Adelia Margarita Ángel Vázquez por su amor, apoyo y sustento.
- A mi hermano José Antonio por su apoyo y ayuda en los primeros años de la carrera. Te quiero hermano.
- A mi hermano menor Juan Carlos porque siempre has sido una bendición para mi vida. Te aprecio mucho, eres alguien muy importante para mí

A mi familia: Mora Peñaloza

- A mi linda, bonita y gran esposa porque me alentaste y apoyaste a terminar y concluir mi sueño. Te amo Yazmín Peñaloza Domínguez.
- A mi hijo Alan Mora Peñaloza porque quiero dejarte el ejemplo de que todo se puede siempre y cuando confíes en Dios.

Proverbios

- 1:7 El principio de la sabiduría es el temor de ADONAI.
- 2:6 Porque Dios da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia.

A Daniel Cervantes García por todo el tiempo, apoyo, comprensión, paciencia y conocimiento que me has dado.

Dany no solo logramos el título sino que logramos una gran amistad.

“Te quiero carnal”

#### Dedicatoria Daniel Cervantes García

Es un trayecto difícil, con demasiados obstáculos y trampas en el camino sin embargo hoy se cumple una meta más y quiero dedicarles este trabajo a todas las personas que me acompañan incondicionalmente en este trayecto por que de todas ellas llevo un pedazo en mi corazón, no sé si son muchas o pocas pero son las que deben estar y por creer en mí. Pero bueno es momento de festejar y agradecer mucho a todos, gracias infinitas, nunca les fallaré. César Mora gracias por seguirme en mis locuras, espero que el resultado del trabajo sea lo que ambos esperábamos.

#### A mis padres

Víctor Cervantes Ibarra y Rosa María García Ruíz por brindarme todo su amor, valores, valor, apoyo moral, así como por todos sus afectuosos esfuerzos, desvelos, carreras, apoyo económico, brindarme afecto cuando las cosas se tornan difíciles. Los amo.

#### Hermanos

A mi hermano Víctor Cervantes García, a mi hermana Delia Cervantes García; por qué son un ejemplo y ayudarme a esforzarme a ser mejor cada día, por alentarme, por sus ideas, consejos y charlas, gracias por estar allí cuando más los necesito. Por creer en mí y apreciar mis esfuerzos. Los amo.

#### Sobrinos

Rubén Ramírez Cervantes; Atzhiry Ramírez Cervantes y Esteban Ramírez Cervantes que me hacen sonreír y alegrarme el día con sus ocurrencias; que les sirva este trabajo de ejemplo, motivación y espero lleguen a cumplir sus sueños y metas como lo he hecho yo. Sigán adelante, los amo mucho.

#### Mis raíces

A mi abuelita Consuelo Ruíz por darnos ese amor y unión familiar, a mis tíos Rosario-Silvia, Teresa-Abdón, Consuelo(†)-Roberto, Luis-Josefina, Félix-Lourdes, Ignacio, Lidia-Jesús, Lourdes-Víctor. Y a todos mis primos que sé que de igual forma creen en mí y cuento con ellos en todo momento. Los amo.

#### Los que se adelantaron

A mi abuelo materno Ignacio García(†); a mis abuelos paternos Silvestre Cervantes(†) y Natividad Ibarra(†)

#### Amigos

No quiero omitir a nadie pero, espero mencionarlos con estas líneas introductorias. A todos los que he conocido desde el inicio de mi vida académica y laboral tanto musical como de biología, pero con un enorme cariño y dedicatoria especial a: Biól. Adriana Espinosa Ortega, Biól. Ricardo Medina Calvario, Biól. Víctor M. Zamayoa Montenegro, Biól. Luis Zamayoa Navarrete, T.S.U. Edgar Zúñiga Ibarra, Ing. Sandra Solis López, Biól. Ramiro Gómez Valencia, T.S.U. Eliel Escamilla Villasana, Geog. Carlos Ramón Jaurez Zarza, Biól. Silvia Yazmin Martinez Garcia. Lic. Gerardo Hernández, Lic. Rodolfo Alejandri Gonzalez, Geog. Xochitl Galván Flores, Geog. Beatriz Rivero, Biól Elizabeth Moreno Castro, Biól Paloma Michel García M., C. César Mora Ángel, Biól. Omar Beltrán Vinalay, Biól. Edgar Andres Zariñana, a los nuevos alumnos tesistas del Laboratorio de Proyectos Ambientales. L3-PB-05. UNAM-FESZ.

Que de igual manera agradezco sus opiniones, comentarios, sugerencias, críticas y por compartir un ratito de convivencia que todo en conjunto me han enriquecido, hecho crecer y fortalecer para siempre seguir adelante. GRACIAS A TODOS. MÉXICO, PUMAS, UNIVERSIDAD!!!

## ÍNDICE

	págs.
<b>0. Resumen</b>	<b>1</b>
<b>I.Introducción</b>	<b>2</b>
<b>II.Marco teórico</b>	<b>3</b>
<b>II.1.Problemática del agua</b>	<b>3</b>
<b>II.2.Escasez de agua.</b>	<b>3</b>
<b>II.3.Contaminación del agua</b>	<b>5</b>
<b>II.4. Tipos de contaminación del agua</b>	<b>6</b>
<b>II.5. Calidad del agua</b>	<b>6</b>
<b>II.6.Aguas residuales</b>	<b>10</b>
<b>II.7. Tratamientos de agua residual</b>	<b>10</b>
<b>II.8. Humedales</b>	<b>12</b>
<b>II.9.Macrofitas del sistema de humedales en el campamento Arcoíris</b>	<b>16</b>
<b>II.10. Reúso de agua tratada en actividades recreativas</b>	<b>20</b>
<b>II.11. Club de pesca deportiva “Arcoíris Sport Fishing”</b>	<b>21</b>
<b>II.12. <i>Oncorhynchus mykiis</i> (trucha arcoíris)</b>	<b>21</b>
<b>II.13. Enfermedades transmitidas por el agua residual</b>	<b>23</b>
<b>II.14. Ley de Aguas Nacionales (LAN)</b>	<b>23</b>
<b>III. Problemática</b>	<b>24</b>
<b>IV. Justificación</b>	<b>24</b>
<b>V. Descripción de la zona de estudio</b>	<b>25</b>
<b>V.1. Localización</b>	<b>25</b>
<b>V.2. Área de Importancia de Conservación de Aves (AICAS)</b>	<b>27</b>
<b>V.3. División Florística (Provincia Fitogeográfica)</b>	<b>29</b>
<b>V.4. Anfibios</b>	<b>30</b>
<b>V.5. Región y Provincia Mastogeográfica</b>	<b>31</b>
<b>V.6. Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)</b>	<b>31</b>
<b>VI. Hipótesis</b>	<b>32</b>
<b>VII. Objetivos</b>	<b>32</b>

<b>VIII. Métodos</b>	<b>33</b>
<b>IX. Análisis y discusión de resultados</b>	<b>36</b>
<b>X. Conclusiones</b>	<b>60</b>
<b>XI. Recomendaciones y sugerencias</b>	<b>61</b>
<b>XII. Bibliografía</b>	<b>62</b>
<b>XII.1 Mediografía</b>	<b>70</b>
<b>XIII. Anexos</b>	<b>72</b>
<b>XIII.1. Anexo I Procedimientos analíticos</b>	<b>72</b>
<b>XIII.2. Anexo II Registro Público de los Derechos del Agua (REPDA)</b> <b>de Tlahuapan, Puebla</b>	<b>91</b>
<b>XIII.3. Anexo III Álbum Fotográfico</b>	<b>96</b>
<b>XIII.4. Anexo IV. Diagrama de flujo de las operaciones de Arcoíris</b> <b>Sport Fishing.</b>	<b>104</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1. Distribución de agua en el planeta</b>	<b>4</b>
<b>Figura 2. Grado de presión sobre el recurso hídrico, por Región Hidrológico-Administrativa (RHA)</b>	<b>4</b>
<b>Figura 3. Tipos de tratamiento de aguas residuales</b>	<b>12</b>
<b>Figura 4. Mecanismos de depuración del agua residual en un humedal artificial</b>	<b>13</b>
<b>Figura 5. Tipos de humedales construidos</b>	<b>14</b>
<b>Figura 6. Humedal de flujo subsuperficial</b>	<b>15</b>
<b>Figura 7. Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial</b>	<b>15</b>
<b>Figura 8. Plantas acuáticas comunes utilizadas en humedales</b>	<b>16</b>
<b>Figura 9. Ubicación del Municipio de Santa Rita Tlahuapan</b>	<b>26</b>
<b>Figura 10. Ruta del Oeste, que siguen las aves para llegar al eje neovolcánico transversal</b>	<b>28</b>
<b>Figura 11: Distancia aproximada entre Arco Iris Sport Fishing y el AICA No.223</b>	<b>28</b>
<b>Figura 12. Provincias fitogeográficas con respecto al sitio del proyecto</b>	<b>30</b>
<b>Figura 13. Provincias herpetofaunísticas con respecto al sitio del proyecto.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 14. Provincia volcánico-transverso. Región: neártica</b>	<b>31</b>
<b>Figura 15. Sistema de Humedales del club de pesca Arco-Iris</b>	<b>34</b>
<b>Figura 16. Temperatura</b>	<b>36</b>
<b>Figura 17. Conductividad eléctrica</b>	<b>37</b>
<b>Figura 18. Oxígeno Disuelto (O<sub>2</sub>)</b>	<b>38</b>
<b>Figura 19. pH</b>	<b>40</b>
<b>Figura 20. Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	<b>41</b>
<b>Figura 21. Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)</b>	<b>42</b>
<b>Figura 22. Fósforo Total</b>	<b>44</b>
<b>Figura 23. Fósforo Ortosoluble</b>	<b>45</b>
<b>Figura 24. Nitrógeno Orgánico</b>	<b>46</b>

<b>Figura 25. Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>)</b>	<b>46</b>
<b>Figura 26. Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	<b>47</b>
<b>Figura 27. Nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)</b>	<b>48</b>
<b>Figura 28. Nitrógeno en sus diferentes formas</b>	<b>49</b>
<b>Figura 29. Sólidos Totales (ST)</b>	<b>52</b>
<b>Figura 30. Sólidos Totales Volátiles (SVT)</b>	<b>53</b>
<b>Figura 31. Sólidos Suspendidos Totales (SST)</b>	<b>54</b>
<b>Figura 32. Sólidos Disueltas Totales</b>	<b>54</b>
<b>Figura 33. Coliformes totales</b>	<b>55</b>
<b>Figura 34. Coliformes fecales</b>	<b>56</b>
<b>Figura 35. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)</b>	<b>57</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro I. Grados de presión sobre el recurso hídrico, por Región Hidrológico-Administrativa</b>	<b>5</b>
<b>Cuadro II. Efectos causados por los contaminantes presentes en las aguas residuales</b>	<b>6</b>
<b>Cuadro III. Parámetros del ICA: importancia relativa</b>	<b>7</b>
<b>Cuadro IV Escala de Clasificación de Demanda Química de Oxígeno</b>	<b>8</b>
<b>Cuadro V. Escala de Clasificación de Demanda Bioquímica de Oxígeno</b>	<b>9</b>
<b>Cuadro VI. Límites Máximos Permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público (NOM-003-SEMARNAT-1997)</b>	<b>10</b>
<b>Cuadro VII. Ventajas y desventajas de los humedales de flujo Subsuperficial</b>	<b>19</b>
<b>Cuadro VIII. Límites máximos permisibles de contaminantes</b>	<b>20</b>
<b>Cuadro IX. Características de <i>Oncorhynchus mykiss</i> (trucha arcoíris)</b>	<b>22</b>
<b>Cuadro X. Calidad de agua para la trucha arcoíris</b>	<b>22</b>
<b>Cuadro XI. Normas Oficiales Mexicanas y métodos para determinar los parámetros físicos y químicos en campo (<i>In situ</i>)</b>	<b>34</b>
<b>Cuadro XII. Normas Oficiales Mexicanas y métodos para determinar los parámetros físicos, químicos y biológicos</b>	<b>35</b>

## 0. RESUMEN

La contaminación del agua se produce de forma natural pero en mayor parte por actividades antropogénicas. Una quinta parte de la población mundial no tiene acceso a agua libre de contaminantes. Situación que se acentúa en zonas rurales donde no existe la posibilidad de que el agua tenga un tratamiento previo que mejore su calidad y posibilite su uso general. En la actualidad existen tratamientos para eliminar contaminantes presentes en el agua residual, que no los han disminuido eficazmente, además del alto costo por operación y mantenimiento. Los humedales construidos han cobrado relevancia, como sistemas depuradores de agua residual.

El Club de pesca deportiva “Arcoíris Sport Fishing” contaba con una planta de tratamiento convencional, se modificó, rehabilitó y adaptó en un sistema de humedales construidos, para obtener agua tratada que cumpla con la NOM-003-SEMARNAT-1997, para reuso recreativo con contacto directo.

Los resultados del efluente respecto a la calidad del agua indican que la DBO registró concentraciones entre 24 a 86  $\text{mgL}^{-1}$ , por lo que rebasaron el LMP (20  $\text{mgL}^{-1}$ ) para servicios al público con contacto directo, los organismos coliformes fecales al final del tiempo de muestreo alcanzaron 100 NMP/100 mL, al inicio había 330 NMP/100 mL, la disminución se logró debido a que el sistema fue madurando paulatinamente. Los sólidos totales registraron entre 0.006 a 0.137  $\text{mgL}^{-1}$  muy por debajo del LMP (20  $\text{mgL}^{-1}$ ); la DQO se ubicó en el rango de  $40 < \text{DQO} \leq 200 \text{ mgL}^{-1}$ , el valor máximo registrado fue de 198  $\text{mgL}^{-1}$ . El fósforo total registró entre 1.29 a 5.73  $\text{mgL}^{-1}$  ubicándolo en el rango de óptimo entre 4 a 15  $\text{mgL}^{-1}$ ; la temperatura osciló entre 7-15°C típica de la zona de estudio, la conductividad eléctrica de 0.08 a 0.17  $\text{Ms/cm}^2$ ; oxígeno disuelto registró 10 a 15  $\text{mgL}^{-1}$  suficiente para la sobrevivencia de la mayoría de las especies acuáticas. El pH registró concentraciones cercanas a la neutralidad de 6.4 a 7.2 unidades. Nitrógeno amoniacal  $\text{N-NH}_3$ , registró de 0.56 a 1.12  $\text{mgL}^{-1}$ , por debajo del LMP (20  $\text{mgL}^{-1}$ ), las concentraciones de nitratos  $\text{NO}_3^-$  fueron bajas de 0.0018 a 0.068  $\text{mgL}^{-1}$  es la forma del nitrógeno que las plantas asimilan, ya que son incorporados a la biomasa y por tanto eliminados del agua residual.

El agua residual de la barranca Panacuale tratada en el sistema de humedales construidos de flujo subsuperficial tiene la calidad para que en el campamento de pesca deportiva Arcoíris se realicen de forma segura actividades recreativas con contacto directo ya que cumple con LMP de la NOM-003-SEMARNAT-1997, excepto para DBO que está solamente a 4  $\text{mgL}^{-1}$  de alcanzar el LMP, cabe destacar que esto ocurre en los meses fríos en los que la actividad biológica cesa. Por lo que se recomienda aumentar al sistema el tiempo de retención hidráulica en los meses fríos y con ello cumplir el LMP.

## I. Introducción

En México se reconoce al agua como un recurso estratégico. Al ser un factor clave de desarrollo social y económico, su disponibilidad y calidad condicionan el desarrollo de algunas regiones del país, es un componente determinante para la salud y bienestar de la población (Valencia, 2006). El país se encuentra en un nivel medio de disponibilidad de agua, 4,500 m<sup>3</sup>/hab/año (CVIA, 2009).

En el Estado de Puebla se observan problemas en materia de agua, varios de sus ríos son temporales, la destrucción de fuentes que la producen como los bosques de la Sierra Nevada, la falta de infraestructura hidráulica y la contaminación de ríos, mantos freáticos y lagunas utilizadas como depósitos sistemáticos de aguas residuales provenientes del riego y los servicios urbanos, ha traído como consecuencia su escasez tendencial, lo que limita las potencialidades de desarrollo económico y social de la entidad (SEMARNAT, 2006).

El reuso del agua residual para diferentes actividades aumentará a medida que decrezca la disponibilidad del agua potable. Una de las actividades es la destinada para servicios al público. La NOM-003-SEMARNAT-1997 determina que el líquido para *“reuso en servicios al público con contacto directo, es la que se usa para: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí, fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines”*.

Existen tratamientos físicos, químicos y biológicos, la desventaja radica principalmente en su costo, por lo que no pueden aplicarse en zonas de bajo desarrollo económico. Además, para los tratamientos convencionales, se utiliza una gran cantidad de productos químicos que generan lodos residuales que si no se manejan adecuadamente causan problemas ambientales (ANDA, 2007).

Los humedales construidos son una alternativa viable para el tratamiento y reuso de aguas residuales. Son un método natural de autodepuración a través del rizoma de las plantas y los microorganismos que proporcionan una gran eficiencia en la remoción de contaminantes (Vivas *et al.*, 2006).

## II. Marco Teórico

### II.1 Problemática del agua

El agua es un elemento fundamental para los ecosistemas y es base para la sustentabilidad ambiental. La distribución natural del recurso en el ámbito mundial y regional es desigual; mientras en algunas regiones es abundante, en otras es escasa o inexistente (INEGI, 2009).

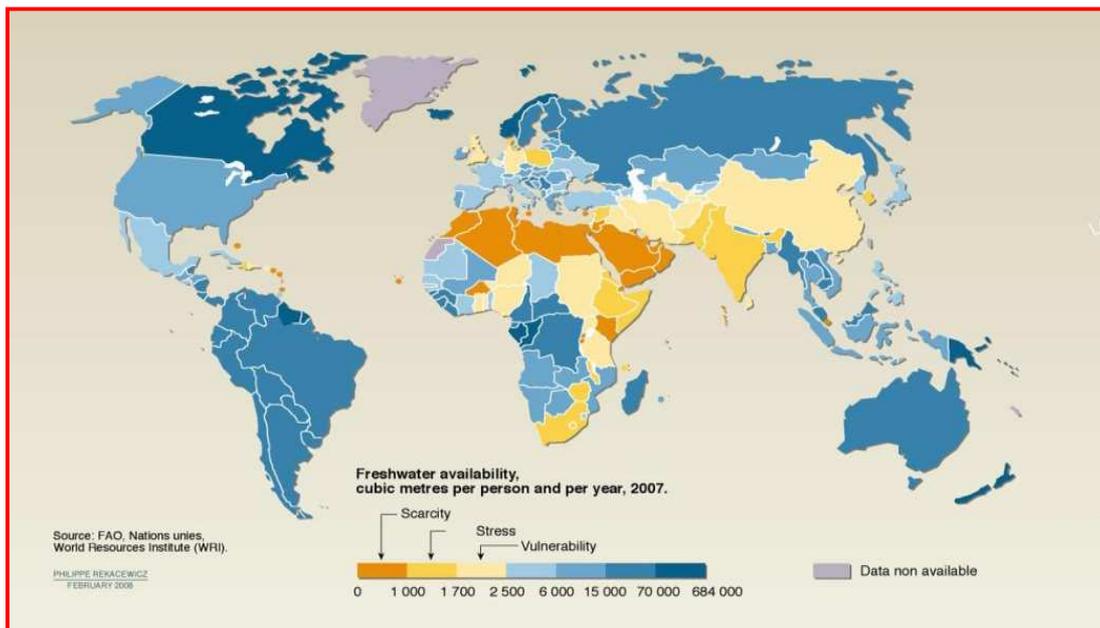
Del volumen total de agua dulce, estimado en unos  $3.8 \times 10^{16} \text{m}^3$ , poco más del 75% está concentrado en casquetes polares, nieves eternas y glaciares; el 21% está almacenado en el subsuelo, y el 4% restante corresponde a los cuerpos y cursos de agua superficial (lagos y ríos). El agua dulce almacenada en el subsuelo es muy superior a la existente en las corrientes superficiales (CNA, 2010). Presenta atributos naturales que le confieren ventaja sobre el agua superficial. Sin embargo, también presenta problemas asociados con la sobre explotación, hundimiento del subsuelo y fracturas que generan grietas que dañan las edificaciones. El país se ha dividido en 653 acuíferos: 101 están sobreexplotados, éstos proporcionan 58% del agua subterránea destinada a todos los usos. Debido a la sobreexplotación, la reserva de agua subterránea está disminuyendo a un ritmo cercano a  $6 \times 10^9 \text{m}^3/\text{año}$  (INEGI, 2009).

En cuanto a la disponibilidad en la zona noroeste se cuenta con  $100 \text{m}^3/\text{hab}/\text{año}$  del recurso agua, contra la abundancia de la zona sureste que cuenta con  $17,000 \text{m}^3/\text{hab}/\text{año}$ . Por otro lado, la presión sobre el recurso hacia el norte-noroeste es muy alta y sin embargo, en el sur-sureste de México prácticamente no se tiene presión (INE, 2007).

### II.2 Escasez de agua

Cerca de 1,200 millones de personas (una quinta parte de la población mundial) vive en áreas de escasez física de agua y 500 millones se están aproximando a esta situación. Por otro lado 1,600 millones (un cuarto de la población mundial), carecen de la infraestructura necesaria para transportar el agua desde ríos y acuíferos (ONU-AGUA, 2010).

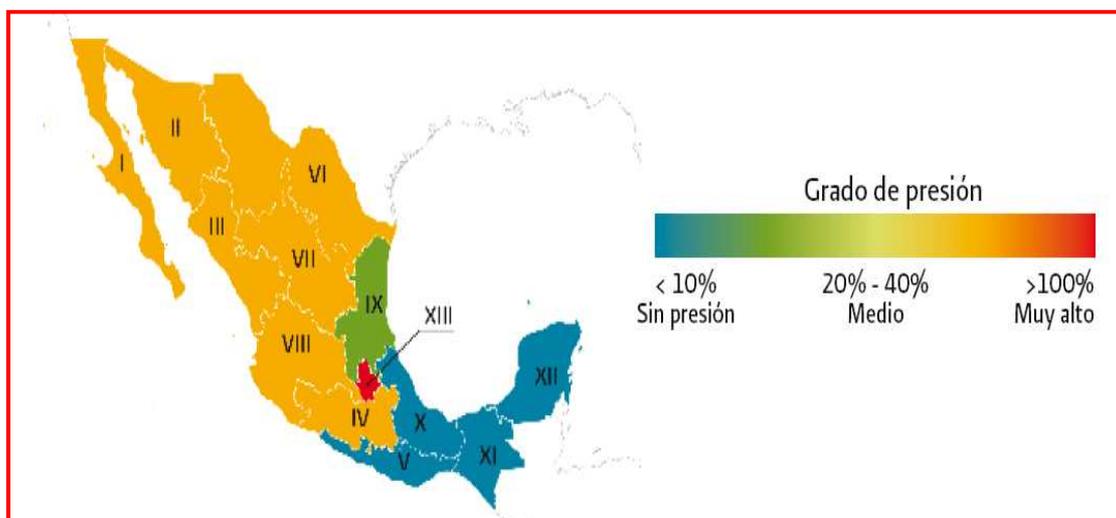
La escasez de agua constituye uno de los principales desafíos del siglo XXI, al que se están enfrentando ya numerosas sociedades de todo el mundo. A lo largo del último siglo, el uso y consumo de agua creció a un ritmo dos veces superior a la tasa de crecimiento de la población y, aunque no se puede hablar de escasez hídrica a nivel global, va en aumento el número de regiones con niveles crónicos de carencia de agua (ONU-AGUA, 2010).



Fuente: ONU-AGUA, 2010

**Figura 1. Distribución de agua en el planeta**

México no se encuentra aislado de esta problemática, la reserva de agua subterránea disminuye a un ritmo cercano a  $6 \times 10^9 \text{m}^3$  ( $6 \text{ km}^3/\text{año}$ ) (INEGI, 2009 y CNA 2011) mientras que su población aumenta.



Fuente: Estadística del Agua en México CONAGUA, 2011

**Figura 2. Grado de presión sobre el recurso hídrico, por Región Hidrológico-Administrativa (RHA)**

**Cuadro I. Grados de presión sobre el recurso hídrico, por Región Hidrológico-Administrativa**

Región Hidrológico Administrativa	Volumen total de agua concesionado (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Disponibilidad natural media	Grado de presión sobre el recurso hídrico (%)	Clasificación del grado de presión
I Península de Baja California	3510	4626	75.9	Fuerte
II Noroeste	7609	8204	91.4	Fuerte
III Pacífico Norte	10439	25627	40.7	Fuerte
<b>IV Balsas**</b>	<b>10703</b>	<b>21680</b>	<b>49.4</b>	<b>Fuerte</b>
V Pacífico Sur	1351	32794	4.1	Escasa
VI Río Bravo	9234	11937	77.4	Fuerte
VII Cuencas Centrales del Norte	3833	7780	48.6	Fuerte
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	14162	34160	41.5	Fuerte
IX Golfo Norte	4747	25543	18.6	Moderada
X Golfo Centro	4957	95866	5.2	Escasa
XI Frontera Sur	2190	157754	1.4	Escasa
XII Península de Yucatán	2368	29645	8.0	Escasa
XIII Aguas del Valle de México	4650	3514	132.3	Fuerte
<b>Total</b>	<b>79752</b>	<b>459351</b>	<b>17.4</b>	<b>Moderada</b>

**NOTA:** Las sumas pueden no coincidir por el redondeo de las cifras.  
 Grado de presión sobre el recurso hídrico=100\*(Volumen total de agua concesionado/Disponibilidad natural media de agua).

\*\*Región en la que se ubica el proyecto

Fuente: Estadística del Agua en México. CONAGUA, 2010a

En la región hidrológica administrativa XIII denominada “Aguas del Valle de México” es posible apreciar un grado de presión sobre el recurso muy alto, y en comparación con la región hidrológica administrativa IV, denominada “Balsas”; donde se encuentra el área de estudio del presente trabajo, se detecta un grado de presión con tendencia que va de medio-fuerte sobre el recurso, por lo que se estima que en pocos años se torne crítica la situación en esta región.

### II.3 Contaminación del agua

Agua contaminada es aquella a la que se le incorporan materias extrañas, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales, aguas residuales o de otros tipos. Materiales que deterioran la calidad del agua y la hacen inútil para los usos pretendidos. “contaminación del agua es la acción y el efecto de introducir materias, o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de

su calidad en relación con los usos posteriores o sus servicios ambientales” (Arteaga, 2011).

## II.4 Tipos de contaminación del agua

La contaminación del agua puede estar producida por:

-Compuestos minerales, compuestos orgánicos, contaminación microbiológica, nutrientes vegetales inorgánicos, sedimentos y materiales suspendidos, sustancias radiactivas y contaminación térmica (Arteaga, 2011 y [www.lenntech.es/faq-contaminantes-del-agua](http://www.lenntech.es/faq-contaminantes-del-agua), 2012).

**Cuadro II. Efectos causados por los contaminantes presentes en las aguas residuales**

Contaminantes	Parámetro de caracterización	Tipo de efluentes	Consecuencias
<b>Sólidos suspendidos</b>	Sólidos suspendidos totales	Doméstico Industrial Natural	Problema estéticos Depósitos de barros Adsorción de contaminantes Protección de patógenos
<b>Sólidos flotantes</b>	Aceites y grasas	Doméstico Industrial	Problemas estéticos
<b>Materia orgánica biodegradable</b>	DBO	Doméstico Industrial	Consumo de Oxígeno Mortalidad de peces Condiciones sépticas
<b>Patógenos</b>	Coliformes	Doméstico	Enfermedades gastrointestinales
<b>Nutrientes</b>	Nitrógeno Fósforo	Doméstico Industrial	Crecimiento excesivo de algas (eutrofización del cuerpo receptor) Toxicidad para los peces (amonio) Enfermedades en niños (nitratos) Contaminación del agua subterránea.
<b>Compuestos no biodegradables</b>	Pesticidas Detergentes Otros	Industrial Agrícola	Toxicidad (varios) Espumas (detergentes) Reducción de la transferencia de Oxígeno(detergentes) No biodegradabilidad Malos olores
<b>Metales pesados</b>	Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)	Industrial	Toxicidad Inhibición al tratamiento biológico de las aguas residuales Problemas con la disposición de los barros en la agricultura Contaminación del agua subterránea

Fuente: GEIA, 2010

## II.5 Calidad del agua

La calidad del agua no es un criterio completamente objetivo, pero está socialmente definido y depende del uso que se le piense dar al líquido (WRI, 2000), por lo que cada uso requiere un determinado estándar de calidad. Por

esta razón, para evaluar la calidad del agua se debe ubicar en el contexto del uso probable que tendrá.

De acuerdo al Fondo de Población de las Naciones Unidas (FNUAP, 2001), una quinta parte de la población mundial no tiene acceso a agua libre de contaminantes. Situación que se acentúa en áreas rurales donde no existe la posibilidad de que el agua tenga un tratamiento previo que mejore su calidad y posibilite su uso general (SEMARNAT, 2002).

Con el fin de evaluar la calidad o grado de contaminación del agua se han desarrollado diversos índices de calidad tanto generales como de uso específico. En México se emplea el llamado Índice de Calidad del Agua (ICA), que agrupa de manera ponderada algunos parámetros del deterioro de la calidad del líquido (León, 1991). El índice toma valores en una escala de 0 a 100, donde mientras mayor sea el valor, mejor es la calidad. El ICA se calcula a partir de una ponderación de 18 parámetros fisicoquímicos, entre los que se encuentran la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), oxígeno disuelto, coliformes, fosfatos, pH, sólidos suspendidos, principalmente (SEMARNAT, 2000).

**Cuadro III. Parámetros del ICA: importancia relativa**

Parámetro	Peso (Wi)	Parámetro	Peso (Wi)
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)</b>	5.0	<b>Nitrógeno en nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-1</sup>)</b>	2.0
<b>Oxígeno disuelto</b>	5.0	<b>Alcalinidad</b>	1.0
<b>Coliformes fecales</b>	4.0	<b>Color</b>	1.0
<b>Coliformes totales</b>	3.0	<b>Dureza total</b>	1.0
<b>Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes)</b>	3.0	<b>Potencial de Hidrógeno (pH)</b>	1.0
<b>Conductividad eléctrica</b>	2.0	<b>Sólidos suspendidos</b>	1.0
<b>Fosfatos totales (PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>)</b>	2.0	<b>Cloruros (Cl<sup>-1</sup>)</b>	0.5
<b>Grasas y aceites</b>	2.0	<b>Sólidos disueltos</b>	0.5
<b>Nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>)</b>	2.0	<b>Turbiedad</b>	0.5

Fuente: SEMARNAT, 2000

En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) administra y preserva las aguas nacionales, con la participación de la sociedad, para lograr el uso sustentable del recurso, monitorea el agua de todo el país. La evaluación de la calidad del agua la lleva a cabo utilizando indicadores, como Sólidos

Suspendidos Totales (SST). Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO); los dos últimos son utilizados para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua provenientes de las descargas de aguas residuales, de origen municipal y no municipal. (CONAGUA, 2010b).

A continuación se presentan dos cuadros donde se muestra la escala de clasificación de calidad del agua:

**Cuadro IV. Escala de Clasificación de Demanda Química de Oxígeno**

CRITERIO	CLASIFICACIÓN	COLOR
DQO≤10	<b>EXCELENTE</b> No contaminada	AZUL
10<DQO≤20	<b>BUENA CALIDAD</b> Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable	VERDE
20<DQO≤40	<b>ACEPTABLE</b> Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	AMARILLO
40<DQO≤200	<b>CONTAMINADA</b> Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal	NARANJA
DQO> 200	<b>FUERTEMENTE CONTAMINADA</b> Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales	ROJO

Fuente: CONAGUA, 2010b

Por otro lado, los Sólidos Suspendidos Totales (SST), tienen su origen en las aguas residuales y de manera natural en el proceso de erosión del suelo. Si se incrementan los niveles de SST, es posible que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática. Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana, hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales (CONAGUA, 2010b).

**Cuadro V. Escala de Clasificación de Demanda Bioquímica de Oxígeno**

CRITERIO	CLASIFICACIÓN	COLOR
$DBO_5 \leq 3$	<b>EXCELENTE</b> No contaminada	AZUL
$3 < DBO_5 \leq 6$	<b>BUENA CALIDAD</b> Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable	VERDE
$6 < DBO_5 \leq 30$	<b>ACEPTABLE</b> Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	AMARILLO
$30 < DBO_5 \leq 120$	<b>CONTAMINADA</b> Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal	NARANJA
$DBO_5 > 120$	<b>FUERTEMENTE CONTAMINADA</b> Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales	ROJO

Fuente: CONAGUA, 2010 b

La SEMARNAT busca entre otras cosas:

- ✓ Establecer, con la participación que corresponda a otras dependencias y a las autoridades estatales y municipales, Normas Oficiales Mexicanas que regulen sobre la preservación y restauración de la calidad del medio ambiente; sobre los ecosistemas naturales; el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, la flora y fauna silvestre, tanto terrestre como acuática, las descargas de aguas residuales y en materia minera; sobre materiales peligrosos y residuos sólidos peligrosos (SEMARNAT, 2010).
- ✓ Entre estas Normas Oficiales Mexicanas referentes al agua tratada se encuentran las NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 30 de octubre de 1996) y NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público (Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de abril de 1998).

**Cuadro VI. Límites Máximos Permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público**

Tipo de Reúso	Promedio Mensual				
	Coliformes Fecales NMP/100 mL	Huevos de Helminto (h/L)	Grasas y Aceites mgL <sup>-1</sup>	DBO <sub>5</sub> mgL <sup>-1</sup>	SST mgL <sup>-1</sup>
Servicios al público con contacto directo	240	≤1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1,000	≤5	15	30	30

Fuente: NOM-003-SEMARNAT-1997

## II.6 Aguas residuales

La NOM-003-SEMARNAT-1997, define a las aguas residuales como aquellas aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarias, domésticos incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso y similares, así como la mezcla de ellas.

La norma mencionada tiene varias definiciones de aguas que ayuda a entender las distintas aguas y a no confundirlas unas con otras.

1. Aguas crudas: Son las aguas residuales sin tratamiento.
2. Aguas residuales tratadas: Son aquellas que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han adecuado para hacerlas aptas para su reuso en servicios al público.

Las aguas residuales, una vez sometidas a un proceso de depuración adecuado, puedan ser utilizadas de nuevo para diferentes usos, según la composición resultante de las mismas tras el tratamiento (Winkler, 2000).

## II.7 Tratamientos de agua residual

En los países desarrollados una proporción, cada vez mayor, de los vertidos es tratada antes de que lleguen a los ríos o mares en estaciones depuradoras de aguas residuales (Echarri, 1998).

Toda agua servida o residual debe ser tratada tanto para proteger la salud pública como para preservar el medio ambiente. El tratamiento debe tener como propósito eliminar toda contaminación química y bacteriológica que

pueda ser nociva para los seres humanos, la flora y la fauna de manera que el agua sea dispuesta en el ambiente en forma segura (Marsilli, 2005).

El diseño eficiente y económico de una planta de tratamiento de aguas residuales requiere de un cuidadoso estudio basado en aspectos, tales como: el caudal ( $m^3/seg$ ), el uso final del producto final (agua tratada), el área disponible para la instalación, la viabilidad económica, características meteorológicas (clima, precipitación). En tal sentido, teniendo en mente que la solución tecnológica más adecuada es aquella que optimiza la eficiencia técnica en la forma más simple y menos costosa, la tecnología debe hacer uso de los recursos humanos y materiales disponibles en el país. Asimismo, cabe señalar que la selección de los procesos y/o el tipo de planta serán diferentes dependiendo de cada caso específico (FONAM, 2010).

Las aguas residuales se pueden someter a diferentes niveles de tratamiento, dependiendo del grado de purificación que se quiera.

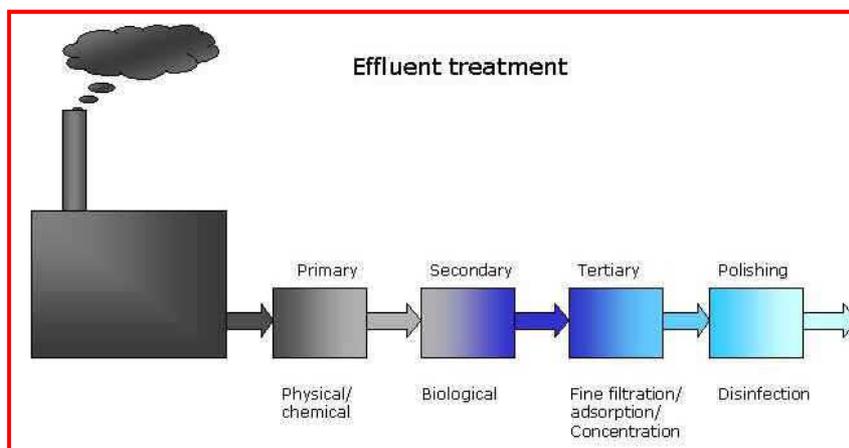
Existen diferentes tipos de tratamiento como son:

**Tratamiento primario:** busca reducir la materia suspendida por medio de la precipitación o sedimentación, con o sin reactivos, o por medio de diversos tipos de oxidación química (Rodríguez *et al.*, 2006).

**Tratamiento secundario o tratamientos biológicos:** Elimina las partículas coloidales y similares. Puede incluir procesos biológicos y químicos. Se emplea de forma masiva para eliminar la contaminación orgánica disuelta, en la actualidad los tratamientos biológicos son los más utilizados, estos consisten en la oxidación aerobia de la materia orgánica —en sus diversas variantes de lodos activados, lechos de partículas, lagunas de oxidación, filtros de goteo y otros sistemas— o su eliminación anaerobia en digestores cerrados (Echarri, 1998).

**Tratamiento terciario o avanzado:** se emplea cuando la cantidad de contaminantes no ha disminuido a los niveles estimados o cuando existen contaminantes específicos que no han sido removidos en las etapas anteriores, por lo que es necesario una etapa de tratamiento intensivo. Consisten en procesos físicos y químicos especiales con los que se consigue limpiar las aguas de contaminantes concretos: fósforo, nitrógeno, minerales, metales

pesados, compuestos orgánicos, reducción de DBO, contaminantes químicos específicos, eliminación de patógenos, parásitos y virus (Marsilli, 2005).



Fuente: [www.lenntech.es/faq-contaminantes-del-agua](http://www.lenntech.es/faq-contaminantes-del-agua). 2012

**Figura 3. Tipos de tratamiento de aguas residuales**

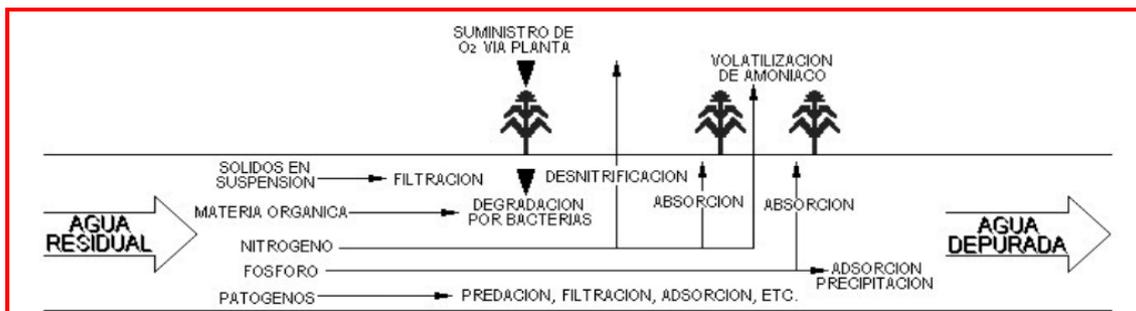
Otra de las tecnologías empleadas para tratar aguas residuales son los humedales construidos.

## II.8 Humedales

Los humedales son medios semiterrestres con un elevado grado de humedad y una profusa vegetación, que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un elevado potencial auto depurador. Pueden alcanzar gran complejidad, con un mosaico de lámina de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie (Ramsar, 1971).

### Humedales construidos o artificiales

Los humedales construidos son utilizados para el tratamiento de aguas residuales por tres funciones básicas: a) fijan físicamente los contaminantes y la materia orgánica en la superficie del suelo, b) utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y c) logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento pero con una alta eficiencia (Lara, 1999).



Fuente: Tesillos y Ubaldo, 2007

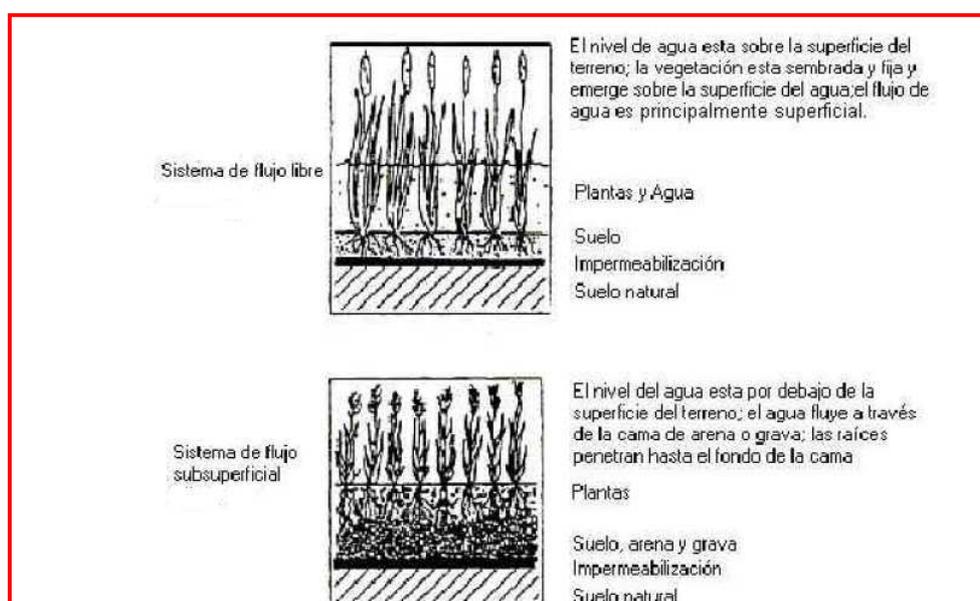
**Figura 4. Mecanismos de depuración del agua residual en un humedal artificial**

### Tipos de humedales construidos

Las variables de diferenciación hacen referencia al sistema de flujo del agua residual, sustrato o lecho utilizado, vegetación y sucesión de unidades de tratamiento. En cuanto a la dirección del movimiento del agua a través del humedal se consideran los siguientes tipos: horizontal, vertical, flujo superficial y flujo subsuperficial. En cuanto al sustrato, hay sistemas que llevan por debajo del manto de agua una capa de suelo o tierra vegetal para enraizar la vegetación, otros que en perfil emplean exclusivamente un lecho de grava y arena, y otros sistemas únicamente tienen agua. Con respecto a la vegetación, hay sistemas que contemplan el uso de plantas acuáticas flotantes, macrófitas acuáticas emergentes y sistemas mixtos de sucesión de vegetación. Por último, hay que indicar con respecto a la sucesión de unidades de tratamiento que hay una amplia gama de diseños en función de las características de cada uno de los componentes (flujo, sustrato, profundidad, pendiente, vegetación), y de cómo se configuran entre sí (serie, paralelo, recirculación) (Mejía-Sáenz *et al.*, 2002).

Hay tres líneas de desarrollo tecnológico de humedales artificiales, cuyo modo de actuación, aún basándose en los mismos principios biológicos, es diferente. Humedales de flujo libre superficial: (FLS o FWSW free water surface wetlands) son sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. La mayoría de los humedales naturales son sistemas de FLS entre los que se incluyen los fangales (principalmente vegetación de musgos), zonas pantanosas (principalmente vegetación arbórea), y las praderas inundadas (principalmente vegetación herbácea y macrófitas emergentes). En algunos casos, el agua se pierde completamente por evapotranspiración y percolación (EPA, 2000).

Humedales de flujo subsuperficial (FS o SFW subsurface flow wetlands); están diseñados específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal con un medio apropiado. La grava es el medio más utilizado, en el se planta normalmente vegetación emergente presente en las praderas inundadas y, por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio (EPA, 2000).



Fuente: Lara, 1999

**Figura 5. Tipos de humedales construidos**

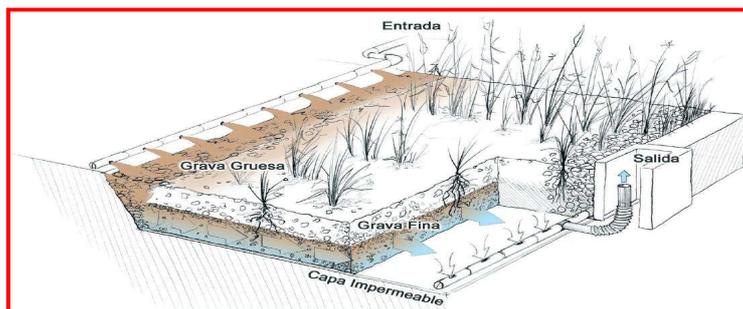
### Componentes de los humedales

**Agua:** es uno de los elementos más importantes debe estar presente casi permanentemente. Debido a su gran extensión y poca profundidad, a diferencia de otros ecosistemas acuáticos, los humedales poseen una fuerte interacción y dependencia con los procesos de evapotranspiración y precipitación (Lara, 1999).

**Sustrato:** los materiales más comúnmente utilizados son las arenas y las gravas, además de los sedimentos y residuos que se van depositando a medida que el efluente circula lentamente por toda la superficie.

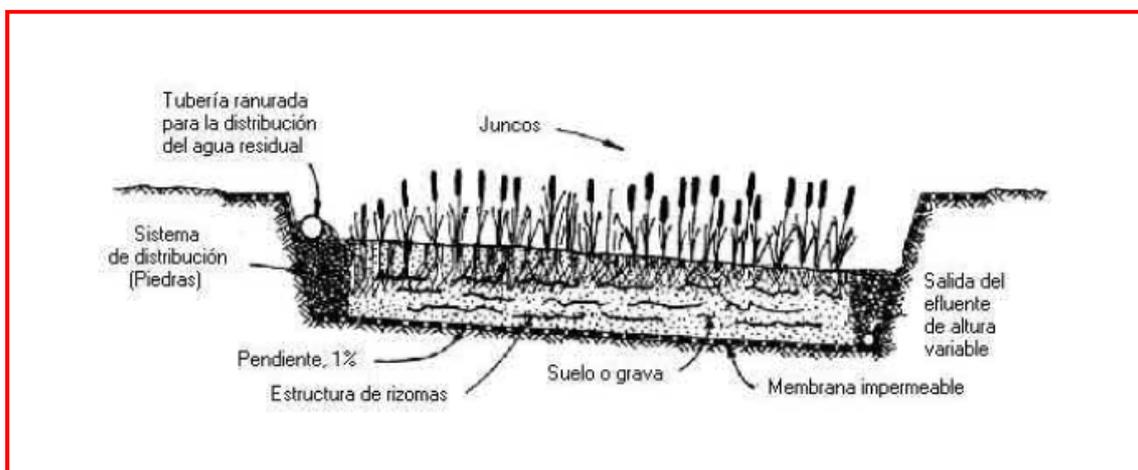
La importancia del sustrato en un humedal radica en el hecho que sirve de sustento para todos los seres vivos que habitan en él, incluyendo los

microorganismos encargados del tratamiento de las aguas residuales (Lara, 1999).



Fuente: www.depuranatura.org, 2011

**Figura 6. Humedal de flujo subsuperficial**



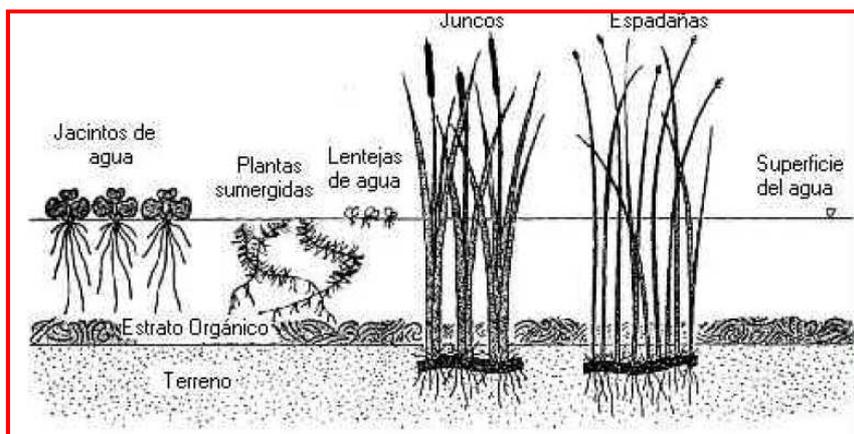
Fuente: Lara, 1999

**Figura 7. Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial**

**Vegetación:** Debe estar adaptada a condiciones de saturación y puede sobrevivir y desarrollarse en ellas, por lo general son especies flotantes o sumergidas cuya eficiencia en la remoción de contaminantes depende no sólo del tipo de humedal en cuestión sino que también de las características inherentes a ellas (Delgadillo *et al.*, 2010).

1. Las especies deben ser colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.
2. Deben ser especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir la máxima asimilación de nutrientes.
3. La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la biopelícula.
4. Deben disponer de un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación.

5. Se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado.
6. Debe tratarse de especies con una elevada productividad.
7. Las especies deben tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales.
8. Se deben utilizar especies propias de la flora local (García y Corzo, 2008).



Fuente: Lara, 1999

**Figura 8. Plantas acuáticas comunes utilizadas en humedales**

### II.9 Macrofitas del sistema de humedales en el campamento Arcoíris:

Actualmente el sistema de humedales de Arcoíris posee dos especies de plantas de ornato que sirven para depuración del agua residual.

*Zantedeschia aethiopica*, nombre común: alcatraz

Planta terrestre, sin savia lechosa. Tamaño: Hasta 1 m. Tallo: Subterráneo, un rizoma grueso, succulento. Hojas: Espiraladas con pecíolos de 33 a 82 cm, esponjosos; láminas foliares simples, de 15 a 40 cm de largo y 6.8 a 24.5 cm de ancho, oblongo-deltoideas a lanceolado-deltoideas, con la base sagitada a subhastada, con 6 a 10 venas laterales por lado. Inflorescencia: 1 por axila, sobre un pedúnculo alargado; una bráctea grande (llamada espata) de 10.5 a 22.5 cm de largo y de 7.5 a 13.5 cm de ancho. (Croat y Carlsen, 2003).

Cultivada en todo el país, en forma asilvestrada se encuentra sobre todo en la región de bosque mesófilo y a lo largo de canales de riego. Usos Ornamentales. Distribución altitudinal se reporta hasta los 1900 msnm ([www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/araceae/zantedeschiaethiopica](http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/araceae/zantedeschiaethiopica),2013).

*Cyperus papyrus*, nombre común: papiro.

Origen: Cuenca del Nilo. Familia: Cyperaceae. Tipo: Vivaz. Exposición: Pleno sol. Hoja: Perenne. Humedad: Suelo encharcado. Descripción: Planta herbácea, perenne, acuática o palustre, arraigante por lo general con rizomas. Tallos que pueden alcanzar de 3 a 5 m de longitud. Sus hojas son de color verde jade, largas, delgadas, firmes, con espigas marrones. Tiene largos troncos granizos que llevan en el ápice una gran inflorescencia liviana y plumosa en abanico, donde se agrupan las flores, con numerosas brácteas de hasta 30 cm de largo, filiformes. Los cyperus considerados ornamentales son plantas robustas que vegetan a expensas de tallos subterráneos llamados tubérculos, se desarrollan preferentemente en zonas cálidas, donde las temperaturas invernales no sean demasiado extremas, en la estación fría no baje de 8°C. Adornan el borde de los cursos de estanques o de las partes húmedas de los jardines. Sus tallos servían a los egipcios para fabricar una clase de papel. El papiro ama el agua poco profunda y causa muy buen efecto estético en un pequeño estanque (Noailles, 1980).

**Microorganismos:** la eficiencia de los humedales como sistemas de tratamiento está condicionada fundamentalmente por la actividad microbiológica, al diseñar y construir un humedal, se debe tomar muy en cuenta la creación de un ambiente propicio para su crecimiento. Los protozoos, bacterias y algas microscópicas son sólo algunos de los microorganismos que crecen en los humedales y que se encargan de tratar el agua residual (Zúñiga, 2004).

En la naturaleza, las bacterias han formado agrupaciones con cualidades que les permiten adaptarse y sobrevivir a agentes como desinfectantes y depredadores, que de forma individual no lograrían resistir. Una de esas agrupaciones son las biopelículas que fueron descritas por primera vez en 1978. Un biofilm puede estar formado por una única especie bacteriana, pero lo más frecuente es que esté constituido por muchas especies bacterianas, así como por hongos, algas, protozoos, residuos (escombros) y productos de corrosión. Los habitantes del biofilm, se van a distribuir en micronichos, originando así microambientes diferenciados en pH, concentración de iones y tensión de oxígeno dentro de la biopelícula (Márquez *et al.*, 2008).

La vida en comunidad les ofrece a los microorganismos algunas ventajas notables. Las bacterias son más resistentes a condiciones de crecimiento adversas, como la escasez de nutrientes y la desecación. La biopelícula forma un exopolímero o exoesqueleto que protege a la bacteria de la turbulencia y flujo dentro de un hábitat de crecimiento “ideal” para las bacterias adherentes (Sotomayor y Lijo, 2009).

La formación de biopelículas consta de tres etapas: adsorción reversible, adsorción irreversible y crecimiento.

La biopelícula que crece adherida al medio granular, raíces y rizomas de las plantas tiene un papel fundamental en los procesos de descontaminación del agua. Alrededor de las raíces se crean microambientes aeróbicos donde tienen lugar procesos microbianos que usan el oxígeno, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación (García y Corzo, 2008).

Las etapas de formación de la biopelícula se inician con la adherencia sobre una superficie abiótica o un tejido o en la interfase aire-líquido. Una vez que la bacteria se ha adherido a la superficie de forma irreversible, comienza a dividirse alrededor del sitio de unión, formando una micro colonia. Posteriormente, las bacterias comienzan a secretar componentes que forman parte de la matriz del biofilm y adoptan unas estructuras tridimensionales (macro colonia), entre las cuales se observa un sistema de canales que les permiten el transporte de nutrientes y sustancias de desecho (Moscoso; *et al.*, 2006).

**Fauna:** los humedales constituyen un hábitat natural para numerosas especies animales, especialmente invertebrados, muchos de ellos contribuyen al tratamiento de las aguas residuales ya que descomponen la materia orgánica, incluso lo hacen en grandes cantidades durante su etapa larvaria (Lara, 1999).

**Cuadro VII. Ventajas y desventajas de los humedales de flujo subsuperficial**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Proporcionan tratamiento efectivo obteniendo buena calidad del efluente y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo de operadores calificados.</li> <li>➤ Las presiones y flujos que se manejan pueden ser obtenidos proporcionándoles pendientes al sistema para facilitar el flujo del agua por gravedad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Requieren ser cosechados frecuentemente.</li> <li>➤ Requieren de algún tiempo de operación antes de alcanzar su eficiencia óptima.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Su operación es sencilla.</li> <li>➤ Son menos costosos de construir, de operar y mantener, que otro tipo de sistema de tratamiento de aguas.</li> <li>➤ Se emplean frecuentemente materiales de la zona.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ En climas fríos las bajas temperaturas reducen la tasa de remoción de materia orgánica.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ No producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.</li> <li>➤ No se adicionan productos químicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Se necesita dar atención a los lechos para estar seguros de que ellos están saturados pero no inundados (gran sensibilidad a las variaciones de carga hidráulica "colmatación."</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Son muy efectivos en la degradación (DBO<sub>5</sub> y DQO), los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que se encuentran en las aguas residuales domésticas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Limitaciones geográficas de las plantas, como son la introducción de nuevas especies.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La remoción de nitrógeno y fósforo es efectiva con un tiempo de retención significativamente mayor.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Los mosquitos y otros insectos vectores similares no son problema, mientras el sistema se opere adecuadamente y se mantenga el nivel subsuperficial de flujo.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ El periodo de vida útil de un humedal artificial es de aproximadamente 25 años.</li> <li>➤ No se presentan malos olores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Verificar constantemente el crecimiento saludable de las plantas y limpieza.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ El sistema es flexible y menos susceptible a las variaciones de flujo y composición de las aguas residuales en comparación con los sistemas convencionales. Debido a esto puede tratar aguas residuales de diversos orígenes como son: domésticas, industriales y efluentes de actividades agrícolas.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pueden constituir un hábitat para la vida de especies silvestres. Su diseño ofrece un aspecto estéticamente agradable, pudiendo constituir inclusive un área de recreación.</li> </ul>	

Fuente: Elaborado a partir de: Tesillos y Ubaldo 2007, Chavarría, 2001 y Torres, 2005

Son múltiples las ventajas que se aprecian de los humedales construidos, ventajas que lleva a preferir este método de tratamiento sobre otros procesos como los filtros biológicos, fosas sépticas, lagunas de oxidación, reactores anaeróbicos de flujo ascendente (RAFA) y lodos activados.

El agua residual tratada se puede destinar a varios usos entre ellos el recreativo de contacto directo o indirecto con el hombre.

### II.10 Reuso de agua tratada en actividades recreativas

Los distintos usos recreativos y medioambientales del agua tratada comprenden desde los estanques artificiales, el riego de campos de golf, pasando por una amplia gama de posibilidades, como fuentes ornamentales, producción de nieve artificial, creación de humedales para servir de refugio a la vida animal, la creación o llenado de lagos en los que se pueda practicar la pesca, riego de áreas verdes y otras actividades (IGME, 1995).

El agua para uso recreativo deberá ser estéticamente agradable, sin olores molestos, virtualmente libre de sustancias como aceite, grasas, materia flotante y libre de crecimiento acuático que pudieran provocar dificultades para su uso. Libre de patógenos y sustancias tóxicas que pudieran causar irritación de ojos o de la piel (Arreguín *et al.*, 1999).

En el siguiente cuadro se muestra los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas para uso recreativo.

**Cuadro VIII. Límites máximos permisibles de contaminantes**

Tipo de reuso	Promedio mensual				
	Coliformes Fecales NMP/100 mL	Huevos de Helminto (h/L)	Grasas y Aceites mgL <sup>-1</sup>	DBO <sub>5</sub> mgL <sup>-1</sup>	SST mgL <sup>-1</sup>
Servicios al público con contacto directo	240	≤ 1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1,000	≤ 5	15	30	30

Fuente: NOM-003-SEMARNAT-1997.

## II.11 Club de pesca deportiva “Arcoíris Sport Fishing”

El club de Puebla de Pesca fue creado en 1989, se localiza dentro del municipio de Santa Rita Tlahuapan en el kilómetro 54.5 de la carretera federal México-Puebla., cuenta con un lago en donde se practica la pesca deportiva, se realizan torneos, donde participan entre 200-250 competidores. Las artes de pesca que se practican son: pesca de fondo y superficie con señuelos artificiales. Además, cuentan con criadero de truchas y pesca en río de *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris). Los pescadores tienen contacto directo con el agua, lo que implica controlar la calidad de la misma ([www.arcoiris.com.mx/index.html](http://www.arcoiris.com.mx/index.html), 2012).



## II.12 *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris)

Es una especie de agua dulce - aunque puede ser adaptada a agua salada - que vive, en condiciones naturales, en ríos de aguas frescas y de buena calidad. Habita en aguas corrientes, cristalinas bien oxigenadas y frías, en las que la temperatura en los meses calurosos no sea mayor a los 21°C, en zonas tropicales y subtropicales; en zonas de gran altitud (superior a 1500 msnm) cuyas temperaturas en los meses más cálidos no rebasen los 21°C.

El Tamaño aproximado va de: 40-70 cm y pesa alrededor de 1-5 kg. Coloración: Generosamente salpicado de pequeñas manchas negras en el dorso, los flancos y la cabeza, al igual que las aletas dorsal, adiposa y anal. Dorso gris oscuro, flancos plateados y abdomen claro. Una característica muy distintiva de la trucha arcoíris es la franja de color rosado a violeta claro que se extiende a lo largo de cada lado de la línea lateral hasta la cola. El nombre de arcoíris deriva precisamente de la originalidad del color del cuerpo, misma que varía en función del medio ambiente, de la talla, del sexo y del grado de maduración sexual.

Reproducción: Desova sobre lechos de grava en agua corriente, durante los meses de septiembre a febrero cuando la temperatura del agua desciende a sus niveles más bajos.

Se alimenta de larvas de insectos, insectos de superficie, crustáceos y peces pequeños.

Especie adaptada a la piscicultura intensiva, debido a lo siguiente:

- a) Gran docilidad les permite domesticarse fácilmente y aceptar alimentos balanceados.
- b) Resistentes a la mayoría de las enfermedades pudiendo tolerarlas adecuadamente bajo condiciones de cultivo.
- c) Desarrollo rápido en cautiverio; la incubación de los huevecillos es corta (aproximadamente 28 días); presentan una tasa de crecimiento elevada, dependiendo la calidad de los alimentos que ingieran (contenido proteico que contenga) temperatura, oxigenación y calidad del agua (Secretaría de pesca, 1994).

**Cuadro IX. Características de *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris)**

Nombre científico	Grupo	Familia	Nombre común	Ambiente	Estado de la invasión	Rutas de introducción
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Salmónidos	Salmonidae	Trucha arcoíris	Dulceacuícola	E	T,C

E Establecida en México  
T Transporte de bienes y personas  
C Comercio de organismos vivos

[www.conabio.gob.mx/invasoras/index.php/Especies\\_invasoras](http://www.conabio.gob.mx/invasoras/index.php/Especies_invasoras) - Peces, (2011).

El cuadro X, presenta las exigencias mínimas de calidad referidas a diferentes parámetros físico- químicos para el desarrollo de trucha arcoíris.

**Cuadro X. Calidad de agua para la trucha arcoíris**

<b>Temperatura</b>	De 7.2 a 17.0 °C para crecimiento De 7.2 a 12.8 °C para reproducción e incubación.
<b>Oxígeno disuelto</b>	Mayor a 5 mgL <sup>-1</sup>
<b>pH</b>	6.5 a 9.0
<b>Calcio</b>	Mayor a 52 mgL <sup>-1</sup>
<b>Nitrito</b>	Menor a 0.55 mgL <sup>-1</sup>
<b>Nitrógeno</b>	Menor a 110 % de saturación total
<b>Sólidos suspendidos</b>	Menor a 80 mg
<b>Sólidos disueltos</b>	Menor a 400 mg

**Continuación.....Cuadro X..... trucha arcoíris**

<b>Dióxido de carbono</b>	Menor a 2 mgL <sup>-1</sup>
<b>Ácido sulfhídrico</b>	Menor a 0.002 mgL <sup>-1</sup>
<b>Amonio</b>	0.012 mgL <sup>-1</sup> como NH <sub>3</sub>
<b>Zinc</b>	Menor a 0.04 mgL <sup>-1</sup> a pH de 7.6

Camacho, 2000.

### **II.13 Enfermedades transmitidas por el agua residual**

Hay diferentes enfermedades provocadas por el agua residual, unas son ocasionadas por bacterias, virus, protozoos y por helmintos.

-Bacterias que causan enfermedades:

1. *Salmonella typhi*; tifoidea 2. *Vibrio cholerae*; cólera: 3. *Shigella spp*; disentería bacteriana: 4. *Leptospira*; leptospirosis:

-Virus que causan enfermedades: *hepatitis virus*; hepatitis infecciosa;

-Protozoos: 1. *Entamoeba histolytica*; disentería amebiana: 2. *Giardia lamblia intestinalis*; diarrea;

-Helmintos: 1. *Schistosoma spp*: bilharzia; 2. *Dracunculus medinensis*; lombriz ([www.excelwater.com](http://www.excelwater.com). 2007).

Tratar el agua residual y disponerla de forma segura es de suma importancia para proteger la salud pública y al medio ambiente. Los humedales artificiales son una opción viable para obtener agua tratada apta para actividades recreativas.

### **II.14 Ley de Aguas Nacionales (LAN)**

La prevención y control de la contaminación del agua ocupa un espacio muy importante en la Ley de Aguas Nacionales (2012), la cual establece un sistema de permisos de descarga obligatorio para todos los responsables que vierten a cuerpos receptores de propiedad nacional. Asimismo, la Ley de Aguas Nacionales regula los distintos usos del agua, al señalar en forma clara el régimen al que se sujetan los usos público y urbano, la generación de energía, el uso agrícola y otras actividades productivas, en tanto que el estado conserva la rectoría en la administración de las aguas nacionales.

También cuenta con su reglamento, que entre otros aspectos establece: que las personas físicas o morales que exploten, usen o aprovechen aguas en cualquier uso o actividad, están obligadas, bajo su responsabilidad y en los términos de ley, a realizar las medidas necesarias para prevenir su contaminación y en su caso para reintegrarlas en condiciones adecuadas, a fin de permitir su utilización posterior en otras actividades o usos y mantener el equilibrio de los ecosistemas.

Asimismo, establece que quienes efectúen descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores deberán contar con el permiso de descarga de aguas residuales y la obligación de proporcionar el tratamiento que garantice la no contaminación (Ley de Aguas Nacionales, 2012).

### **III. Problemática**

El club de pesca “Arcoíris Sport Fishing” utiliza un flujo de (1,296,000 L/día) de aguas residuales domésticas proveniente de la comunidad de Santa Rita Tlahuapan mezcladas con agua de manantial, para el llenado de un lago al interior de sus instalaciones, en el que se practica la pesca deportiva, por lo que el público usuario podría estar expuesto directamente o tener contacto físico con agua residual cruda; por lo que es necesario que el agua tenga un tratamiento, para cumplir con los límites señalados en la NOM-003-SEMARNAT-1997, antes de ingresar al lago, para asegurar que el público realice actividades recreativas seguras.

### **IV. Justificación**

El campamento Arcoíris cuenta con un lago, en él se llevan a cabo actividades recreativas como la pesca deportiva lo que implica que el público tenga contacto directo con el agua que lo abastece ya que proviene de la barranca Panacuale, que recibe agua residual de la población de Santa Rita Tlahuapan, condición que exige conocer si el agua cumple con la calidad que establece la NOM-003-SEMARNAT-1997. Actualmente el municipio de Santa Rita Tlahuapan cuenta con dos plantas de tratamiento de aguas residuales en

operación -para uso público urbano (municipal)- que son del tipo: lodos activados y Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) con filtro biológico (CONAGUA, 2009). Estos tratamientos no han disminuido eficazmente la contaminación, por lo que es necesario que Arcoíris reciba agua de calidad para garantizar que se realicen actividades recreativas seguras. El campamento tenía una planta de tratamiento de aguas residuales sin operar (abandonada), debido a los altos costos de consumo de energía eléctrica y reactivos químicos, además de generar lodos residuales. Toda la infraestructura de la planta de tratamiento se modificó para construir un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial abatiendo los altos costos de operación y disminuir el impacto ambiental de los residuos producidos en el proceso convencional de tratamiento. Actualmente el sistema de humedales está funcionando como una alternativa de tratamiento biológico,

## **V. Descripción de la zona de estudio**

### **V.1 Localización**

El municipio de Santa Rita Tlahuapan se localiza en la parte centro-oeste del estado de Puebla, a 2640 m.s.n.m. con una población de 36518 habitantes. Sus coordenadas geográficas son: 19°20' de LN y 98°35' de LO. Colinda al norte con el estado de Tlaxcala, al sur con el municipio de San Salvador el Verde, al este con los municipios de San Matías Tlalancaleca y estado de Tlaxcala, al oeste con el estado de México y Volcán Iztaccíhuatl. (INEGI, 2011). En Santa Rita Tlahuapan se ubica el club de pesca "Arcoíris Sport Fishing" con las coordenadas: 19°21'17.23" LN; 98°36'35.15" LO ([www.arcoiris.com.mx/](http://www.arcoiris.com.mx/), 2012).

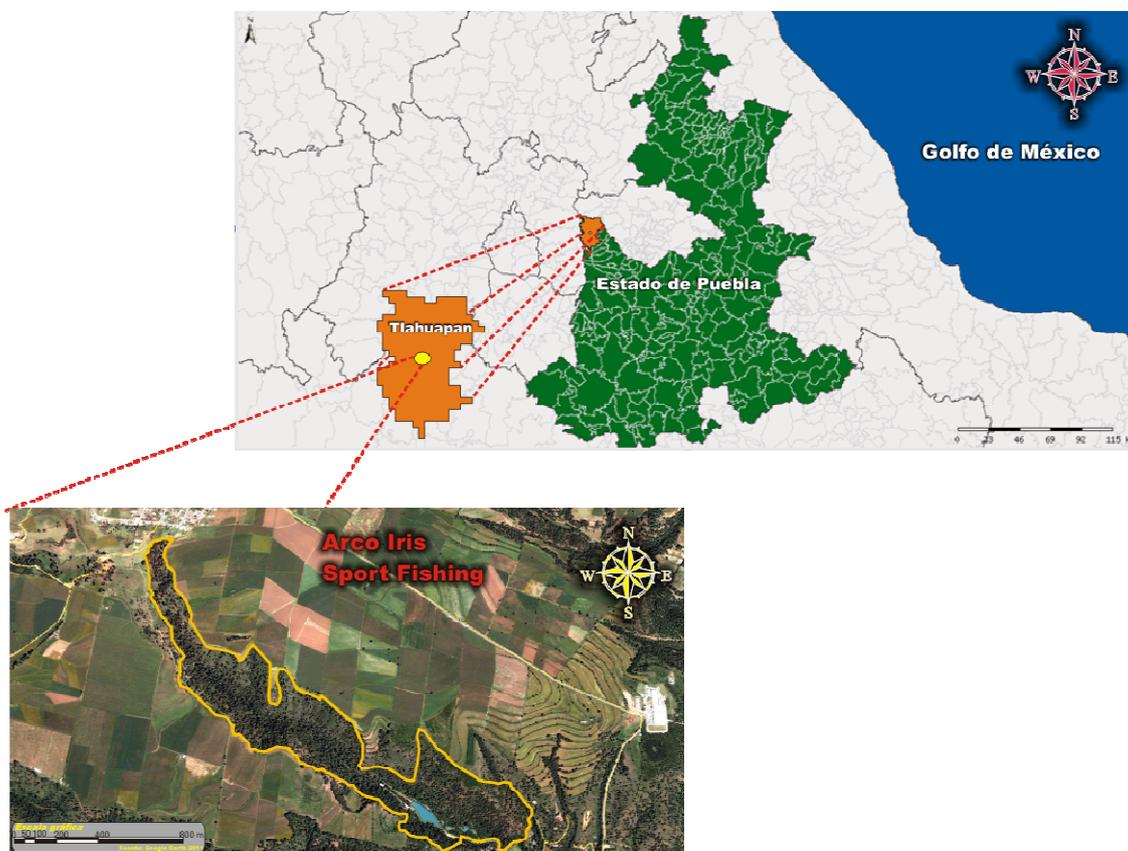
### **Extensión**

De acuerdo al Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2009), el municipio de Sta. Rita Tlahuapan tiene una superficie de 298.51 km<sup>2</sup>, que lo ubica en el lugar 31 con respecto a los demás municipios del estado.

## Hidrografía

El municipio pertenece a la cuenca del río Atoyac, una de las más importantes del estado, tiene su nacimiento cerca del límite de los estados de México y Puebla, en la vertiente oriental de la Sierra Nevada.

Los ríos que atraviesan el municipio, generalmente de oeste a este son formadores o afluentes del Atoyac, destacando los siguientes: las Rositas, Grande, Chautonco y Ayotla además de gran cantidad de arroyos intermitentes. También cuenta con varios kilómetros de acueductos y canales principalmente en la porción central (INAFED, 2009).



Fuente: INEGI y Google Earth 2012

**Figura 9. Ubicación del Municipio de Santa Rita Tlahuapan  
Región cuenca hidrológica y cuerpo de agua**

El área de influencia del proyecto se encuentra en la Región: Balsas catalogada con la clave RH18 y la cuenca río Atoyac con clave A, representando el 57.23 % de la superficie estatal; así mismo presenta una corriente de agua denominada Atoyac con ubicación RH18A que desemboca en el cuerpo de agua: denominado presa “Manuel Ávila Camacho” (INEGI, 2010a).

## **Clima**

Para el sitio de estudio; se identifican dos climas: templado subhúmedo C(w2) temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente menor a 22°C Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual; este tipo de clima es el predominante, sobre todo en la zona correspondiente al valle de Puebla que es donde se localiza “Arcoíris Sport Fishing” y el semifrío subhúmedo Cb'(w2) con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, este tipo de clima, se presenta en las faldas inferiores de la Sierra Nevada (García, 1998 e INAFED, 2009).

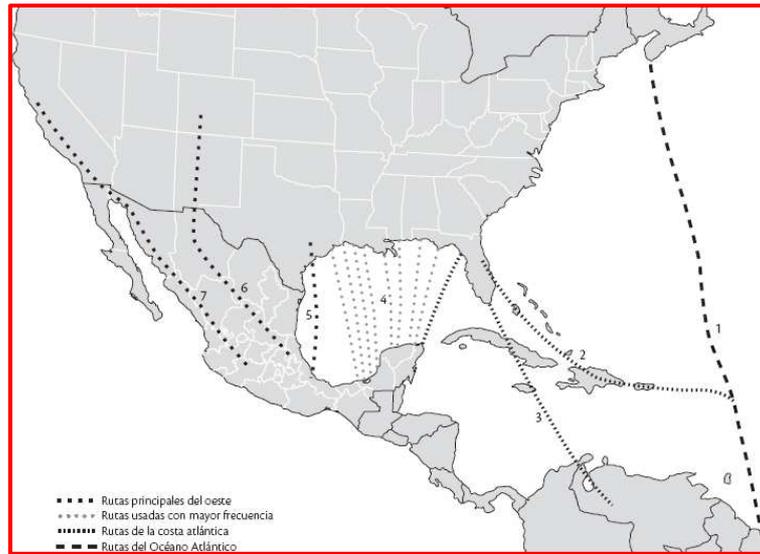
## **Características y uso del suelo**

El municipio presenta varios tipos de suelo; se identifican cuatro: Regosol: se presenta en la zona más elevada al norte, al suroeste, y en las partes bajas del sureste; Andosol: se localiza en las faldas interiores de la Sierra Nevada y al noroeste; en ocasiones presenta fase pedregosa (fragmento de roca o tepetate de 7.5 centímetros de diámetro). Suelo Cambisol: Presenta fase dúrica (tepetate a menos de 50 centímetros de profundidad; suelos adecuados para cultivos de raíces someras) o dúrica profunda (tepetate entre 50 y 100 centímetros de profundidad). Suelo Litosol: Se localiza al noreste; presenta fase dúrica (INAFED, 2009).

## **V.2 Área de Importancia de Conservación de Aves (AICAS)**

Para llegar al Estado de Puebla; las aves migratorias posiblemente siguen la denominada ruta del oeste (ver figura 10), cuya trayectoria se describe enseguida:

Las aves parten del oeste de Estados Unidos y Canadá hacia el ecuador, ya sea vía las costas de la vertiente del Pacífico o utilizando las cadenas montañosas como corredores (Sierra Madre Occidental, Sierra Madre del Sur, Eje Neovolcánico Transversal) (Medellín *et al.*, 2009).



Fuente: Medellín, et al., 2009

**Figura 10. Ruta del oeste, que siguen las aves para llegar al Eje Neovolcánico Transversal**

El AICA 223 denominada Volcanes Iztaccíhuatl Popocatepetl con una superficie de 92997.7 ha, se encuentra a una distancia aproximada de 4.02 km en dirección hacia el sur, con respecto de “Arcoíris Sport Fishing”. Es un área con clima templado y frío donde convergen las zonas Neártica (especies típicas norteamericanas) y Neotropical (especies típicas sudamericanas), en ellos existen diversos tipos de vegetación: bosque de pino, bosque de oyamel, bosque de encino, bosques mixtos, pino-encino, bosque mesófilo de montaña, matorral xerófilo y pastizales. En la zona se pueden encontrar 44.13% de las especies vegetales reconocidas para el Valle de México, es un importante aporte de agua y algunos de sus ríos son permanentes (CONABIO, 2012).



Modificado en base a CONABIO 2001 y Google Earth 2012

**Figura 11. Distancia aproximada entre “Arcoíris Sport Fishing” y el AICA No. 223**

### V.3 División Florística (Provincia Fitogeográfica)

El predio donde se ubica “Arcoíris Sport Fishing”, se encuentra dentro de una zona rural, por lo que las condiciones naturales han sido afectadas hace tiempo, sin embargo, debido a las características físicas que presentan, se considera que la vegetación natural predominante en las áreas cercanas, está incluida en la provincia florística denominada serranías meridionales que comprende el Eje Volcánico Transversal, que corre de Jalisco y Colima a Veracruz, comprende la Sierra Madre del Sur y el complejo montañoso del norte de Oaxaca. Estos sistemas montañosos, son de gran interés biológico, pero en particular el Eje Volcánico, que cruza por el centro de México en dirección este-oeste representa el límite meridional de la región norte del país.

El grueso de la masa arbórea forestal se desarrolla de los 1500 a 3000 msnm y los tipos de vegetación que predominan en esta región De acuerdo con Rzedowski (1978) en FAO, los géneros *Quercus* (encinos) y *Pinus*. Dentro del género *Pinus* destacan por su importancia comercial, las especies siguientes: *Pinus ayacahuite*, *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *P. montezumae*, *P. leiophylla*, *P. cembroides* var. *orizabensis*, *P. chiapensis*, *P. lumholtzii*, *P. teocote*, *P. herrerae*, *P. lawsonii*, *P. tenuifolia*, *P. douglasiana*, *P. pseudostrobus coatepecensis*, *P. oaxacana*, *P. hartwegii*, *P. rudis*, *P. michoacana*, *P. oocarpa*, *P. pringlei*, *P. greggii*, *P. maximinoi* y *P. caribaea*. El clima es templado y frío, sitio donde convergen las zonas Neártica y Neotropical, la temperatura media anual oscila entre 6 y 28°C. La vegetación predominante son los bosques de coníferas, especialmente *Pinus*, *Abies*, *Cupressus* y *Quercus*, aunque existen otros géneros asociados como *Alnus*, *Arbutus*, *Tilia*. En esta subregión se presentan varias especies de *Pinus* de gran importancia actual y potencial como recursos genéticos, entre las que se incluyen *P. oocarpa*, *P. douglasiana*, *P. herrerae*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite*, *P. patula*, *P. chiapensis*, *P. maximinoi*, *P. oaxacana*, *P. pringlei* y *P. leiophylla* (Vargas, 2003).



Fuente: Instituto de Geografía, UNAM 2001a y Google Earth 2012

**Figura 12. Provincias fitogeográficas con respecto al sitio del proyecto**

#### V.4 Anfibios

El grupo está representado por los órdenes Caudata y Salientia; comprende tres familias: *Plethodontidae*, *Ambystomaitidae* e *Hylidae* y seis especies. *Pseudoeurycea leprosa* (tlaconete leproso o salamandra) es una especie amenazada y endémica; *Pseudoeurycea cephalica* (tlaconete regordete) está amenazado; *Chiropterotriton chiropterus* (salamandra pie plano) es una especie endémica y protegida; *Ambistoma altamirani* (el ajolote) es endémico, mientras que *Hyla plicata* (rana plegada) es una especie amenazada y endémica (CONANP, 2012).

En el estudio realizado por Vega y Álvarez. Denominado “La herpetofauna de los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl” (1992), se encontraron un total de 22 taxa: 9 de anfibios y 13 de reptiles.



Fuente: Instituto de Geografía, UNAM 2001b y Google Earth 2012

**Figura 13. Provincias herpetofaunísticas con respecto al sitio del proyecto**

## V.5 Región y Provincia Mastogeográfica

De la misma manera “Arcoíris Sport Fishing” se encuentra inmerso en la provincia volcánico transverso y región Neártica por lo que la fauna natural de mamíferos predominante en las áreas cercanas, sería característico de esta región.

En el parque nacional se distribuyen 8 órdenes, 15 familias y 50 especies de mamíferos; tres de esas especies son endémicas: los ratones *Peromyscus maniculatus subsp. cineritius* (probablemente extinta en el medio silvestre) y *Peromyscus maniculatus exiguus* (que se encuentra amenazada); y el *Romerolagus diazi* (zacatuche o teporingo), que se encuentra en peligro de extinción. Otras especies amenazadas son *Sorex vagrans* (musaraña oscura) y el *Taxidea taxus* (tejón o tlalcoyote) (CONANP, 2012).



Fuente: Instituto de Geografía, UNAM 2001c y Google Earth 2012

**Figura 14. Región mastogeográfica donde se localiza el sitio del proyecto**

## V.6 Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)

En México en el mes de diciembre de 2009, el registro de plantas en operación era de 2029 instalaciones, con una capacidad instalada de 120860.89 L/s y caudal tratado de 88127.08 L/s, que significa el 6.93% en cuanto a capacidad instalada y de 5.36% en caudal tratado, lo que permitió alcanzar una cobertura de tratamiento de aguas residuales municipales del 42.1% en el ejercicio. Puebla tiene 72 plantas con una capacidad instalada de 3152.2 (L/s) con un caudal tratado de 2545.3 (L/s). En Tlahuapan existen dos plantas de tratamiento dispersas en dos localidades, una en Santiago Coltzingo que realiza el proceso de lodos activados con una capacidad instalada de 3 L/s y un caudal tratado de 1.8 L/s y su cuerpo receptor es una barranca. La segunda

planta está en Santa Cruz Otlatla y realiza el proceso combinado de RAFA con filtro biológico con una capacidad instalada de 1.93 L/s y un caudal tratado de 1.93 L/s y su cuerpo receptor es el río Atoyac (CONAGUA, 2009).

## **VI. Hipótesis**

En el lago Arcoíris se desarrolla la actividad recreativa de pesca deportiva, práctica que implica que el agua, sirva para el cultivo de peces para consumo humano y que tenga contacto directo con el público que realiza dicha actividad, por lo que se requiere agua de calidad que cumpla los límites máximos permisibles de la NOM-003-SEMARNAT-1997. Si el agua residual que abastece al lago Arcoíris recibe un tratamiento adecuado en un sistema de humedales construidos de flujo sub superficial, podrá ser vertida al lago, sin representar ningún riesgo para la salud de visitantes y lugareños.

## **VII. Objetivos**

### **General**

Evaluar la calidad del agua residual de la barranca Panacuale, antes y después de haber sido tratada en un sistema de humedales construidos de flujo sub superficial, y determinar si cumple con los límites máximos permisibles de la NOM-003-SEMARNAT-1997 para su reuso en actividades recreativas.

### **Específicos**

- Caracterizar la calidad del agua de la barranca Panacuale (afluente), con la NOM-001-SEMARNAT-1996, así como la que recibe tratamiento con humedales (efluente).
- Determinar un posible reuso del agua tratada de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997.
- Descargar al lago Arcoíris el agua tratada en el sistema de humedales, si cumple con los límites máximos permisibles de la NOM-003-SEMARNAT-1997.

## VIII. Métodos

Se dividieron en tres etapas: gabinete, campo y laboratorio.

### Etapa de gabinete

Se revisaron artículos científicos, bases de datos especializadas e información bibliográfica específica en materia de:

- Problemática del agua a nivel global, nacional y local.
- Desarrollo y funcionamiento de humedales construidos, principalmente los de flujo subsuperficial.
- Importancia de los parámetros de calidad del agua y su determinación analítica con procedimientos estandarizados.
- Normas oficiales mexicanas vigentes, referentes y aplicables al reuso del agua residual.
- Las muestras simples se recolectaron durante seis salidas distribuidas en ocho meses de trabajo de acuerdo a la NMX-AA-003-SCFI-1980, (Aguas residuales. Muestreo, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de marzo de 1980.), y a la NMX-AA-014-SCFI-1980 (Cuerpos receptores. Muestreo, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de septiembre de 1980.); según fue el caso.
- Se establecieron dos sitios de muestreo, ubicados en el canal de ingreso (afluente) y salida de humedales (efluente).

En una base de datos del programa Excel, se registraron durante seis meses los resultados de los diferentes muestreos.

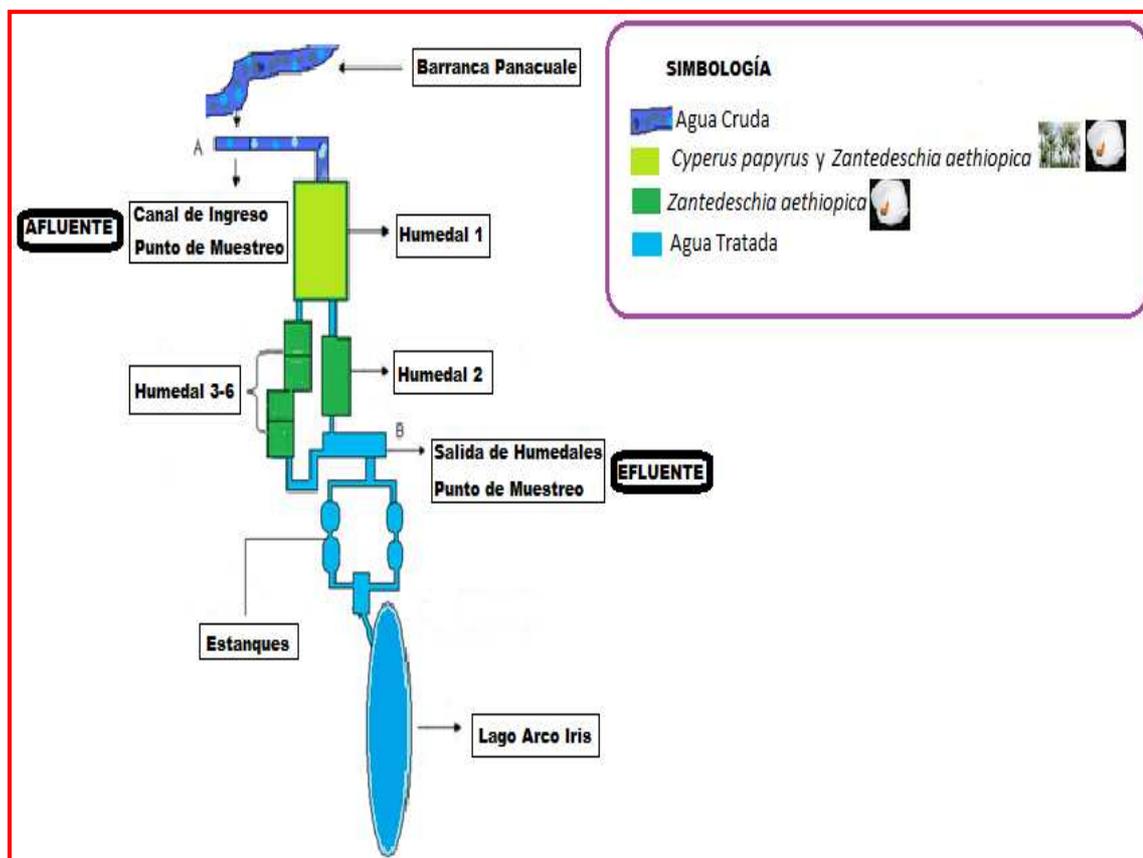
- Se compararon los resultados obtenidos de los diferentes muestreos con las NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997 para determinar la calidad del agua de la barranca y la que se descarga en el lago respectivamente.

### Etapa de campo

- Se seleccionaron dos sitios para recolectar las muestras. El primer sitio de recolecta fue el “canal de ingreso” (afluente) que conduce el agua que proviene de la barranca “Panacuale”. El segundo sitio de muestreo

fue la salida de agua después de recibir tratamiento en el sistema de humedales (efluente).

- Se realizaron seis muestreos tanto en el afluente como en el efluente.



Fuente: Laboratorio de Proyectos Ambientales. L3-PB-05. UNAM-FESZ, 2012

Figura 15. Sistema de Humedales del club de pesca "Arcoíris Sport Fishing"

**Cuadro XI. Normas Oficiales Mexicanas y métodos para determinar los parámetros físicos y químicos en campo (*In situ*)**

NORMA	PARÁMETRO	MÉTODO	EXPRESIÓN
NMX-AA-012-SCFI-2001	Oxígeno Disuelto (OD)	Winkler	mgL <sup>-1</sup>
NMX-AA-007-SCFI-2000	Temperatura	Termómetro	°C
NMX-AA-008-SCFI-2000	pH	Potenciométrico	Unidades de Ph
NMX-AA-093-SCFI-2000	Conductividad Eléctrica	Electrodo	mS/cm <sup>2</sup>

Fuente: Laboratorio de Proyectos Ambientales. L3-PB-05. UNAM-FESZ, 2012

Diversos componentes del agua cambian al poco tiempo de su colecta, por lo que su determinación debe efectuarse en el sitio de muestreo, o en el menor tiempo posible. Algunos parámetros tienen un tiempo de conservación más

duradero, entonces las muestras deben ser tratadas y conservadas para su análisis posterior de acuerdo con las normas del cuadro XI.

### Etapa de laboratorio

Se procesaron las muestras en el laboratorio de acuerdo a las siguientes especificaciones.

**Cuadro XII. Normas Oficiales Mexicanas y métodos para determinar los parámetros físicos, químicos y biológicos**

NORMA	PARÁMETRO	MÉTODO	EXPRESIÓN
NMX-AA-042/1-SCFI-2008	Coliformes	Fermentación de tubos múltiples	NMP/100 mL
NMX-AA-028-SCFI-2008	DBO <sub>5</sub>	Winkler	mgL <sup>-1</sup>
NMX-AA-030-SCFI-2001	DQO	Digestión a Reflujo	mgL <sup>-1</sup>
NMX-AA-034-SCFI-2001	Sólidos Totales (ST)	Evaporación y calcinación	mgL <sup>-1</sup>
NMX-AA-034-SCFI-2001	Sólidos Totales Volátiles (SVT)	Evaporación y volátiles	mgL <sup>-1</sup>
NMX-AA-034-SCFI-2001	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Evaporación	mgL <sup>-1</sup>
NMX-AA-034-SCFI-2001	Sólidos Disueltos Totales (SDT)	Evaporación	mgL <sup>-1</sup>
NMX-AA-012-SCFI-2001	OD	Winkler	mgL <sup>-1</sup>
NMX-AA-026-SCFI-2001	N Total (N <sub>tk</sub> )	Kjendahl	mgL <sup>-1</sup>
NMX-AA-026-SCFI-2001	Nitrógeno Amoniacal (NH <sub>3</sub> -N)	Kjendahl	mgL <sup>-1</sup>
NMX-AA-029-SCFI-2001	P Total	Fosfovanadomolibdato	mgL <sup>-1</sup>
NMX-AA-029-SCFI-2001	P Ortosoluble	Fosfomolibdato	mgL <sup>-1</sup>
Manual de técnicas básicas para el análisis de ambientes acuáticos, 1984. FESZ.	N-NO <sub>3</sub>	Ácido fenoldisulfónico	mgL <sup>-1</sup>
Manual de técnicas básicas para el análisis de ambientes acuáticos, 1984. FESZ.	N-NO <sub>2</sub>	Ácido sulfanílico	mgL <sup>-1</sup>
NMX-AA-039-SCFI-2001	SAAM	Colorimétrico Alquil-bencen-sulfonátos (ABS)	mgL <sup>-1</sup>

Fuente: Laboratorio de Proyectos Ambientales. L3-PB-05. UNAM-FESZ, 2012

## IX. Análisis y discusión de resultados

Los resultados que se presentan a continuación indican las características físicas, químicas y biológicas de la calidad del agua tratada en el humedal de flujo subsuperficial, de octubre de 2010 a mayo de 2011.

### Parámetros físicos

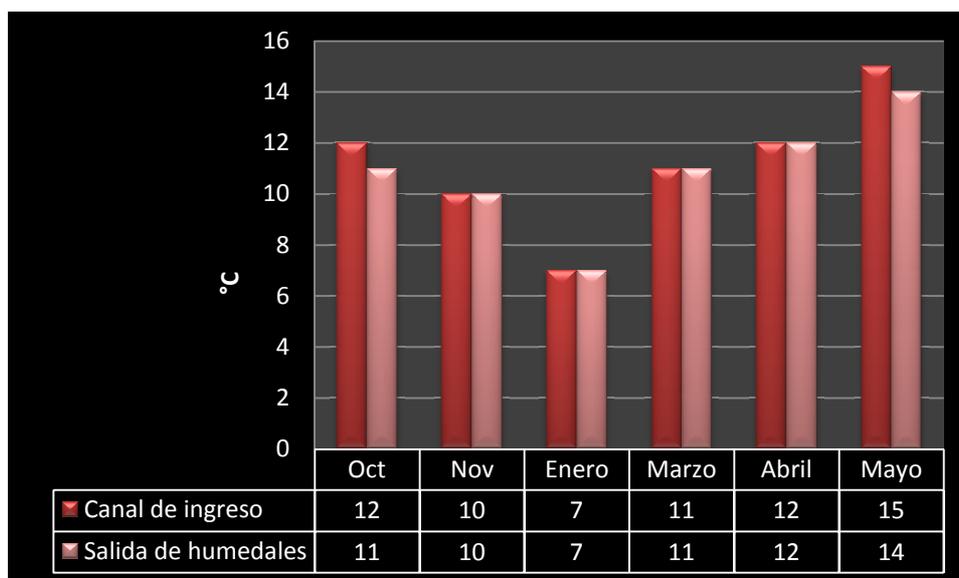
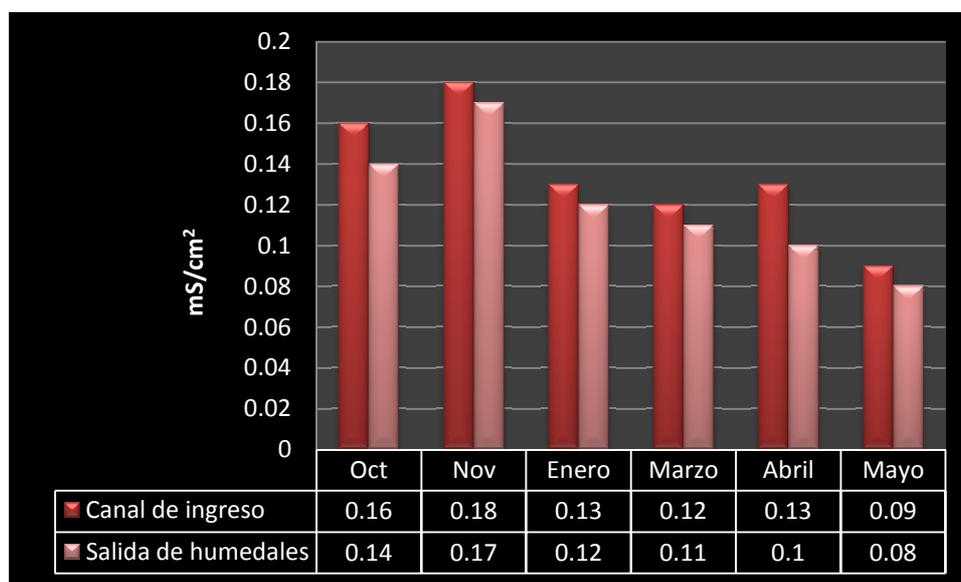


Figura 16. Temperatura

La temperatura del sistema es aceptable ya que a lo largo de los seis muestreos osciló entre 7 y 15°C, estas temperaturas son características de la zona de estudio, cuyos registros indican que van de 5 a 12°C (García, 1998 e INAFED, 2009). Los registros entre 7 y 15°C indican que la solubilidad del oxígeno es adecuada, es absorbido por las bacterias aerobias debido al metabolismo de los microorganismos, la tasa de utilización es afectada de igual forma por la temperatura, también influye en las velocidades de las reacciones químicas, en la vida de la flora y fauna acuática así como la de usos del agua (Romero, 2000 y Metcalf, 1981). Los procesos biológicos, como el desarrollo bacteriano se aceleran cuando la temperatura incrementa y se desaceleran cuando disminuye. El rango óptimo de la actividad bacteriana se da de 25-35 °C. Cuando la temperatura se acerca a 50 °C hace que los procesos de digestión aerobia y la nitrificación bacteriana se detengan; de igual manera, cuando la temperatura es menor a 5 °C la actividad microbiana se inhibe (American Society for Testing and Materials, 1991). Por lo que se puede decir que la temperatura que se presentó a lo largo de los meses de trabajo es

aceptable para el crecimiento microbiano, aunque no se encuentra en el rango óptimo, el crecimiento bacteriano se da pero de una manera limitada debido a que la zona de estudio es fría, se llegan a registrar temperaturas bajo cero. La figura 16 muestra una temperatura mayor en canal de ingreso y disminuye al salir del humedal, regularmente la temperatura de las aguas residuales es mayor que la del agua potable o la de abastecimiento, este aumento se da como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente del uso doméstico e industrial (Delgadillo *et al.*, 2010).



**Figura 17. Conductividad Eléctrica**

A lo largo de los seis muestreos se observan unidades pequeñas de  $\text{mS}/\text{cm}^2$  tanto en el afluente como en el efluente, lo que indica que estas aguas conducen poco la electricidad y tienen poca cantidad de iones en solución (fundamentalmente cloruro  $\text{Cl}^-$ , nitrato  $\text{NO}_3^-$ , sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$ , fosfato  $\text{PO}_4^{3-}$ , sodio  $\text{Na}^+$ , magnesio  $\text{Mg}^{2+}$  y calcio  $\text{Ca}^{2+}$ ) (Goyenola, 2007). La baja conductividad eléctrica se debe principalmente al origen doméstico del agua, en ella predominan compuestos orgánicos como aceites, fenoles, alcoholes, azúcares y otros compuestos no ionizables que (aunque contaminantes), no modifican mayormente la conductividad. Según Reitec, 2012. El agua doméstica tiene un rango de 0.500 a 0.800  $\text{mS}/\text{cm}^2$ , pero nuestros resultados están por debajo de este rango, debido a que los humedales se encuentran en una zona fría y la conductividad se reduce al disminuir la temperatura (Smart-fertilizer, 2012). En

la figura 32 se puede observar que hay poca cantidad de sólidos disueltos totales, lo que genera un flujo de electrones y provoca una menor capacidad de conducir la corriente eléctrica.

([www.lenntech.es/calculadoras/tds/tdsyconductividad-electrica](http://www.lenntech.es/calculadoras/tds/tdsyconductividad-electrica), 2012).

### Parámetros químicos

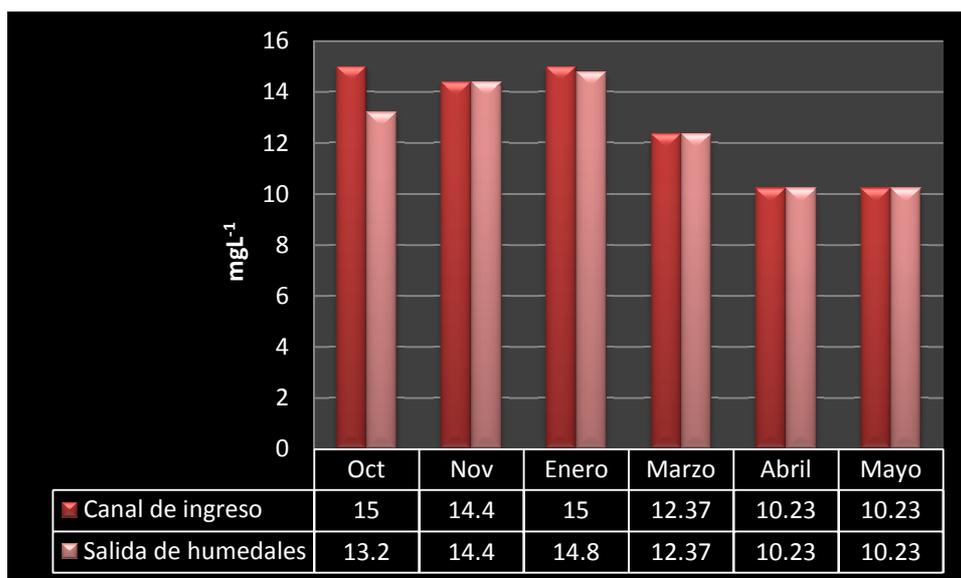


Figura 18. Oxígeno Disuelto (O<sub>2</sub>)

En la figura 18, se puede observar que tanto el agua del afluente como la del efluente presentan buena cantidad de oxígeno disuelto, ya que de acuerdo a La Motte, 2010. “Aunque la cantidad de oxígeno requerida varía de acuerdo a las especies y a su grado de crecimiento. Los niveles de oxígeno disuelto por debajo de 3 mgL<sup>-1</sup> dañan a la mayor parte de los organismos acuáticos. El oxígeno es un elemento crítico para la supervivencia de las plantas y animales acuáticos; la falta de oxígeno disuelto, es un indicador de polución. Algunas especies acuáticas son más sensibles que otras a la falta de oxígeno por eso damos algunos rangos para analizar los resultados de los ensayos:

5–6 mgL<sup>-1</sup> Suficiente para la mayor parte de las especies

<3 mgL<sup>-1</sup> Dañino para la mayor parte de las especies acuáticas

<2 mgL<sup>-1</sup> Fatal a la mayor parte de las especies”

Por lo que podemos decir que las concentraciones de oxígeno en el sistema de humedales presentan valores aceptables por arriba de 10 mgL<sup>-1</sup>, debido a que

el oxígeno de la atmósfera se disuelve con facilidad en el agua de la barranca Panacuale, ya que la mayor parte de la superficie del agua del río está expuesta a factores como la atmósfera (contacto con el aire); sumado a esto, el relieve del sitio es accidentado y esto produce que el agua aireada absorba más oxígeno antes de entrar a los humedales (La Motte., 2010).

Además, el beneficio de la vegetación que se encuentra en el sistema de humedales es la transferencia de oxígeno a la zona radicular, su presencia física en el sistema (tallos, raíces y rizomas) permite la penetración a la biopelícula o sustrato y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión.

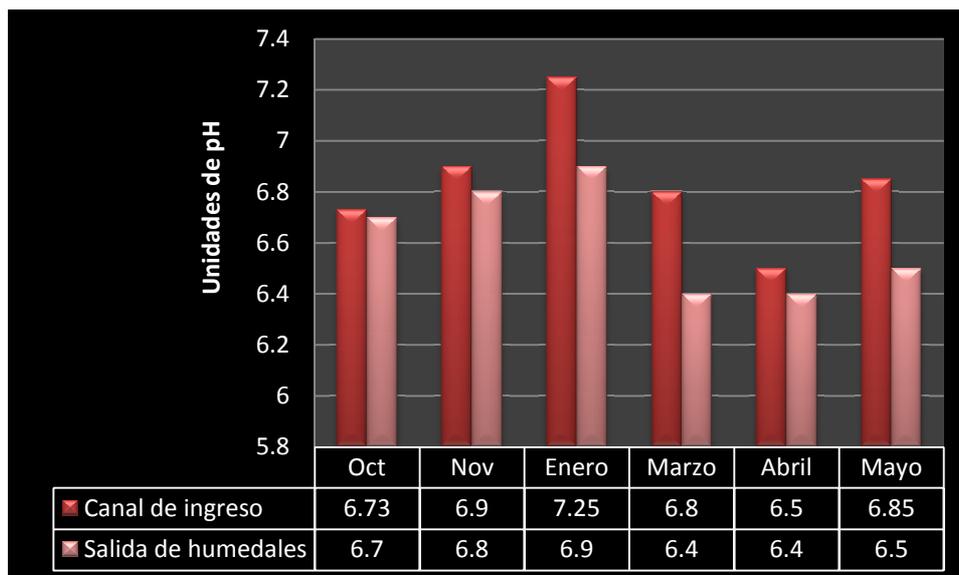
Las plantas contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras. Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo, dan lugar a velocidades de aguas bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen. Toman el carbono, nutrientes y elementos traza para incorporarlos a los tejidos de la planta. Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos. El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas oxigena otros espacios dentro del sustrato, el tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos (Lara, 1999).

Concentraciones menores de  $3 \text{ mgL}^{-1}$  de ( $\text{O}_2$ ) son letales para la supervivencia de los organismos (Cervantes, 1988) lo cual no ocurre en nuestro sistema.

La concentración de ( $\text{O}_2$ ) después de salir del sistema va de  $10\text{-}15 \text{ mgL}^{-1}$ , que es utilizado por bacterias aerobias de plantas y animales muertos o en descomposición, estén en tierra o bajo el agua y que lo necesitan para respirar, crecer y sobrevivir; este oxígeno es usado para la descomposición ya que las bacterias lo usan para oxidar, o alterar químicamente el material para separarlo en sus partes componentes (La Motte, 2010).

Las concentraciones de ( $\text{O}_2$ ) que se presentan tanto en el afluente como en el efluente son debido a que el agua de la barranca Panacuale es dulce y en general estas aguas contienen más oxígeno que las salobres.

El oxígeno afecta a un vasto número de indicadores, no solo bioquímicos, también estéticos como el olor, transparencia y sabor del agua ([www.lenntech.es/oxigeno-disuelto](http://www.lenntech.es/oxigeno-disuelto), 2012).

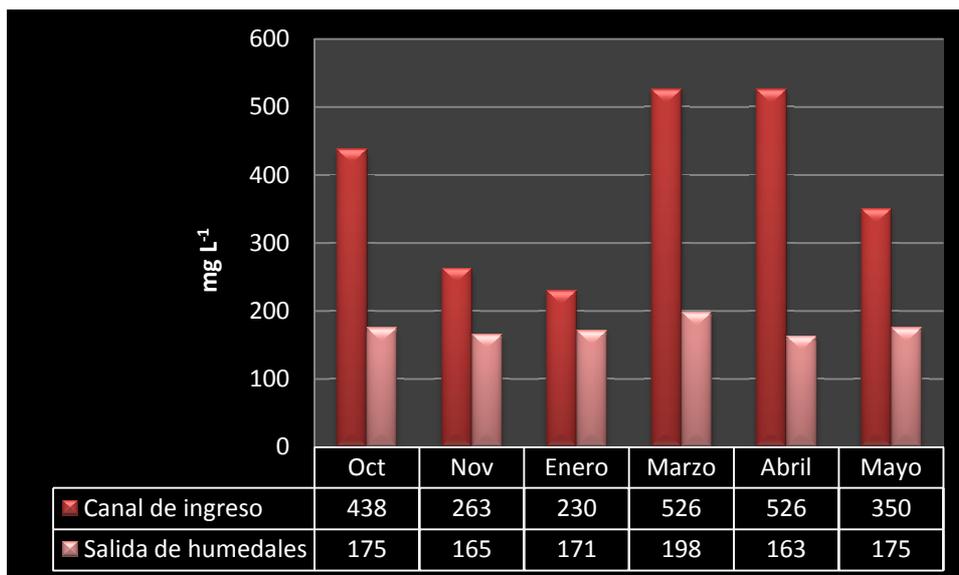


**Figura 19. pH**

En la figura 19, se observa que el pH registrado estaba entre 6.4 a 7.2. Las aguas residuales de tipo doméstico tienen pH cercano a la neutralidad entre 6.5 y 7.5, intervalo en el que se ubican nuestros resultados. El pH registrado es ligeramente alcalino por la presencia de bicarbonatos, carbonatos y metales alcalinos (Jiménez, 2002). Cabe destacar que la población de Santa Rita Tlahuapan descarga sus aguas domésticas e industriales crudas a la barranca Panacuale, hecho que impacta en tener pH por debajo de 7 unidades, prácticamente en todos los monitoreos.

Estos resultados son favorables para la existencia de la mayoría de diferentes formas de vida y para que se lleven a cabo muchas reacciones bioquímicas (Tesillos y Ubaldo, 2007). Determinados procesos químicos solamente pueden tener lugar a un determinado pH. Por ejemplo, las reacciones del cloro solo tienen lugar cuando el pH tiene un valor de entre 6,5 y 8 ([www.lenntech.es/ph](http://www.lenntech.es/ph), 2012).

El pH del sustrato, afecta la disponibilidad y retención de nutrientes, el valor debe encontrarse entre 6.5 y 8.5 (Tesillos y Ubaldo, 2007).



**Figura 20. Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Los resultados muestran que la concentración de DQO que ingresó al sistema en los meses de marzo y abril alcanzó su concentración más alta ( $526 \text{ mgL}^{-1}$ ), a partir del inicio de las lluvias (mayo), disminuyó la concentración a  $175 \text{ mgL}^{-1}$ ; a su paso por el sistema de humedales durante los seis muestreos se observa una disminución de materia orgánica e inorgánica cercana al 51% en la época seca, y en la temporada de lluvias alcanzó solamente un 45%. Se espera que las concentraciones de DQO del efluente sigan disminuyendo, ya que al calcular los porcentajes y promedios de remoción, el sistema de humedales tiene una eficiencia de 48%, para el parámetro DQO en los seis meses de monitoreo.

La capacidad de remoción se debe a los efectos combinados entre el tiempo de retención hidráulica, la acción filtrante del sustrato para retener sólidos suspendidos del agua y la actividad biológica del sistema. La disminución de la concentración de DQO se debe al metabolismo de los macro y microorganismos heterótrofos aerobios y anaerobios, que utilizan los compuestos orgánicos del agua para producción de biomasa, aunque en el sistema también se generan reacciones químicas, principalmente de oxidoreducción. El aporte de oxígeno por las raíces de las plantas a la rizósfera afecta la remoción de DQO. La absorción de materia orgánica por las plantas es insignificante comparada con la degradación biológica (Romero *et al.*, 2009).

Los valores de DQO a diferencia de la DBO son mayores, debido a que presenta materias oxidables tanto orgánicas como minerales además de que el método sufre interferencias por la presencia de sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas como lo son (sulfuros, sulfitos, yoduros) que se reflejaron en los resultados. Además cabe señalar que la DQO es una medida aproximada del contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable de una muestra de agua (APHA, 1992).

De acuerdo al cuadro IV (Escala de Clasificación de Demanda Química de Oxígeno) en canal de ingreso (afluente) de octubre a mayo la DQO presentó resultados elevados mayores a  $200 \text{ mgL}^{-1}$  según la escala de clasificación de DQO (cuadro IV) indica que el agua residual doméstica está fuertemente contaminada, por lo que las aguas superficiales de la barranca Panacuale tienen un fuerte impacto por sus descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales en dónde sean vertidas.

En el efluente del sistema de humedales los valores disminuyen en todos los meses ubicándose en el rango de  $40 < \text{DQO} \leq 200 \text{ mgL}^{-1}$ , lo que indica que es una agua contaminada, por las descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal. Las concentraciones de DQO disminuyeron al pasar por el sistema de humedales.

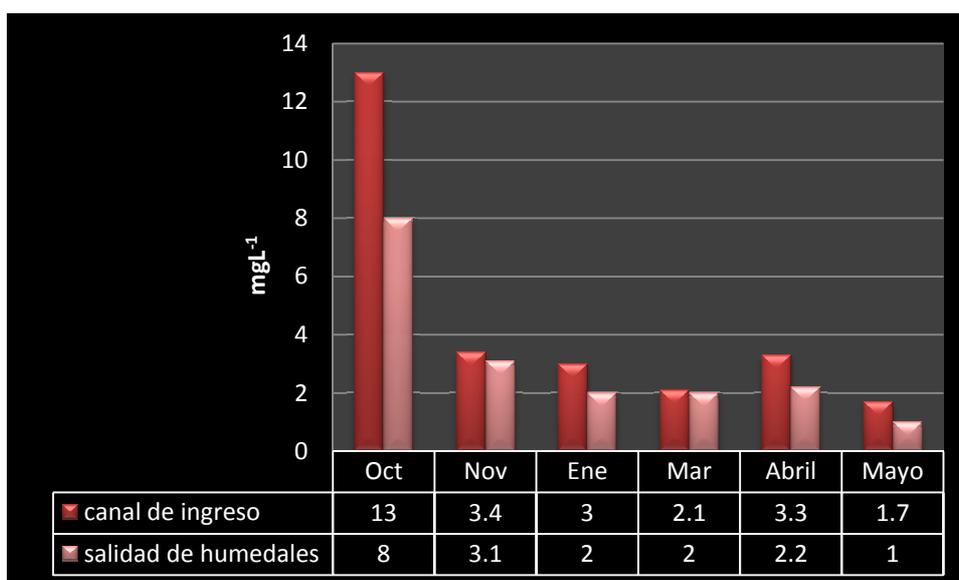
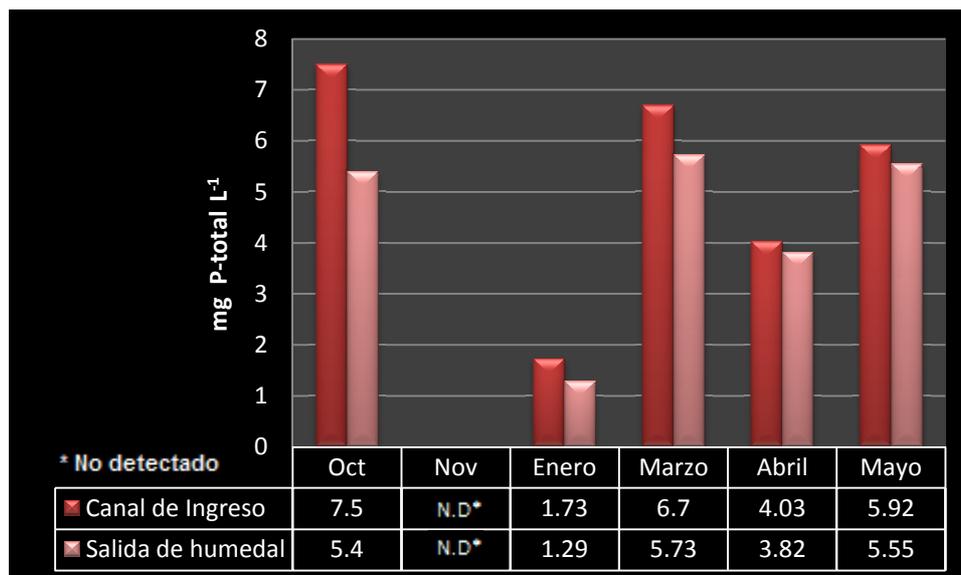


Figura 21. Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)

Las concentraciones del afluente de SAAM disminuyeron al pasar por el humedal, esto se observa para todos los meses de monitoreo, las concentraciones son altas ya que según la norma NMX-AA-039-SCFI-2001, debe ser inferior a  $0,1 \text{ mgL}^{-1}$ . Los meses en los que más descendieron las concentraciones de SAAM fueron los meses de enero a mayo, el mes de marzo es un parte aguas debido principalmente al cambio de época de seca a época de lluvia, la temperatura provoca que la biopelícula disminuya su eficacia y por eso prácticamente no hubo remoción. Sin embargo, sus concentraciones siguen elevadas porque las aguas que se descargan al río son residuos acuosos del lavado doméstico de ropa y otras operaciones de limpieza, donde se utilizan en gran medida detergentes sintéticos con ABS (tensoactivo: sulfonato de alquilbenceno), una estructura orgánica molecular ramificada y con presencia de un anillo bencénico, el cual no es biodegradable. El poder contaminante de los detergentes con ABS se manifiesta en los vegetales acuáticos inhibiendo el proceso de la fotosíntesis originando la muerte de la flora y la fauna acuáticas. La mayoría de los detergentes sintéticos son contaminantes persistentes debido a que no son descompuestos fácilmente por la acción bacteriana (Ramírez, 2006).

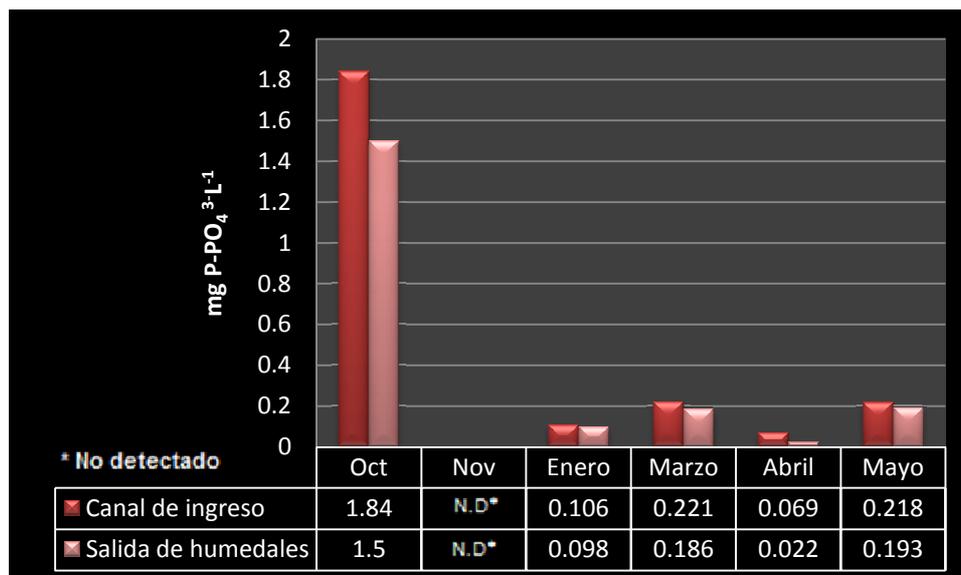
El alto contenido de SAAM provoca la formación de espuma, toxicidad para la vida acuática y crecimiento desmesurado de la flora acuática por el aporte de fosfatos (NMX-AA-039-SCFI-2001).



**Figura 22. Fósforo Total**

El fósforo total incluye distintos compuestos como diversos ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. Los resultados muestran que ha disminuido la concentración en la mayoría de los meses y esto se da porque el fósforo total en sus distintas formas es removido parcialmente por las plantas, otra fracción es arrastrada por el agua y el resto se acumula en el sustrato (Sánchez, 2001). También vemos que la remoción de fósforo es baja en todos los meses, una de las limitantes de este sistema es la remoción de este elemento. De acuerdo a Lara, (1999) los resultados obtenidos en la mayoría de meses, están dentro del rango óptimo tanto en afluente como en el efluente ya que estos oscilan entre 4 y 15 mgL<sup>-1</sup>. Dependiendo del caudal y de la carga hidráulica asociada, es posible remover entre 30 y 50% del fósforo presente. En nuestro caso la remoción fue en octubre de 28%, marzo 15%, abril 6% y de mayo 7%. Es importante destacar que para este parámetro en particular solamente se realizaron cinco monitoreos, no se realizó el de noviembre. Como se observa en la figura 22 la remoción es baja, una limitante de estos sistemas es la poca remoción de fósforo, debido al poco o nulo contacto con el suelo, ya que esto promovería su precipitación.

El diseño del humedal ofrece la ventaja de elegir un área mínima para permitir remoción máxima de contaminantes (Tesillos y Ubaldo, 2007).



**Figura 23. Fósforo Ortosoluble**

Cerca del 25% del fósforo total está presente como ortofosfatos tales como: fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), fosfato de hidrógeno ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ), ión dihidrógenofosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4$ ) y ácido fosfórico u ortofosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), formas que están disponibles para el metabolismo biológico inmediato (Delgadillo *et al.*, 2010). La figura 23 muestra el comportamiento de la concentración del fósforo ortosoluble ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), fracción útil que absorben las plantas autótrofas. A través de los meses de monitoreo se observa que en salida de humedales (efluente) disminuyó en la mayoría de ellos, una parte de fósforo ortosoluble ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) se ha incorporado a la biomasa microbiana (generalmente combinada con una fase anaerobia preliminar que estimula el consumo de fosfato y el almacenamiento intracelular en forma de polifosfato) (WTW, 2011). Hay otras formas de eliminar fosfatos y estas son de tipo físico o químico, al añadir sales metálicas como son ( $\text{Fe}^{3+}$  o  $\text{Al}^{3+}$ ), los fosfatos precipitan y se convierten en parte de los lodos activados residuales, además de que confieren un color negro al agua del humedal (García y Corzo, 2008). Pero anularía una de las grandes ventajas de estos sistemas que es el no uso de productos químicos y la escasa formación de lodos residuales.

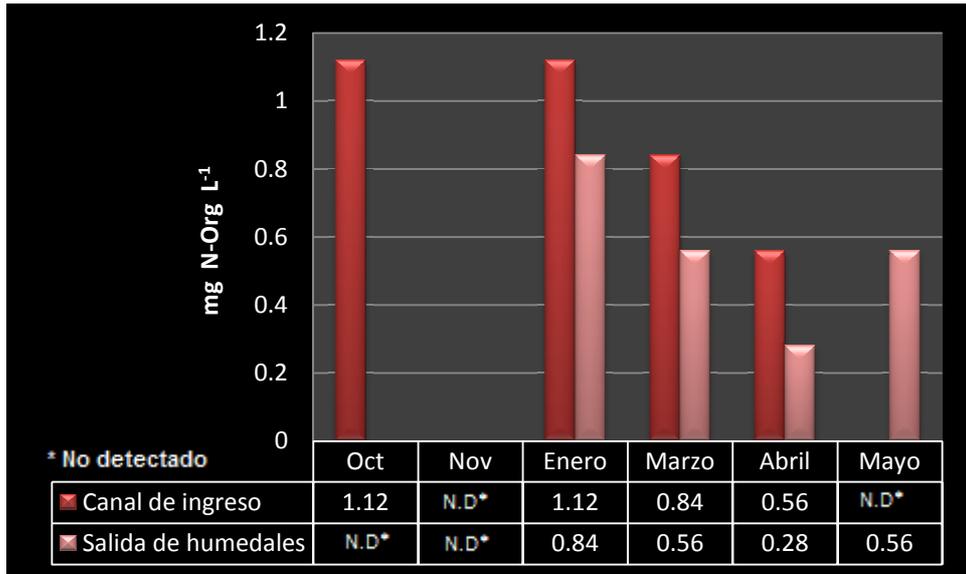


Figura 24. Nitrógeno Orgánico

Se observa a lo largo de los monitoreos que la concentración de nitrógeno orgánico (proteínas, péptidos, ácidos nucleicos, aminoácidos) es baja, lo que indica que la materia orgánica presente no es rica en nitrógeno orgánico (Ambientum, 2002). Un agua residual al contener nitrógeno orgánico implica que se ha contaminado recientemente con excretas y, por lo tanto, son un peligro para la salud (CONAGUA, 2007). No es el caso del caudal que recibe el lago Arcoíris.

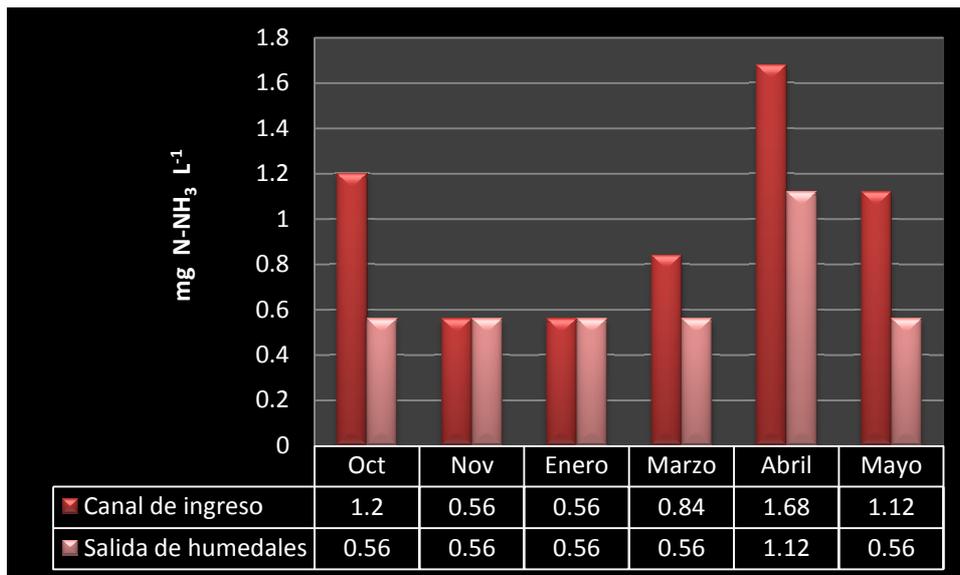


Figura 25. Nitrógeno Amoniaco (N-NH<sub>3</sub>)

El nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ) se produce por la desaminación de compuestos que contienen nitrógeno orgánico ( $\text{N-org}$ ) y por la hidrólisis de la urea. También puede producirse por la reducción de los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en condiciones anaerobias, por bacterias autótrofas nitrificantes del grupo de las nitrosomonas.

Durante todo el tiempo de monitoreo se observó que el nivel de nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ) fue bajo, no pasó los 2 mg  $\text{N-NH}_3$  (nitrógeno amoniacal), lo que provocó que las concentraciones de amoniaco ( $\text{NH}_3^-$ ) o ión amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) fueran bajos. Son gases que forman parte del ciclo del nitrógeno y se producen de forma natural por fermentaciones microbianas de productos nitrogenados, por ejemplo en la descomposición de proteínas o urea. El nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ) depende del nitrógeno orgánico porque el nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ) se produce por la desaminación de compuestos que contienen nitrógeno orgánico y por la hidrólisis de la urea. (CONAGUA, 2007). El amoniaco ( $\text{NH}_3^-$ ) puede ser volatilizado o tomado por plantas y microorganismos, con condiciones aerobias puede transformarse en nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) (nitrificación). Las aguas superficiales no deben contener normalmente amoniaco. En general, la presencia de amoníaco libre o ión amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) es considerado como una prueba química de contaminación reciente y peligrosa (Marcano, 2012).

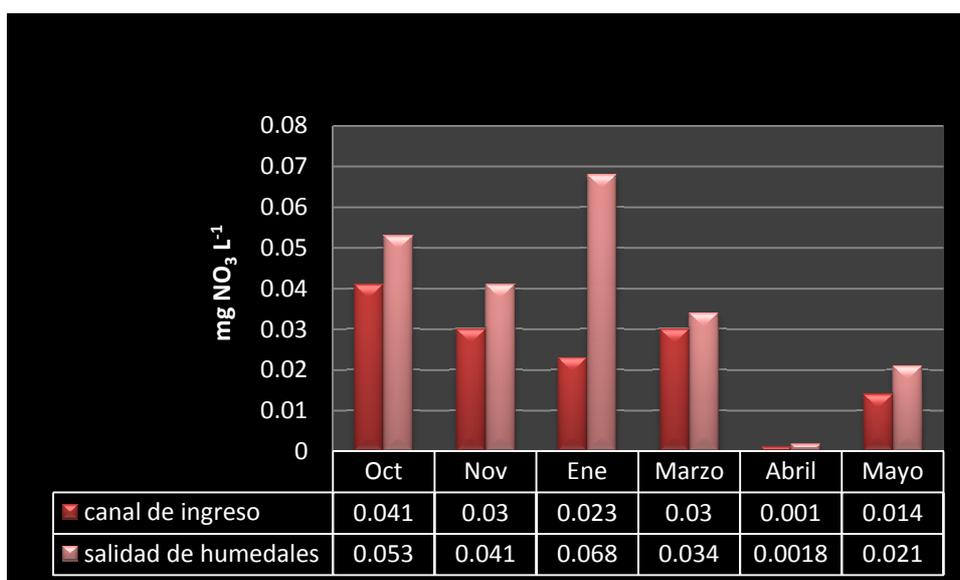
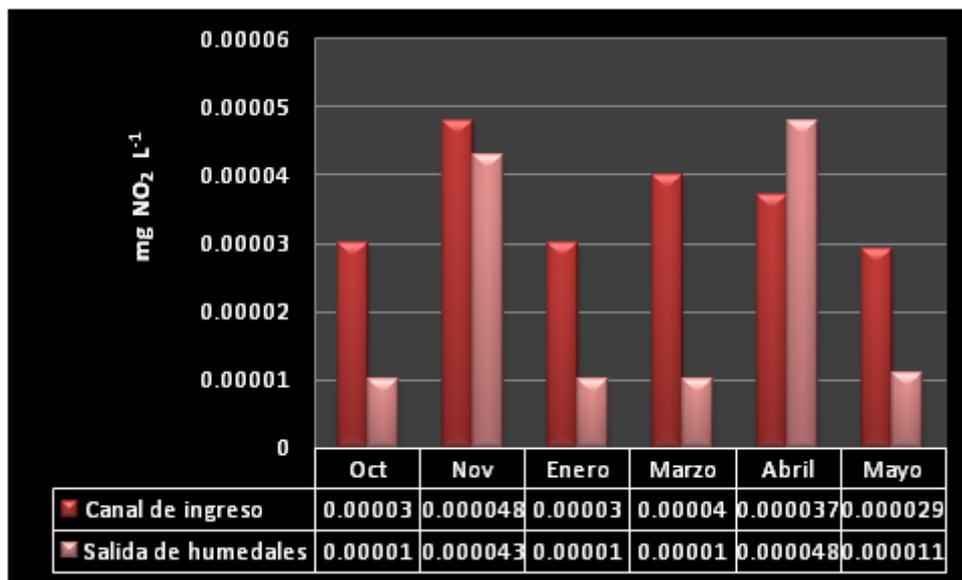


Figura 26. Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )

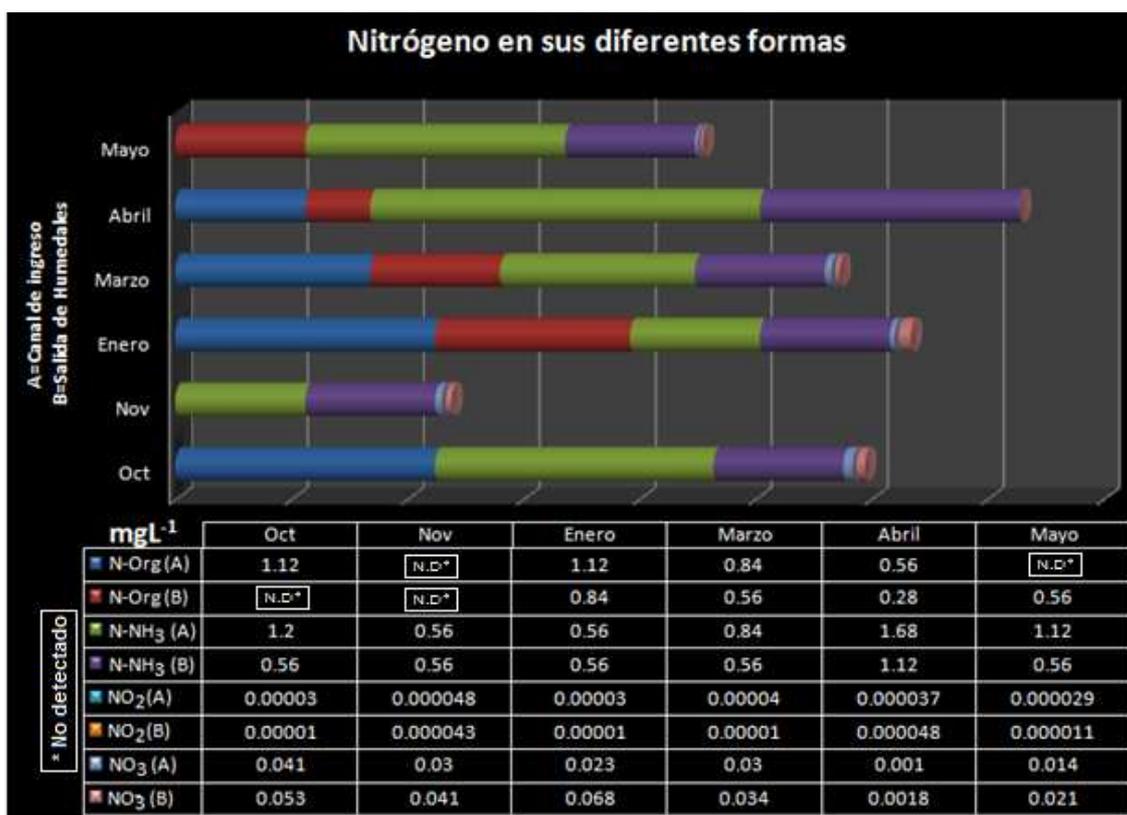
El nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) proviene del nitrógeno orgánico-amoniacal, el cual, al entrar en contacto con el oxígeno disuelto ( $\text{O}_2$ ), se transforma por oxidación en nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y posteriormente a nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). Este proceso de nitrificación depende de la temperatura, del contenido de oxígeno disuelto y del pH del agua. En la figura 26 se puede observar que los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) a lo largo de 6 meses han aumentado después de salir de los humedales porque se está llevando a cabo el proceso de nitrificación y aunque sea poco el contenido de nitrógeno orgánico-amoniacal se sigue llevando a cabo la nitrificación bacteriana con ayuda de las bacterias nitrobacter. La concentración de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) es baja, en las aguas naturales superficiales se presenta generalmente a niveles traza, en tanto que en agua residual doméstica solo se encuentra en pequeñas cantidades (NMX-AA-079-SCFI-2001). El nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) es la especie derivada del nitrógeno más importante. Supone una fuente de nutriente importante para ciertos organismos autótrofos que después de la absorción por parte de las raíces de las plantas se distribuyen con rapidez a todos los tejidos (Ros, 2011).



**Figura 27. Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ )**

En la figura 27 se puede observar que los niveles de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) son bajos, situación favorable ya que siempre deben de estar en cantidades inferiores a  $0.1 \text{ mgL}^{-1}$  en aguas superficiales bien oxigenadas. La baja concentración indica que los nitritos se hallan en un estado de oxidación intermedio entre el amoníaco ( $\text{NH}_3^-$ ) y el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (NMX-AA-099-SCFI-2006).

El nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) es el agente causal real de una enfermedad infantil denominada metahemoglobinemia por eso tienen que estar en concentraciones bajas. El ácido nitroso ( $\text{HNO}_2$ ) formado a partir del nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), en soluciones ácidas, puede reaccionar con aminas secundarias, dando lugar a nitrosaminas, muchas de las cuales son agentes carcinogénicos reconocidos. Estas razones hacen indispensables el control de la concentración de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) en el agua (Albert, 1997).



**Figura 28. Nitrógeno en sus diferentes formas**

En la figura 28 se muestra el comportamiento de la transformación de nitrógeno en sus diferentes formas, a su paso por el sistema de tratamiento (humedales construidos). La química del nitrógeno es compleja debido a los diversos estados de oxidación que puede asumir y al hecho de que esos cambios en el estado de oxidación pueden ser llevados a cabo por distintos organismos vivos. Estos cambios en el estado de oxidación son producidos por las bacterias, pueden ser positivos o negativos, dependiendo de las condiciones aeróbicas o anaeróbicas prevalentes.

La reserva principal de nitrógeno es la atmósfera. La mayoría de los seres vivos no pueden utilizar el nitrógeno elemental de la atmósfera para elaborar aminoácidos ni otros compuestos nitrogenados, por lo que dependen del nitrógeno que existe en las sales minerales del suelo.

Las etapas del ciclo del nitrógeno son: Amonificación, Nitrificación, Asimilación y Desnitrificación (Moroco, 2013).

En el agua el nitrógeno es un gas disuelto y tiene una parte orgánica y otra inorgánica, en la forma orgánica no está disponible y en la inorgánica lo encontramos en forma de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ).

En la figura 28 se observa que las concentraciones de nitrógeno orgánico (proteínas, aminoácidos) son bajas, debido a que existe poco contenido de nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ), ya que en el primer paso del ciclo del nitrógeno que es la amonificación en la que se degradan compuestos complejos a compuestos simples por los organismos que viven en el sustrato; biopelícula (bacterias y hongos), tienen poco material orgánico para biotransformar. Estos microorganismos necesitan y liberar el exceso de nitrógeno como amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) o amoníaco ( $\text{NH}_3^-$ ) y es donde ocurre uno de los procesos de depuración del caudal hídrico.

La carga de nitrógeno orgánico en el efluente es baja. Octubre y noviembre no detectó concentración de esta forma de nitrógeno, se aprecia que el nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) para estos mismos meses presentó concentraciones bajas ya que esta forma del nitrógeno depende del nitrógeno en forma orgánica.

#### “Nitrificación”

Este es el segundo paso del ciclo del nitrógeno: consiste en dos procesos distintos, separados y consecutivos, realizados por organismos diferentes. Por una parte intervienen las bacterias *nitrosomonas* y *nitrosococcus* en el sustrato, oxidan el amoníaco ( $\text{NH}_3^-$ ) o amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), en esta etapa se libera energía, que es utilizada por las bacterias como fuente energética primaria.

Por otro lado las bacterias (gram negativo aerobio) del género: *nitrobacter* que se encargan de oxidar el nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) forma en que la mayor parte del nitrógeno pasa del suelo a las raíces. Este proceso se llama nitratación (Pacheco *et al*, 2002).

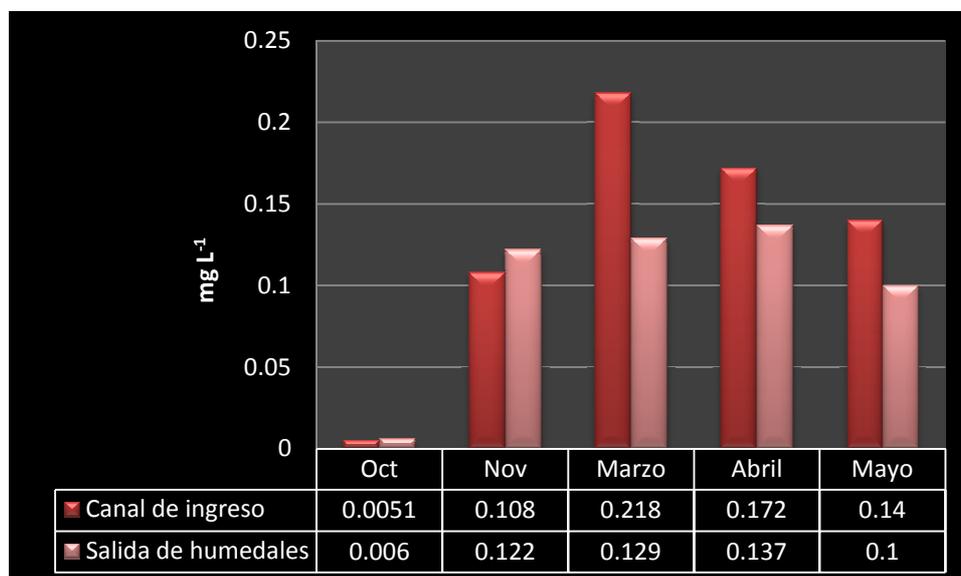
En la figura 28 vemos que los nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) son bajos y no se aprecian (color azul claro=canal de ingreso y color anaranjado=salida de humedales) estas concentraciones siempre deben estar bajas ya que altas concentraciones son tóxicas para las plantas; para seres humanos el principal mecanismo de toxicidad de los nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) es la oxidación del ión ferroso a ión férrico, lo que puede producir el trastorno sanguíneo denominado “metahemoglobinemia”, efectos cardiovasculares y efectos respiratorios, aunque es raro que se acumule.

La figura 28 muestra que los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en (Canal de ingreso=agua marina y Salida de humedales=rosa) presentan una concentración mayor que la de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), es la forma del nitrógeno en que las plantas pueden eliminar mediante la asimilación de los mismos porque son incorporados a la biomasa y por tanto eliminados del agua residual.

La desnitrificación heterótrofa es un proceso biológico de reducción del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) presente en las aguas residuales a nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ) en condiciones anóxicas en presencia de materia orgánica, por la acción de bacterias heterótrofas (*Pseudomonas*, *Paraccocus*, *Alcaligenes*, *Thiobacillus*, *Bacillus*), que usan un sustrato orgánico como fuente de carbono y energía.

En el humedal los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) presentes en la zona anaerobia del sustrato son reducidos por las bacterias heterótrofas a óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) o nitrógeno atmosférico ( $\text{N}_2$ ), ambos compuestos son desprendidos a la atmósfera. No todo el  $\text{N}_2$  es llevado a la atmósfera otra parte se queda en los productores primarios ya que estos albergan varios microorganismos como son: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Hyphomicrobium*, *Spirillum*, *Moraxella*, *Thiobacill* La siguiente es la ruta que sigue el nitrato  $\text{NO}_3^-$  para convertirlo en  $\text{N}_2$  en condiciones anaerobias:  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ . (Gambrell y Patrick, 1978). Con este

último proceso cerramos el comportamiento del nitrógeno en sus diferentes formas presentes en el sistema de depuración de aguas residuales.

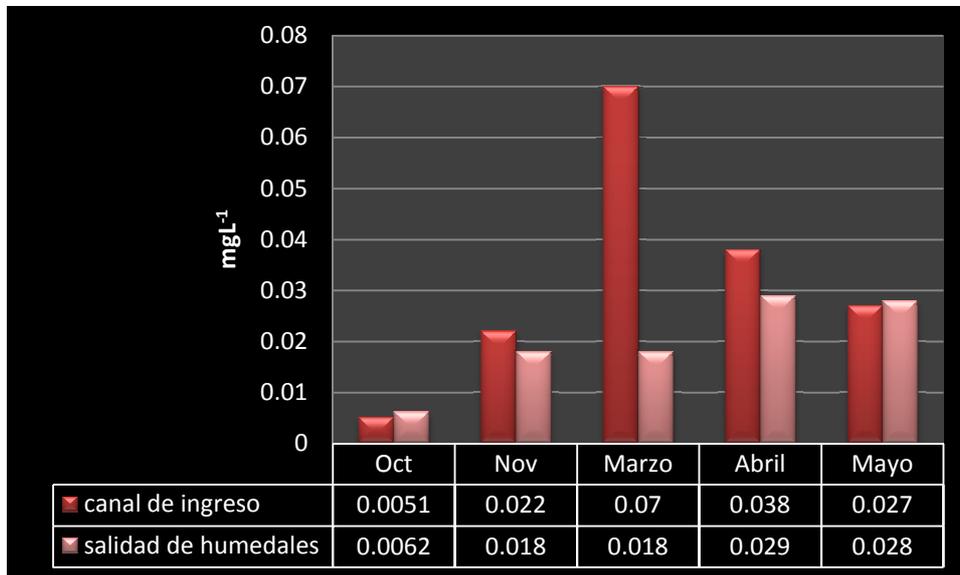


**Figura 29. Sólidos Totales (ST)**

Es importante mencionar que para el parámetro de sólidos en todas sus formas solamente se realizaron cinco monitoreos, no se realizaron en el mes de enero. La figura 29 muestra que las concentraciones de sólidos totales (ST) son bajas en todos los muestreos. Los sólidos totales son la suma: de los sólidos suspendidos totales, sales disueltas y materia orgánica. El método midió de manera cuantitativa los sólidos contenidos en aguas residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos (NMX-AA-034-SCFI-2001).

Del 100% del agua residual doméstica, solamente el 0.01 % son sólidos, de éste 0.01%, el 70 % son sólidos orgánicos y el 30 % son inorgánicos (arenas, sales y metales). Los sólidos totales se componen por el material flotante y material en suspensión, en dispersión coloidal y disolución. Los sólidos totales son toda la materia residual después de evaporar el agua a 103-105 °C (Tesillos y Ubaldo, 2007). Cabe mencionar que los sólidos totales en enero no se determinaron, por lo que solamente se presentan los resultados de cinco monitoreos.

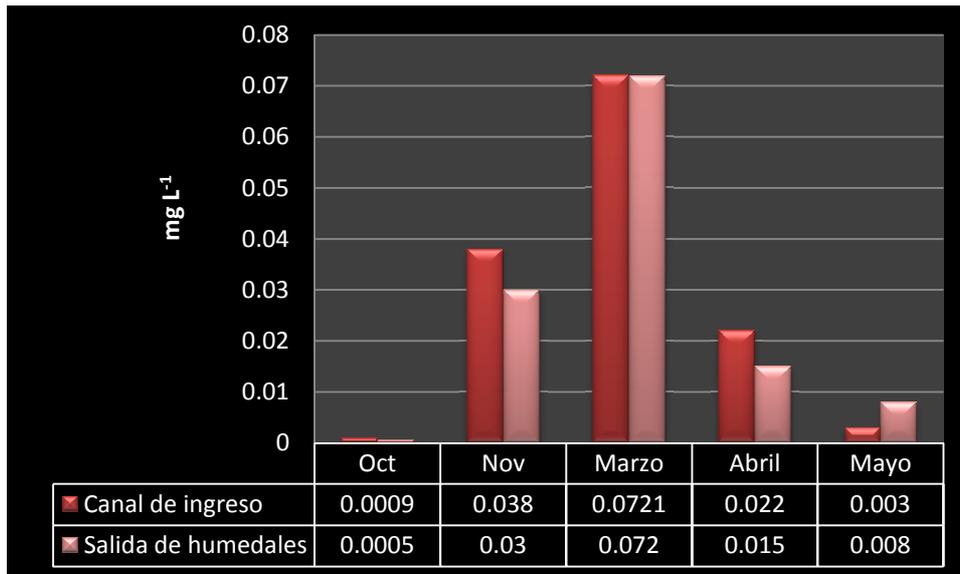
Los resultados indican que hay poca concentración de sólidos totales en todas sus formas y que el agua residual que proviene de la barranca Panacuale es de tipo doméstica.



**Figura 30. Sólidos Totales Volátiles (SVT)**

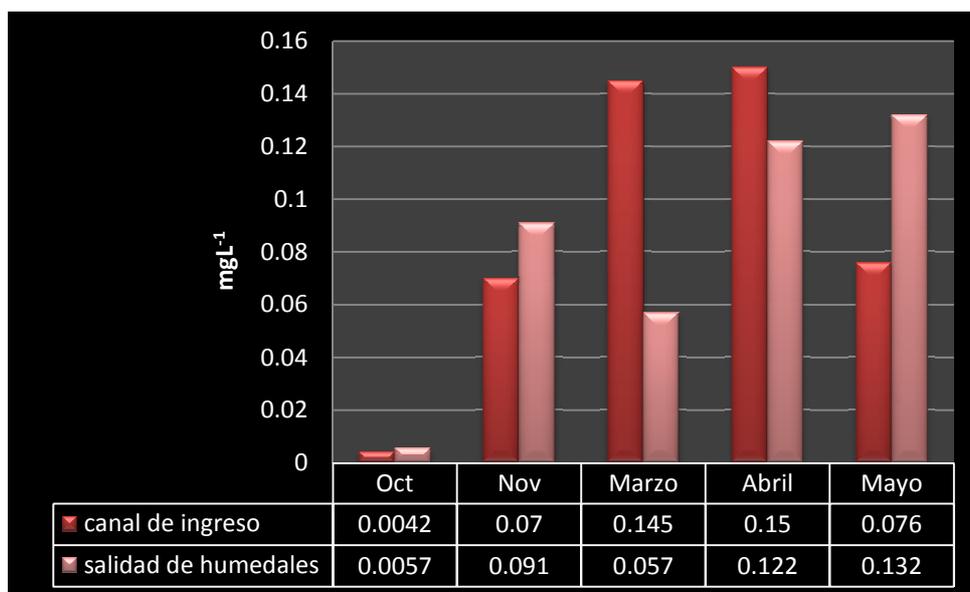
Los sólidos volátiles se realizan con la finalidad de conocer la cantidad de materia orgánica presente que se puede eliminar o volatilizarse cuando esta se quema en un horno mufla. La materia orgánica se convierte a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Los sólidos que no se volatilizan se denominan sólidos fijos (Tesillos y Ubaldo, 2007).

En la figura 30, se observa que los sólidos volátiles no presentan una alta concentración de contaminación por sólidos orgánicos en los diferentes muestreos lo que se aprecia es que los resultados son muy bajos ya que se esperaba encontrar un mayor contenido de sólidos volátiles porque el agua proviene de descargas municipales.



**Figura 31. Sólidos Suspendidos Totales (SST)**

Según la NOM-003-SEMARNAT-1997 el límite máximo permisible de sólidos suspendidos totales es de  $20 \text{ mgL}^{-1}$  para contacto directo y de  $30 \text{ mgL}^{-1}$  para contacto indirecto u ocasional. Los resultados revelan que los sólidos suspendidos totales están por debajo del límite máximo permisible de la NOM-003-SEMARNAT-1997 tanto en afluente como en el efluente, esto quiere decir que no presenta contaminación significativa de partículas flotantes o suspendidas en la columna de agua.



**Figura 32. Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

En la figura 32 se observa que las concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT) en todos los monitoreos fueron bajas, debido a que las aguas de la barranca Panacuale son de tipo doméstico y no contienen sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio, sodio, cloruros y sulfatos), que son características de aguas de origen industrial. También hay materia orgánica disuelta en el agua pero en pequeñas cantidades (OMS, 2003).

Los SDT y la conductividad eléctrica están estrechamente relacionadas cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad eléctrica. También la temperatura del agua afecta a la conductividad eléctrica de forma que su valor aumenta de 2 a 3 % por grado Celsius. Los análisis de los sólidos disueltos son importantes, como indicadores de la efectividad, de los procesos de tratamiento biológico y físico de aguas usadas ([www.lenntech.es/tdsyconductividad-electrica](http://www.lenntech.es/tdsyconductividad-electrica), 2012).

### Parámetros biológicos

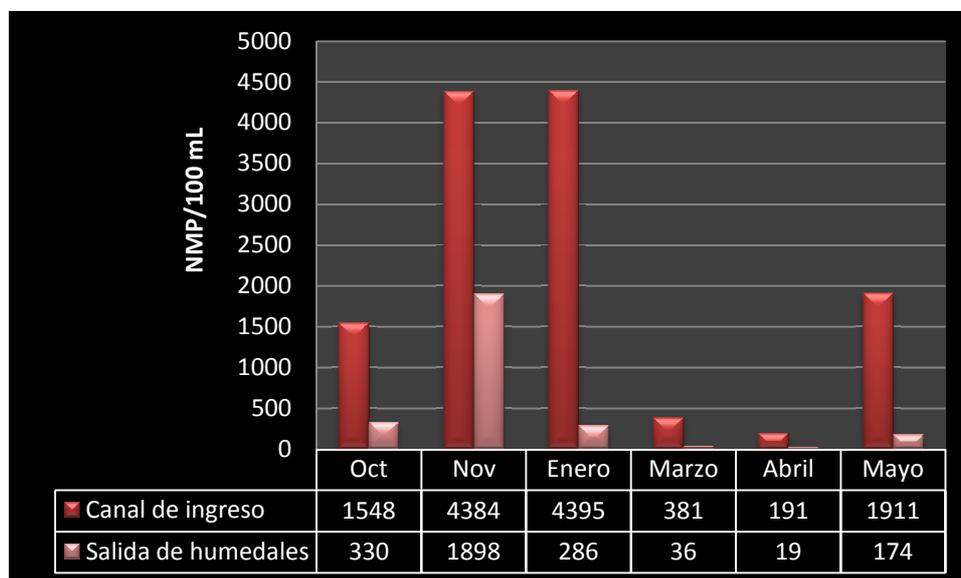


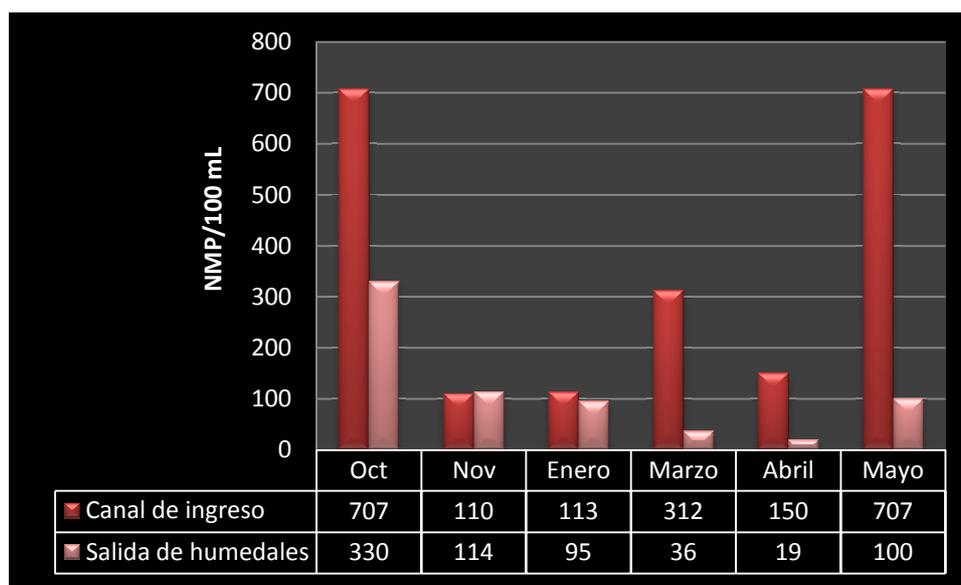
Figura 33. Coliformes totales

Los organismos coliformes totales son altos en canal de ingreso, según la NOM-003-SEMARNAT-1996 deben de ser 1000 para contacto indirecto en la mayoría de los meses de monitoreo, se presentó altas descargas de estos organismos. Esto se puede explicar debido a que los coliformes totales

albergan a todos los géneros: 1. *Escherichia* 2. *Klebsiella* 3. *Enterobacter* 4. *Citrobacter*.

Son bacterias que viven en plantas, suelo, animales y cuando caen en agua viven principalmente en la superficie (González, 2008). Todos estos géneros son capaces del crecimiento aerobio que va de  $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $37\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5$  en un medio líquido de lactosa, con producción de ácido y gas en un período de 48 horas (NMX-AA-042/1-SCFI-2008). No todos los coliformes son de origen fecal, por lo que es necesario desarrollar pruebas para diferenciarlos a efectos de emplearlos como indicadores de contaminación.

Se distinguen, por lo tanto, los coliformes que comprende la totalidad del grupo y los coliformes fecales aquellos de origen intestinal.



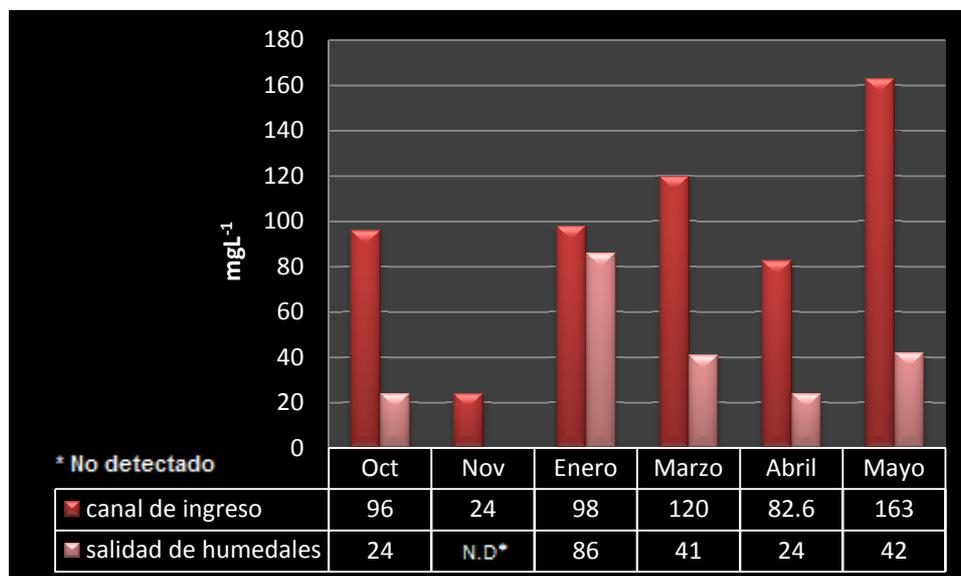
**Figura 34. Coliformes Fecales**

La figura 34, indica que los coliformes fecales a lo largo de seis monitoreos se redujeron en gran medida, alcanzando los límites máximos permisibles según la NOM-003-SEMARNAT-1996, que es de 240 NMP/100 mL para contacto directo; por lo que se puede decir que el sistema de humedales está funcionando de manera correcta. El único mes que superó el límite máximo permisibles fue octubre, tiempo en el que inició la instalación del humedal y aun

no era maduro. La adecuación del sistema se puede observar en el Anexo III (Álbum fotográfico).

Los resultados del efluente indican que disminuyeron los coliformes fecales, respecto a los que ingresaron a través del afluente, en octubre de 700 NMP/100mL a 330, en enero de 113 a 95 NMP/100mL, en marzo de 312 a 35 NMP/100mL, en mayo de 707 NMP/100 mL a 100, solamente en el mes de noviembre no hubo remoción.

Dentro del grupo de los coliformes totales existe un subgrupo que es el de los Coliformes fecales, organismos que comprenden principalmente *Escherichia coli* y algunas cepas de *Enterobacter* y *Klebsiella*. Su origen es principalmente fecal y por eso se consideran índices de contaminación fecal que se da por la presencia de *Escherichia coli* tipo I, debido a su origen. (NMX-AA-042/1-SCFI-2008).



**Figura 35. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

En la figura 35, se observa que los resultados de la DBO tanto en el afluente como en el efluente del sistema están por arriba del límite máximo permisible de la NOM-003-SEMARNAT-1997, ya que establece  $20 \text{ mgL}^{-1}$  para contacto directo y de  $30 \text{ mgL}^{-1}$  para contacto indirecto u ocasional. Los meses que se aproximan al cumplimiento de la norma son octubre y abril, sin embargo, los

meses de enero, marzo y mayo están por arriba del límite máximo permisible para contacto indirecto u ocasional.

El sistema de humedales disminuyó drásticamente la contaminación orgánica del agua residual proveniente de la barranca Panacuale, la población microbiana heterogénea oxidó la materia orgánica de las descargas municipales (NMX-AA-028-SCFI-2008). La disminución de materia orgánica a lo largo de los seis muestreos se debió a procesos físicos y químicos, ambos estrechamente inter-relacionados. En el proceso físico, la materia orgánica que llega al afluente puede encontrarse en forma de coloides, supracoloides o disuelta. Además, pueden darse procesos de adsorción y absorción de la materia orgánica disuelta, procesos que genéricamente se denominan procesos de 'sorción' y que están relacionados con las características superficiales del sólido o cuerpo sobre el que se producen.

En el proceso biológico intervienen organismos vivos (micro y macroscópicos) e influyen de manera drástica factores como la disponibilidad de oxígeno, el pH del medio, y la temperatura. En estos procesos se pueden dar reacciones de oxidación/reducción, hidrólisis y fotólisis, que conducen a la biodegradación de la materia orgánica.

La materia orgánica biodegradable sirve como sustrato a múltiples organismos para desarrollarse. La disponibilidad de oxígeno del afluente condiciona el tipo de microorganismos que intervienen en la degradación de la materia orgánica. Los microorganismos aerobios requieren oxígeno como aceptor de electrones disuelto para desarrollarse y son muy eficientes en la transformación de la materia biodegradable en compuestos minerales, gases, y biomasa microbiana. Por ello, las condiciones aerobias son más adecuadas para reducir la contaminación por materia orgánica, que las de anaerobiosis. Las reacciones de hidrólisis son fundamentales para transformar la materia orgánica sólida -en forma de partículas-, en compuestos orgánicos de más bajo peso molecular, que resultan más fácilmente atacables por microorganismos (Curt, 2011).

De acuerdo a la Escala de Clasificación de Demanda Bioquímica de Oxígeno (cuadro V) los resultados ubican la calidad del agua en la clasificación amarilla que es aceptable ( $6 < \text{DBO}_5 \leq 30 \text{ mgL}^{-1}$ ) estas aguas tienen como característica indicios de contaminación y son aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Pero también, los resultados en otros meses del año (enero, marzo, mayo) llevan a la clasificación naranja, esto quiere decir que el agua está contaminada y tiene una DBO que va de  $30 < \text{DBO}_5 \leq 120$ , lo que indica que son aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal

La DBO afecta al ciclo del nitrógeno ya que para que se lleve a cabo la nitrificación se tiene que remover la DBO, para esto se requieren condiciones aeróbicas (O.D), alcalinidad (pH) y temperatura adecuada, así los organismos nitrificantes puedan competir con los organismos heterótrofos por el oxígeno disponible. Una condición limitante para la nitrificación en los humedales es la disponibilidad de oxígeno (Lara, 1999).

Los resultados indican que son aguas residuales que provienen de residuos alimenticios, heces, material vegetal, sales minerales, materiales orgánicos y materiales diversos como jabones y detergentes sintéticos (Delgadillo *et al.*, 2010).

## X. Conclusiones

El agua de la barranca Panacuale tratada en el sistema de humedales construidos de flujo subsuperficial, cumple con los Límites Máximos Permisibles establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997, para servicios al público con contacto directo. Por lo que en el campamento de pesca deportiva Arcoíris se pueden realizar de forma segura actividades recreativas con contacto directo con el agua tratada. No así para DBO que presentó resultados entre (24-86)  $\text{mgL}^{-1}$ , cercanos al LMP (20  $\text{mgL}^{-1}$ ); en promedio, el comportamiento respecto a los meses de monitoreo indica que este LMP se alcanza cuando aumenta la temperatura ambiente.

Después de comparar los valores del afluente “barranca Panacuale” con la NOM-001-SEMARNAT-1997, los parámetros de temperatura, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, DBO, nitrógeno total, fósforo total y coliformes, cumplen con los límites máximos permisibles para descargas a bienes nacionales, no así para DQO.

Al ser sometido el afluente a tratamiento en el sistema de humedales construidos, todos los parámetros cumplen los Límites Máximos Permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996, para ser descargados en cuerpos superficiales y bienes nacionales.

De acuerdo a la NOM-003-SEMARNAT-1997, el efluente se puede reusar en riego agrícola y para uso público urbano, así como en servicios al público con contacto directo principalmente llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí.

“Arcoíris Sport Fishing” puede reusar el agua tratada en el lago ya que cumple con la normatividad nacional para reuso en servicios al público (NOM-003-SEMARNAT-1997), Así como con las escalas de clasificación de la CONAGUA, debido al tratamiento con humedales y monitoreos que ello implica, se conoció y mejoró la calidad.

## **XI. Recomendaciones y sugerencias**

El agua tratada en el sistema de humedales puede venderse para su reúso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional.

Puede emplearse en las siguientes actividades: riego de jardines y camellones en autopista y avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, barreras hidráulicas de seguridad y panteones, además de usos industriales y de servicios (lavado de patios y nave industrial, lavado de flota vehicular, sanitarios, cortinas de agua). Así como usos únicamente de ornato (lagos en campos de golf y parques).

Se pueden comercializar las plantas de ornato que se encuentran en el humedal.

## XII. Bibliografía

1. Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) (2007) Agua para todos. El Salvador.
2. Albert, P. L. A. (1997). Nitratos y nitritos Capítulo 17. Sociedad Mexicana de Toxicología. México.
3. American Society for Testing and Materials, (1991). Manual de aguas para usos industriales. 3ª ed. Ed. Limusa. México.
4. APHA, (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19a. Ed. American Public Health Association. E.U.A.
5. Arreguín, C. F. I. Moeller C. G. Escalante E. V. Rivas H. A. (1999). Hacia la calidad: necesidad para el próximo milenio. El reuso del agua en México.
6. Arteaga, M.J.R. (2011) Grupo Cultural Tlathui, Tipos de Contaminación del Agua. Toluca. México.
7. Camacho B. E. *et al*, (2000). Guía para el cultivo de trucha. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México.
8. Centro Virtual de Información del Agua. (CVIA), (2009). El Agua; Agua en México; Datos y Cifras. México.
9. Cervantes, S. A., (1988). Manual de Técnicas Básicas para el Análisis de Ambientes Acuáticos 7º semestre Biología. FES Zaragoza UNAM. México.
10. Chavarría, H. J. C., (2001). Humedales artificiales de flujo vertical: estado del arte y propuestas experimentales para la obtención de parámetros de diseño. México.
11. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, (CONANP), (2012). Fábrica de Agua de la región más poblada de México. Fauna del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. México.
12. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2010a). Estadísticas del Agua en México, edición 2010. 10 años de presentar al agua en cifras. México.
13. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2010b). Indicadores de calidad del agua. México.

14. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2007). Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua. Muestreo y preservación de parámetros físico-químicos. México.
15. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2009). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. México.
16. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2011). Estadísticas del Agua en México, Edición 2011. México.
17. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (2012). AICA 223. Volcanes Iztaccíhuatl Popocatepetl. Categoría 1999. Mex-1.
18. Croat, T.B. y M. Carlsen, 2003. Araceae. En: Rzedowski, G. C. de y J. Rzedowski (eds.). Flora del Bajío y de regiones adyacentes. Fascículo 114. Instituto de Ecología-Centro Regional del Bajío. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán, México.
19. Curt F, M, M. D. (2011). Capítulo 5: Fitodepuración en Humedales. Conceptos Generales. España.
20. Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L, F., Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Editorial centro andino para la gestación y uso del agua (Centro agua). Bolivia
21. Echarri, L. (1998). Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Ed. Teide. España.
22. Environmental Protection Agency EPA. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial, E.U.A.
23. Fondo de Población de las Naciones Unidas (FNUAP), (2001). El estado de la población mundial Huellas e hitos: población y cambio del medio ambiente. E.U.A.
24. Fondo Nacional del Ambiente, (FONAM), (2010). Oportunidades de mejoras ambientales por el tratamiento de aguas residuales en el Perú. Perú.

25. Gambrell, R.P and Patrick, W.H. 1978. Chemical and microbiological properties of anaerobic soils and sediments: En Plant life in anaerobic environments. Ed. D.D. Hook and R.M.M. Crawford. Ann Arbor, E.U.A.
26. García, E. (1998). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
27. García, S. J., Corzo H, A., (2008). Depuración con humedales construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. España.
28. Gonzales, R. N. (2008). Contaminación microbiológica en el agua de la escuela secundaria n°18. Aguascalientes, México.
29. Goyenola, G. (2007). Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Versión 1.0.
30. Grupo de Estudios de Ingeniería Ambiental (GEIA), (2010). U.T.N. II. Anexo IX. Aguas Residuales y Tratamiento de Efluentes Cloacales. Argentina.
31. Ingenieros Civiles y Asociados. ICA, A.C. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. México.
32. Instituto de Geografía, UNAM, (2001a). Atlas Nacional de México. Vol. II. Instituto de Geografía, UNAM Divisiones florísticas. Escala 1:8000000. México.
33. Instituto de Geografía, UNAM, (2001b). Atlas Nacional de México. Vol II. Instituto de Geografía, UNAM. Provincias herpetofaunísticas. Escala 1:8000000. México.
34. Instituto de Geografía, UNAM, (2001c). Atlas Nacional de México. Vol. III. Instituto de Geografía, UNAM. Regiones y Provincias Mastogeográficas. Escala 1:4 000000. México.
35. Instituto Geológico y Minero de España. (IGME), (1995) Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Nuevas Tecnologías para el Saneamiento. depuración y reutilización de las aguas residuales en la provincia de alicante. España.
36. Instituto Nacional de Ecología (INE), (2007). Problemas de Calidad del Agua en México. México.

37. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2009). Estadísticas a propósito del día mundial del agua; datos nacionales. México.
38. Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI) (2011). Catálogo General de Localidades. México.
39. Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (2010a). Anuario Estadístico de Puebla. Tomo 1. México.
40. Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (2010b). Enciclopedia de los Municipios de México. Tlhuapan, Puebla. México.
41. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI), (2012). Sistema Estatal y Municipal de Bases de Datos. México.
42. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED), (2009). Enciclopedia de los municipios Santa Rita Tlhuapan. México.
43. Jiménez, J. R. (2002). Agua de Mayor Calidad. Rev. Agua Potable. México. 51:4, 34-41.
44. La Motte company (2010). Oxígeno Disuelto. Kit para ensayo de agua Manual de Instrucciones. Maryland, E.U.A.
45. Laboratorio de Proyectos Ambientales. L3-PB-05, (2012). FES Zaragoza. UNAM. Biología. Imagen. México.
46. Lara, B. J. A. (1999). Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental. España.
47. León, L. F. (1991). Índice de Calidad del Agua, ICA. Inf. # SH-9101/01. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
48. Marcano, J. (2012) Educación Ambiental, Glosario de Términos Ambientales, Elementos de Ecología. República Dominicana
49. Márquez, L, J, L., Nevárez, M, G, V., Dávila, S, A., Rivera, CH, E., González, R, O. (2008). Efecto de la formación de biopelículas en la resistencia de bacterias aisladas de especímenes clínicos. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Chihuahua. México.

50. Medellín, R, A., Abreu-G, A., Del Coro, A, M., Mellink, E., Ruelas, E., Santana, C, E., Urbán, J. (2009). Conservación de especies migratorias y poblaciones transfronterizas, en Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO, México.
51. Mejía-Sáens. E., Palacios, A., García, E y Santos, A. (2002). Problemas operativos en el manejo del agua en distritos de riego. Terra Latinoamericana, México. 20:217-225.
52. Metcalf- Eddy. (1981), tratamiento y depuración de las aguas residuales 2ª edcion. Ed. Labor. España.
53. Moroco, Ch, D. (2013). Ciclo del nitrógeno. Universidad peruana unión. Facultad de ingeniería y arquitectura. Ingeniería ambiental. Perú.
54. Moscoso, M., García, E., Lopez, R., (2006). Biofilm formation by *Streptococcus pneumoniae*: role of choline, extracelular DNA, and capsular polysaccharide in microbial accretion. J. Bacteriol. 188,7785-7795.
55. Noailles, R, L, V. (1980). Plantas mediterráneas. Ed. Floraprint. España.
56. Organización de las Naciones Unidas-Agua (ONU-AGUA) (2010). Decenio internacional para la acción 'El agua fuente de vida' 2005-2015, La escasez del agua. E.U.A.
57. Organización Mundial de la Salud (OMS) (2003). Total dissolved solids in drinking-water. Suiza.
58. Pacheco, A, J., Pat, C, R., Cabrera, S, A. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. México.
59. Ramírez, C. J. M. (2006). Detergentes orgánicos sintéticos y ambiente. México.
60. Ramsar Convención de Humedales (1971). Definición de humedales y Sistema de Clasificación de Tipos de humedales de la Convención de Ramsar, Irán.
61. Rodríguez, A. R. Fernández. A.P. Letón G.R. (2006). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Universidad de Alcalá; Universidad Rey Juan Carlos. España.

62. Romero, R. J. A. (2000). Calidad del agua. 2ª edición. Ed. Alfa omega. México.
63. Romero, A. M., Colín C. A., Sánchez S. E., y Ortiz H. Ma. L. (2009) Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Rev. Int. Contam. Ambient. 25 (3) 157-167.
64. Ros, M. A. (2011). El Agua. Calidad y Contaminación. Parámetros Químicos de Calidad de las Aguas. Nitritos, Nitratos y Fosfatos. España.
65. Sánchez de F. J. 2001. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. V-100 - El fósforo, parámetro crítico de calidad de agua técnicas analíticas y de muestreo. Venezuela.
66. Sección Mexicana del Consejo Internacional para la Preservación de las Aves CIPAMEX. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad CONABIO, (2001). Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves. Escala 1:250000. México.
67. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-003-SCFI-1980, (Aguas residuales. Muestreo, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de marzo de 1980).
68. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-014-SCFI-1980 (Cuerpos receptores. Muestreo, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de septiembre de 1980).
69. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NOM-AA-039-SCFI-2001. Análisis de aguas, Determinación de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Diario Oficial de la Federación, 1 de agosto de 2001. México.
70. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). (2008). NMX-AA-042/1-SCFI-2008. Análisis de Agua. Detección y Enumeración de Organismos Coliformes, Organismos Coliformes Termotolerantes y *Escherichia coli* Presuntiva. Diario Oficial de la Federación, 30 de Noviembre de 2005. México.
71. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). (2008). NMX-AA-028-SCFI-2008. Análisis de agua. Determinación de Demanda

- Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales, residuales (DBON) y residuales tratadas. Método de prueba parte 1: dilución y método de siembra mediante adición de alitiourea. Diario Oficial de la Federación, 08 de Septiembre de 2009 México.
- 72.** Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. SCFI NMX-AA-099-SCFI-2006. Análisis de Agua. Determinación de Nitrógeno de Nitritos en Aguas Naturales y Residuales. Diario Oficial de la Federación 21 de Agosto de 2006. México.
- 73.** Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. SCFI NMX-AA-034-SCFI-2001. Determinación de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas. Diario Oficial de la Federación, 01 de Agosto de 2001. México.
- 74.** Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. SCFI NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de aguas. Determinación de Nitratos en Aguas Naturales, Potables, Residuales y Residuales Tratadas. Diario Oficial de la Federación 13 de Agosto de 2001. México.
- 75.** Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, (1996). Norma Oficial Mexicana. NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, 30 de Octubre de 1996. México.
- 76.** Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, (1997). Norma Oficial Mexicana. NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación, 22 de Abril de 1998, México.
- 77.** Secretaría de pesca, (1994). Colección nacional de manuales de capacitación pesquera. Cultivo de *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris) México.
- 78.** Secretaría de Servicios Parlamentarios (2012). Ley de Aguas Nacionales Diario Oficial de la Federación, 08 de Junio de 2012, México.

79. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), (2006). Planes Estatales de Educación, Capacitación y Comunicación Ambientales. Compilación, Volumen 2; México.
80. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, (2002). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. 4: agua. Calidad del agua. México.
81. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, (2000). Índice de Calidad del Agua ICA. México.
82. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, (2010). Funciones de la SEMARNAT. México
83. Sotomayor, J, C., Lijo, A. (2009) Estudios y Servicios Petroleros S.R.L.A. Nota Técnica N° 49. ¿Cómo Funcionan los Químicos? Parte 2: Para la Fase Acuosa. Tratamientos de Bacterias. Argentina.
84. Tesillos, M. C. y Ubaldo, A. R. E., (2007). Programa preliminar de diseño de humedales artificiales de flujo horizontal, para emplearse como sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas. México.
85. Torres, E. J. N., (2005). Eficiencia de remoción de materia orgánica, nutrientes y bacterias en un sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de humedales artificiales. México.
86. Valencia, J. (2006). El agua en México. Talleres de Grupo Impresor México.
87. Vargas, H. J.J. (2003). Estado de la diversidad biológica de los árboles y bosques en el Norte de México. Documentos de Trabajo: Recursos Genéticos Forestales. FGR/60S. Servicio de Desarrollo de Recursos Forestales, Dirección de Recursos Forestales, FAO, Roma. (Inédito).
88. Vega, L, A., Álvarez, T, A., (1992). La Herpetofauna de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl. Laboratorio de cordados terrestres. Departamento de Zoología México.
89. Vivas, Y., Velasco A., Casas J., Rengifo E. (2006). Humedales Artificiales como Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas, Cauca. Cauca 25:32-41.

90. Winkler, A.M, (2000). Tratamiento biológico de aguas de desecho. Ed. Limusa, S. A. de C.V. Mexico.
91. Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH. (WTW). (2011). Mediciones de fosfato. Weilheim, Alemania.
92. World Resources Institute, (WRI), (2000). Pilot analysis of global ecosystems: freshwater systems. E.U.A.
93. Zúñiga, J. (2004). Influencia del soporte y tipo de macrófita en la remoción de la materia orgánica y nutrientes en humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. (Tesis magistral). Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

## XII.I Mediografía

1. Arcoíris Sport Fishing (2012). La Casa de la Trucha Feroz. Recuperado de <http://www.arcoiris.com.mx/index.html> (Consultado: 8 de Septiembre de 2012).
2. Calidad del agua. (2012). La conductividad eléctrica del agua. Recuperado de <http://www.smart-fertilizer.com/articulos/conductividad-electrica> (Consultado 22 de Noviembre de 2012).
3. Conductividad y Sólidos Disueltos (2012). Recuperado de <http://www.reitec.es/V2/Pdf/agua01.pdf> (Consultado: 10 de Noviembre de 2012)
4. Enfermedades transmitidas por el agua residual. (2007) Recuperado de <http://www.excelwater.com>, 2007. (Consultado 15 de Abril de 2012).
5. Funciones de la secretaria. Recuperado de <http://www.semarnat.gob.mx/conocenos/Paginas/Quehacemos.aspx> (Consultado: 28 de Junio de 2012).
6. Google Earth. (2012). Recuperado de <http://www.google.com/intl/es/earth/learn/> (Consultado 11 Noviembre de 2012).
7. Nitrógeno en el agua (2002). Recuperado de [http://www.ambientum.com/revista/2002\\_05/NTRGNO1.asp](http://www.ambientum.com/revista/2002_05/NTRGNO1.asp). (Consultado: 22 de Noviembre de 2012)

8. Oxígeno disuelto ¿Por qué es importante el oxígeno disuelto en el agua? (2012) Recuperado de <http://www.lenntech.es/por-que-es-importante-el-oxigeno-disuelto-en-el-agua.htm#ixzz1nqBOn8vI> (Consultado 20 mayo 2012)
9. pH y Alcalinidad. Medida de calidad de agua: el pH. (2012) Recuperado de <http://www.lenntech.es/ph-y-alcalinidad.htm> (Consultado 15 de Abril de 2012).
10. Sistemas de Depuración Natural. Tecnología para la depuración sostenible del agua residual. (2011). Recuperado de: <http://www.depuranatura.org>. (Consultado 5 de Mayo de 2012)
11. Sólidos Disueltos Totales y Conductividad Eléctrica. (2012). Recuperado de <http://www.lenntech.es/calculadoras/tds/tdsyconductividad-electrica.htm> (Consultado 13 de Septiembre de 2012)
12. Solución de tratamientos del agua. FAD-Contaminantes del agua, (2012). Recuperado de <http://www.lenntech.es/faq-contaminantes-del-agua.htm#ixzz1pu97XY8K> (Consultado 30 de Octubre de 2012).
13. Marsilli. A. (2005). Tratamiento de Aguas Residuales. Recuperado de: <http://www.tierramor.org/Articulos/tratagua.htm> (Consultado 15 de Febrero de 2012).
14. Tratamiento y purificación del agua. Conductividad del agua, (2012). Recuperado de: <http://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm#ixzz1tqkmvK6d> (Consultado 20 de Noviembre de 2012).
15. Club de pesca deportiva “Arcoíris Sport Fishing”, (2012). Recuperado de: <http://www.arcoiris.com.mx/index.html> (Consultado 17 de Mayo de 2013).
16. Listado alfabético por familia/género/especie, (2013). Recuperado de: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/araceae/zantedeschia-aethiopica/fichas/pagina1.htm> (Consultado 25 de junio de 2013).
17. Especies invasoras peces. *Oncorhynchus mykiss*, (2011). Recuperado de: [http://www.conabio.gob.mx/invasoras/index.php/Especies\\_invasoras\\_-\\_Peces](http://www.conabio.gob.mx/invasoras/index.php/Especies_invasoras_-_Peces) (Consultado 25 de junio de 2013).

### XIII. ANEXOS

#### XIII.1 ANEXO I. PROCEDIMIENTOS ANALÍTICOS

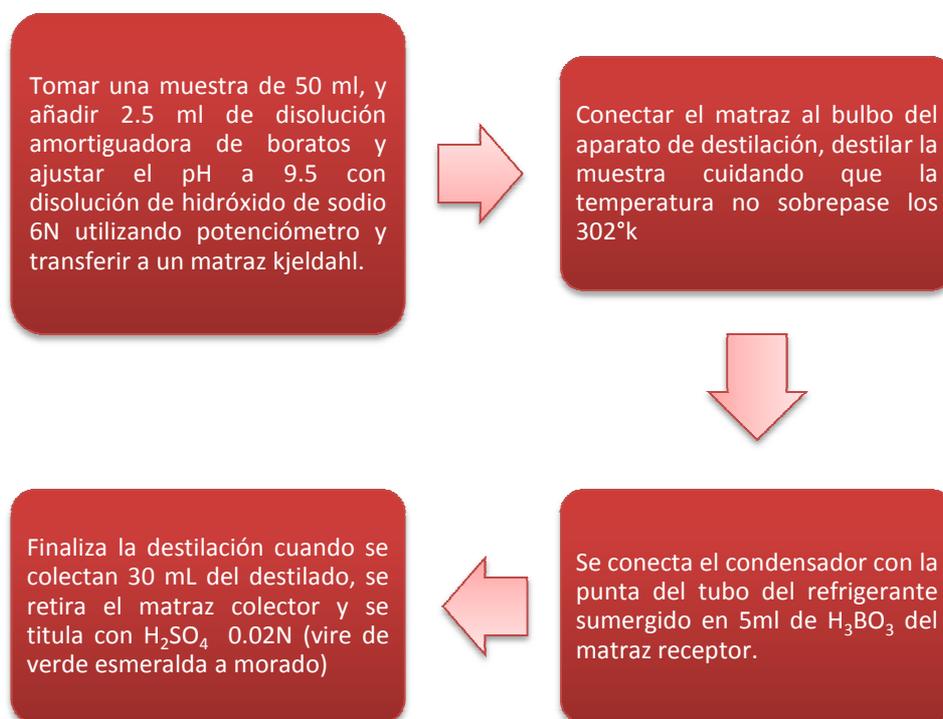
##### 1. DETERMINACIÓN DEL AMONIACO (N-NH<sub>3</sub>)

###### Principio del método

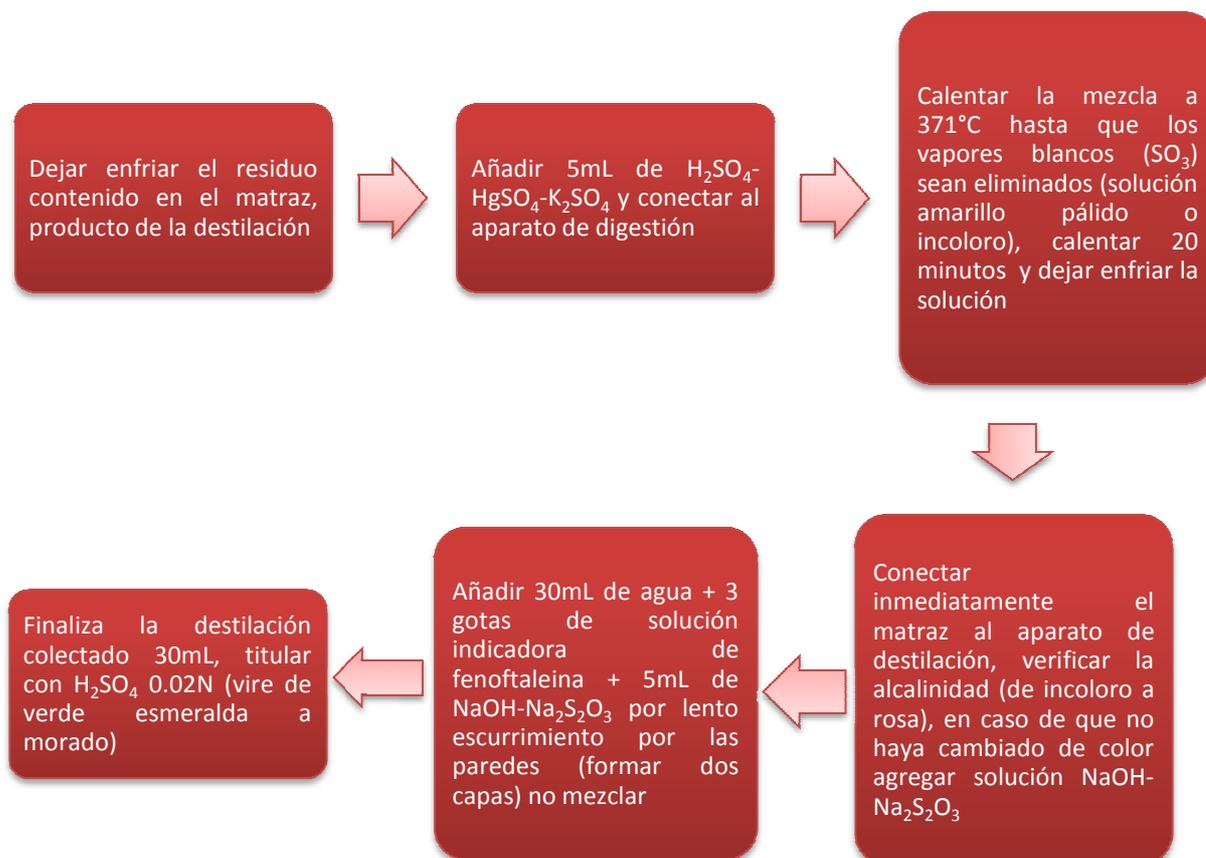
En el método Kjeldahl los compuestos nitrogenados de la muestra se descomponen con ácido sulfúrico concentrado en caliente, transformándose el nitrógeno de la mayoría de los grupos funcionales orgánicos en amonio. Cuando la descomposición se ha completado la disolución se enfría, se diluye y se alcaliniza con hidróxido de sodio concentrado. El amoniaco liberado se destila y se adsorbe en una disolución de concentración conocida de ácido bórico. Los grupos amino y amido se convierten cuantitativamente a ión amonio. Sin embargo, los grupos nitro, azo o azoxi generan en las mismas condiciones, otros productos nitrogenados (N<sub>2</sub> u óxidos de nitrógeno).

##### MÉTODO KJELDAHL

###### Procedimiento



## MÉTODO KJELDAHL PARA N-Org



### Interferencias

1. Nitratos: Durante la digestión, el nitrato en concentraciones por arriba de  $10\text{ mgL}^{-1}$  puede oxidar parte del amoníaco liberado produciendo  $N_2O$  y dando lugar a una interferencia negativa. Cuando se encuentre presente materia orgánica reductora, el nitrato puede reducirse a amoníaco, resultando una interferencia positiva.
2. Durante la digestión, puede haber pérdidas de nitrógeno por pirólisis.
3. Materia orgánica: Durante la digestión, el  $H_2SO_4$  oxida la materia orgánica a  $CO_2$  y  $H_2O$ . Si estuviera presente una gran cantidad de materia orgánica, se consume mucho ácido, aumentar la proporción de sal-ácido y aumentar la temperatura de digestión.
4. Dado que los reactivos pueden contener trazas de amoníaco, trate el blanco de reactivos igual que las muestras.

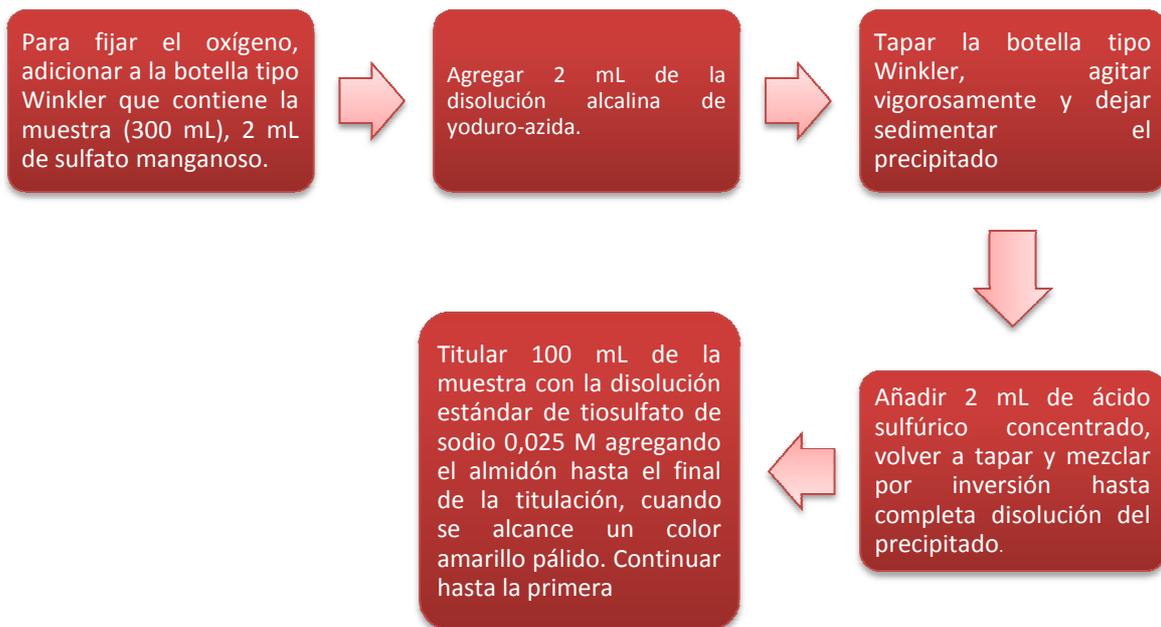
## 2. DETERMINACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO (O<sub>2</sub>)

### Principio del método

En el método de la azida de sodio se adiciona una disolución de manganeso divalente y una disolución alcalina yoduro-azida de sodio a una muestra de agua contenida en un frasco de vidrio que debe permanecer cerrado. El oxígeno disuelto (OD), oxida al hidróxido de manganeso disuelto, en cantidad equivalente, para producir un precipitado de manganeso con valencia más alta. Se acidifica la muestra y los iones yoduro reducen al manganeso a su estado divalente produciéndose yodo equivalente al contenido de OD original. El yodo se titula con una disolución normalizada de tiosulfato de sodio. El punto final de la valoración se detecta visualmente con un indicador de almidón.

### MÉTODO IODOMÉTRICO

#### Procedimiento



#### Interferencias

Este método se aplica especialmente en muestras que no contengan más de 50 mg de nitritos por litro (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>L<sup>-1</sup>) y no más de 1 mg de fierro por litro (Fe<sub>2</sub><sup>+</sup>L<sup>-1</sup>). Las condiciones que afectan el análisis son:

1. Introducción de burbujas de aire en la muestra.
2. Presencia de sustancias oxidantes o reductoras.

### 3. DETERMINACIÓN DE COLIFORMES TOTALES Y FECALES

#### Principio del método

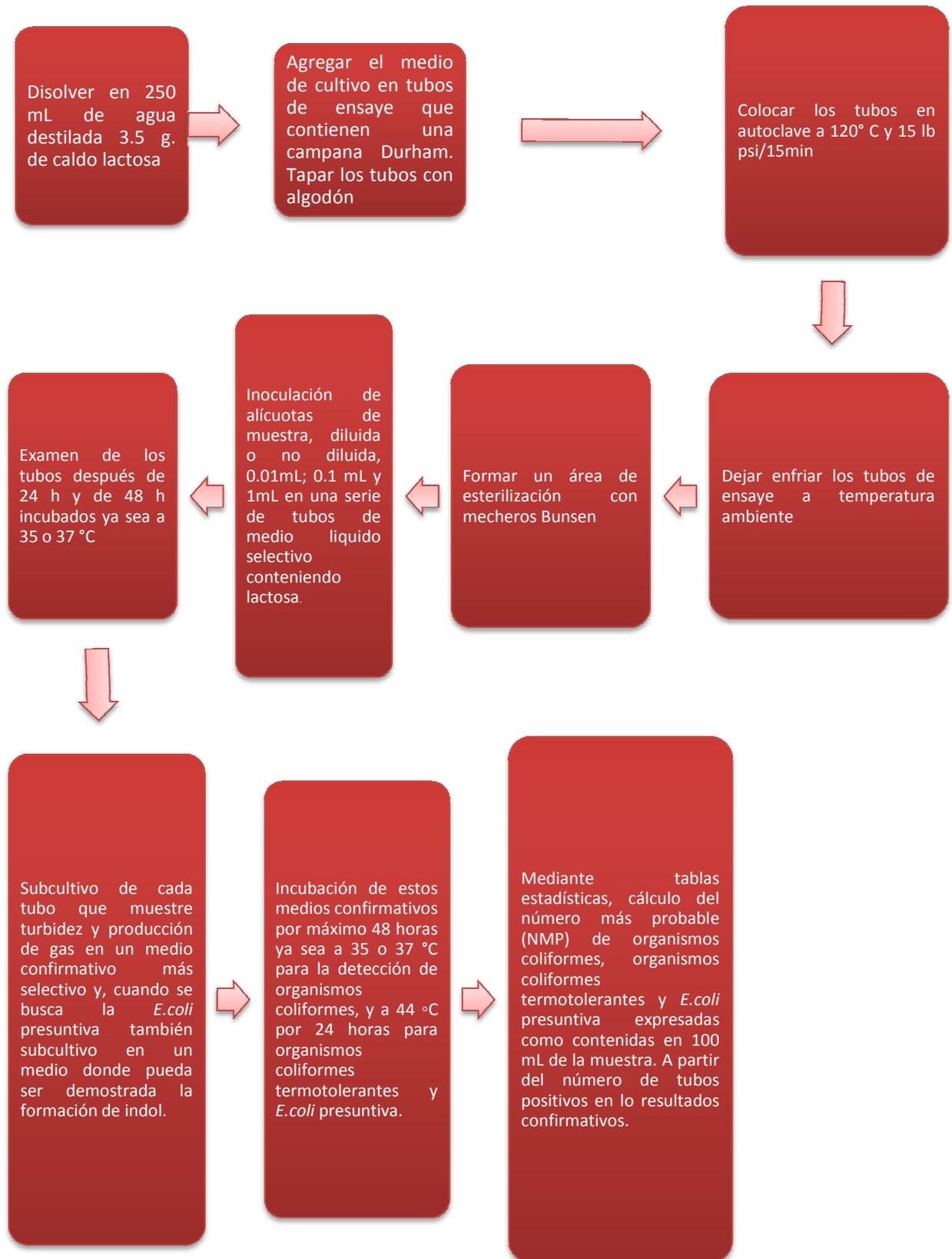
El método se basa en la inoculación de alícuotas de la muestra diluida o sin diluir, en una serie de tubos de un medio de cultivo líquido conteniendo lactosa. Los tubos se examinan a las 24 y 48 horas de incubación ya sea de 35 a 37°C. Cada uno de los que muestren turbidez con producción de gas se resiembran en un medio selectivo para confirmación.

Se lleva a cabo la incubación de estos medios selectivos hasta por 48 horas a 35-37 °C para la detección de organismos coliformes y por 24 horas a  $44.0 \pm 1$  °C para organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *E. coli*.

Mediante tablas estadísticas, se lleva a cabo el cálculo del número más probable (NMP) de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *E. coli* que puedan estar presentes en 100 mL de muestra a partir del número de tubos que den resultados confirmativos positivos.

## MÉTODO DE TUBOS MÚLTIPLES DE FERMENTACIÓN PARA CT

### Procedimiento



## Interferencias

Colocar en el material de muestreo, previo a la esterilización, 0.1 mL de solución de tiosulfato de sodio al 10% con el propósito de inhibir la acción del cloro que puede contener la muestra.

## 4. DETERMINACIÓN DE NITRATOS ( $\text{NO}_3^-$ )

### Principio del método

El ácido fenoldisulfónico reacciona con el nitrato en ausencia de agua para formar un nitroderivado, que en medio alcalino es alterado ligeramente para producir un compuesto de color amarillo, presentándose un principio colorimétrico. La intensidad del color amarillo producido en la reacción es proporcional a la concentración de nitrato presente en la muestra, permitiendo su análisis por espectrofotometría visible, calculando la concentración de  $\text{NO}_3^-$  en la muestra por comparación relativa con soluciones de concentración conocida.

### MÉTODO DEL ÁCIDO FENOLDISULFÓNICO

#### Procedimiento



## Interferencias

El cloruro interfiere seriamente en la determinación, por lo que si una muestra contiene más de  $30 \text{ mgL}^{-1} \text{ Cl}$ , se agregan 5 gotas de sulfato de plata al 5% para precipitar el  $\text{Cl}^-$  como  $\text{AgCl}$ , removiendo el  $\text{AgCl}$  por filtración.

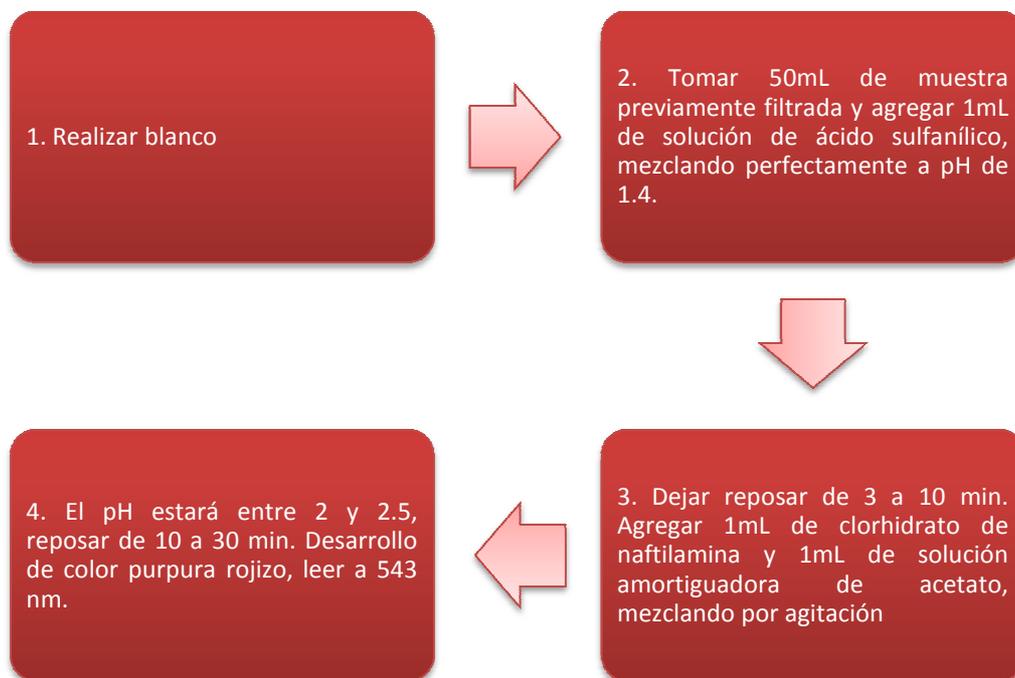
## 5. DETERMINACIÓN DE NITRITOS ( $\text{NO}_2^-$ )

### Principio del método

El principio del método consiste en que los nitritos presentes reaccionan en medio ácido ( $\text{pH} = 1,9$  a  $2,5$ ), para formar ácido nitroso que reacciona con la sulfanilamida por una reacción de diazoción para formar una sal de diazonio, la cual por copulación con el diclorhidrato de N-(1-Naftil) etilendiamina forma un colorante azóico de color purpura rojizo que se mide espectrofotométricamente a  $530 \text{ nm}$ .

### MÉTODO DEL ÁCIDO SULFANÍLICO

#### Procedimiento



#### Interferencias

Por su propiedad de precipitación en las condiciones de la prueba interfieren los iones siguientes: férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), mercuroso ( $\text{Hg}^+$ ), plata ( $\text{Ag}^+$ ), bismuto ( $\text{Bi}^+$ ), antimonioso ( $\text{Sb}^{3+}$ ), plomo ( $\text{Pb}^{2+}$ ), aúrico ( $\text{Au}^{3+}$ ), hexacloroplatinato ( $\text{PtCl}_6^{2-}$ ) y metavanadato ( $\text{VO}_3^{2+}$ ). Interfieren el método ciertas sustancias frecuentemente encontradas en muestras de agua, principalmente: cloraminas, tiosulfatos, polifosfatos de sodio, entre otras.

## 6. DETERMINACIÓN DE POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

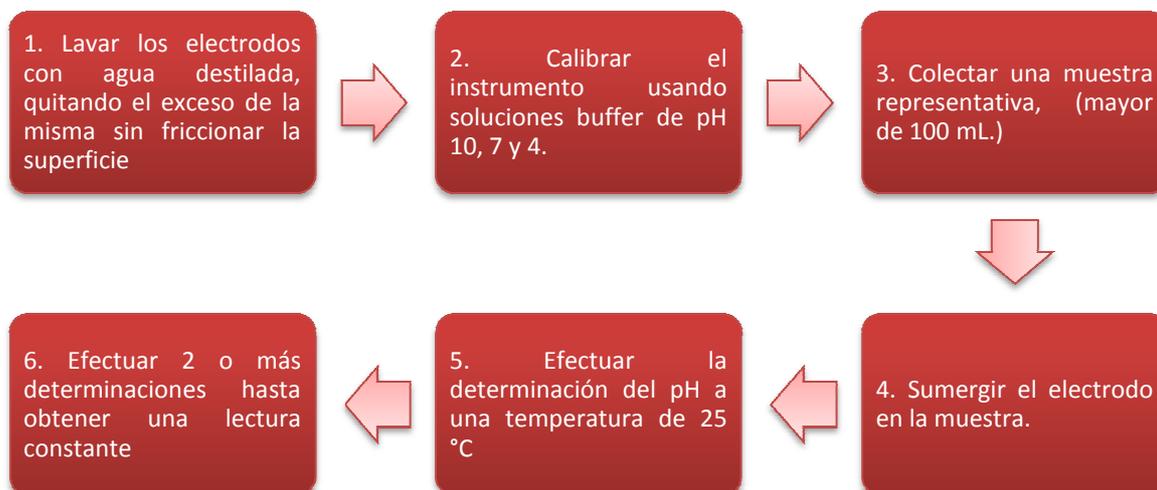
### Principio del método

El método se fundamenta en la existencia de una diferencia de potencial entre las dos caras de una membrana de vidrio, expuestas a disoluciones acuosas que difieren en su valor de pH. En primera aproximación, a temperatura constante, la magnitud de esta diferencia de potencial es directamente proporcional a la diferencia de pH entre dichas disoluciones. Debido a que el electrodo de vidrio y los electrodos de referencia comerciales tienen un comportamiento imperfecto, es preciso calibrar el dispositivo de determinación del pH con dos disoluciones patrón. Para ello, se sumergen los electrodos sucesivamente en dos disoluciones patrón operacional de pH, P1 y P2, a la misma temperatura que la disolución problema y seleccionadas de forma que el pH esperado para la disolución problema, pH(X), satisfaga la relación:

$$\text{pH (P1)} < \text{pH (X)} < \text{pH (P2)}.$$

### MÉTODO POTENCIOMÉTRICO

#### Procedimiento



#### Interferencias

1. Cuando la muestra de agua tenga una concentración alta de iones sodio (pH arriba de 10) se debe tener cuidado, ya que los electrodos ordinarios de vidrio pueden producir lecturas erróneas, por lo cual el aparato debe estar provisto de

un diagrama de "corrección de sodio", o bien, se pueden utilizar electrodos especiales.

2. Las grasas y aceites pueden interferir con la respuesta de los electrodos, por lo que se recomienda lavarlos con agua jabonosa y posteriormente con solución de ácido clorhídrico (1+9).

3. La temperatura, algunos gases y materiales orgánicos interfieren con la medición de pH. Es necesaria la limpieza regular de los electrodos.

(NMX-AA-008-SCFI-2001).

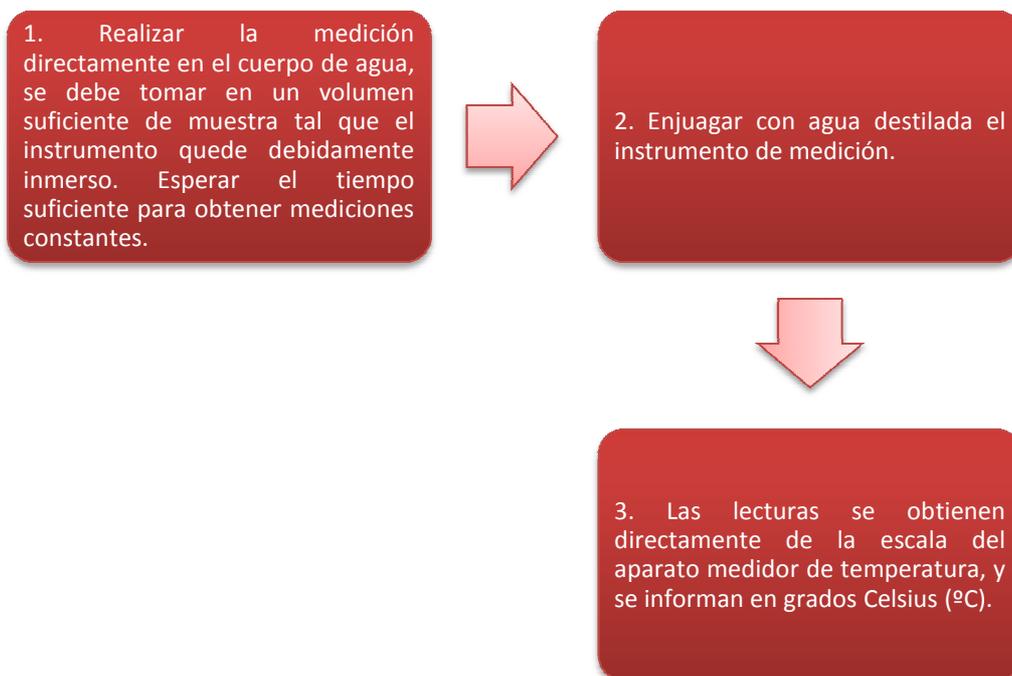
## 7. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA (T) *IN SITU*

### Principio del método

El principio se basa en las propiedades de la materia de dilatarse o contraerse con los cambios de temperatura ó a propiedades eléctricas y físicas de los materiales con los que se realizará la medición; estas propiedades son siempre las mismas para una temperatura dada lo que permite graduar los instrumentos de medición. La temperatura se mide con un instrumento debidamente calibrado y debe efectuarse en el lugar de muestreo.

### MÉTODO VISUAL CON TERMÓMETRO

#### Procedimiento



## Interferencias

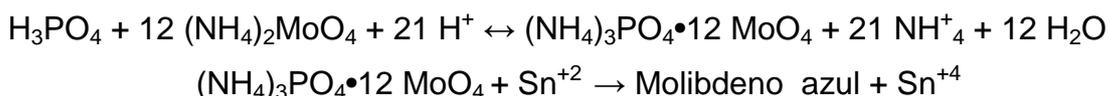
Precauciones y recomendaciones relativas al uso de los termómetros de líquido en vidrio.

1. Error de paralaje: El error de paralaje puede eliminarse si se tiene cuidado que la escala graduada del termómetro pueda observarse por reflexión sobre la columna de mercurio dentro del capilar. Para ello, el observador ajusta el nivel de su ojo sobre una línea de lectura, de forma que la graduación más cercana del menisco se superponga exactamente a su propia imagen reflejada por el Mercurio.
2. Durante el transporte de los termómetros, puede ocurrir una ruptura de la columna del líquido en el capilar o aún el paso del gas de relleno hacia el bulbo.
3. Cuando un termómetro se ha sometido a calentamiento extremo se requiere dejar el termómetro durante 72 h a la temperatura ambiente antes de realizar una verificación del punto del hielo fundente. Un sobrecalentamiento del termómetro a una temperatura que rebase el límite superior de las graduaciones puede provocar un cambio permanente de la capacidad del bulbo que se detecta por verificación del punto del hielo fundente.

## 8. DETERMINACIÓN DE FÓSFORO ORTOSOLUBLE

### Principio del método

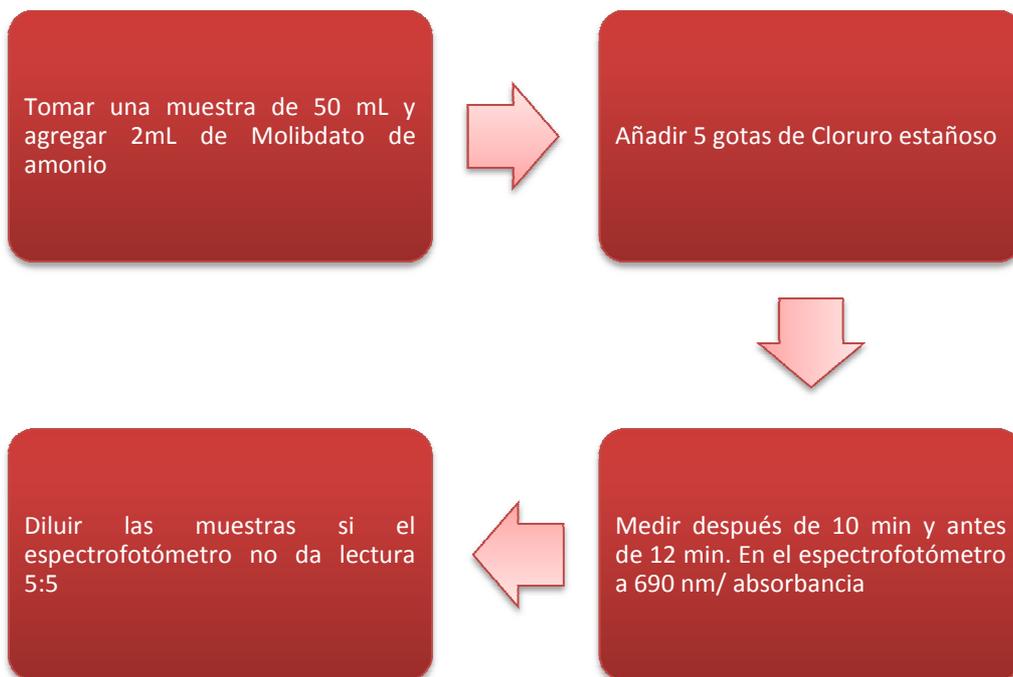
Los ortofosfatos solubles se transforman en un complejo colorido de fosfomolibdato por reacción con el molibdato de amonio en medio ácido. Presentándose una coloración azul, que se incrementa en forma proporcionalmente a la cantidad de ortofosfatos presente en la muestra, después de que el molibdeno reacciona con un agente reductor que generalmente es el cloruro estañoso. Efectuándose las siguientes reacciones



La intensidad del color azul puede medirse por espectrofotometría, calculando la concentración de cualquier muestra por comparación relativa con una curva patrón obtenida a partir de las lecturas de absorbancia de soluciones de fosfato de concentración conocida.

## MÉTODO DEL CLORURO ESTAÑOSO

### Procedimiento



### Interferencias

Los ácidos fuertes utilizados en este método pueden convertir fósforo orgánico a ortofosfato. Por lo que se recomienda filtrar la muestra con filtro de fibra de vidrio para remover tanto como sea posible el fósforo orgánico.

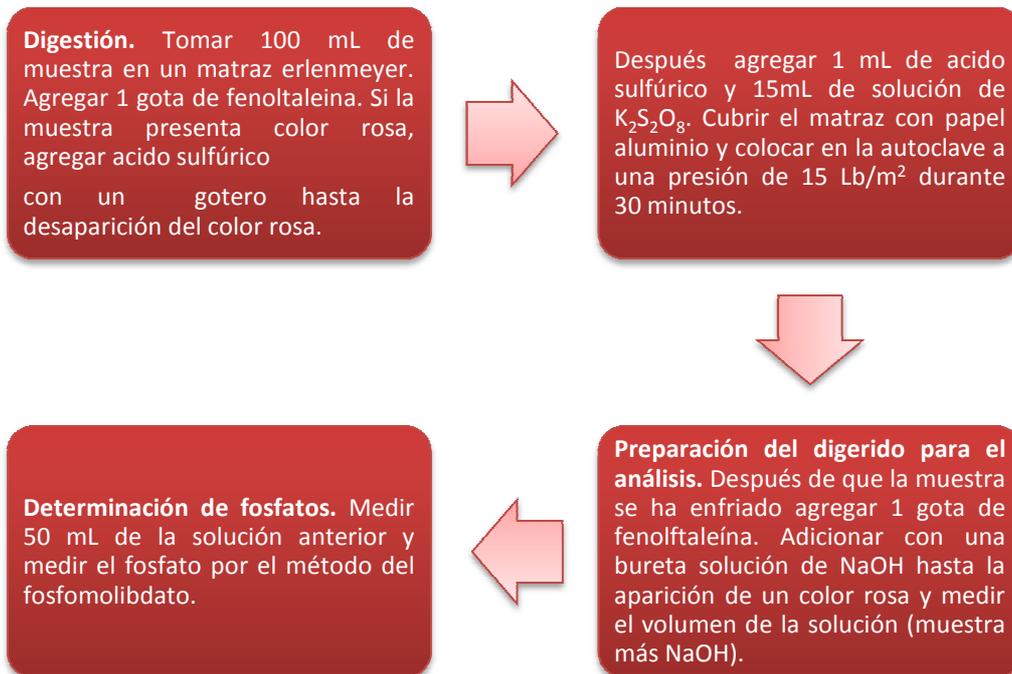
## 9. DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL

### Principio del método

En una disolución diluida de ortofosfatos, el molibdato de amonio reacciona en condiciones ácidas con el vanadato para formar un heteropoliácido, ácido vanadomolibdofosfórico. En la presencia de vanadio, se forma ácido vanadomolibdofosfórico de color amarillo. La longitud de onda a la cual la intensidad del color es medida depende de la detección requerida. La intensidad del color amarillo es directamente proporcional a la concentración de fosfato.

## MÉTODO DEL FOSFOVANADOMOLIBDATO

### Procedimiento



### Interferencias

Arseniato, fluoruro, torio, bismuto, sulfuro, tiosulfato, tiocianato o excesos de molibdato interfieren. El hierro en su forma ferrosa produce un color azul, pero no afecta a los resultados, si su concentración es menor a 100 mgL<sup>-1</sup>. La interferencia de sulfuro puede eliminarse por oxidación con agua de bromo.

## 10. DETERMINACION DE SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO (SAAM)

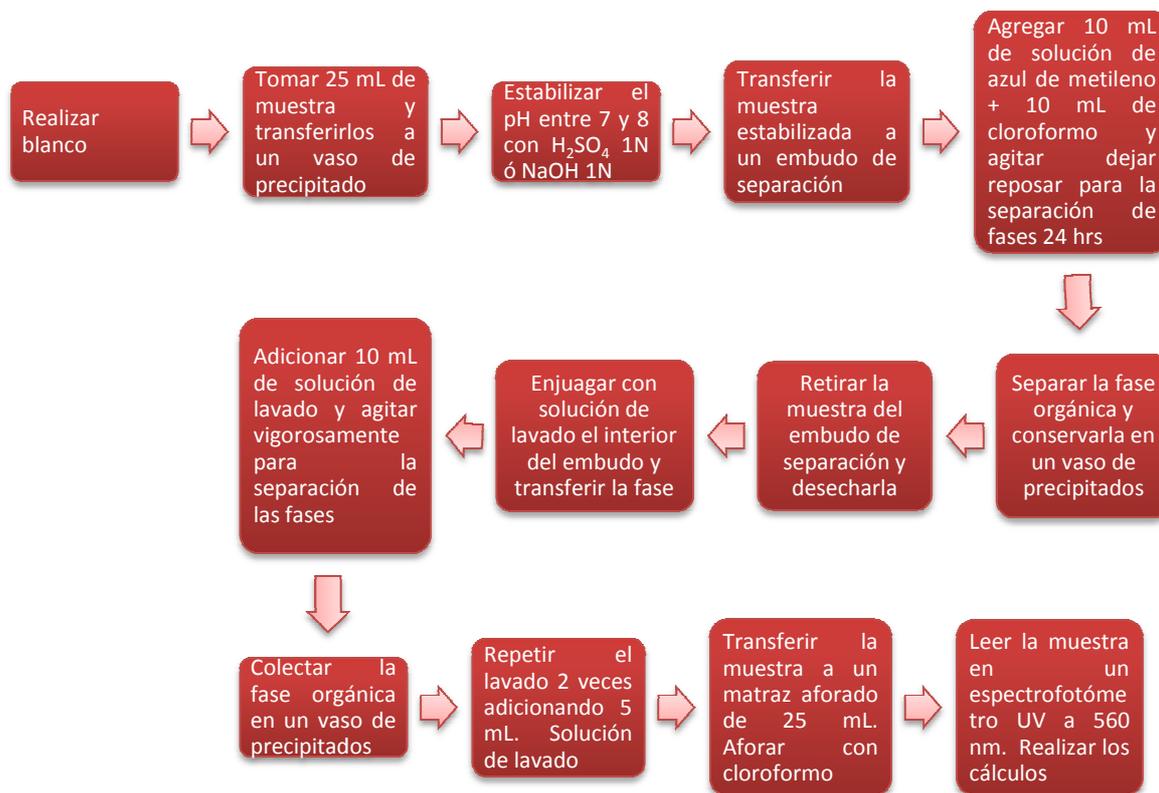
### Principio del método

Este método se basa en la formación de un par iónico extractable en cloroformo de color azul por la reacción del azul de metileno catiónico y un tensoactivo aniónico incluyendo al sulfonato de alquilbenceno lineal, otros sulfonatos y ésteres de sulfonatos. La muestra se acidifica y se mezcla con una disolución de azul de metileno. El par iónico hidrofóbico que se forma se extrae con cloroformo. Los extractos de cloroformo son lavados con una disolución ácida para remover los pares iónicos menos hidrófobos (con coeficientes de partición bajos) que pueden formarse por sustancias que interfieren potencialmente.

El cloroformo retiene los pares iónicos altamente hidrófobos. La intensidad del color azul presente en la fase orgánica se mide espectrofotométricamente a una longitud de onda de 652 nm y es proporcional a la cantidad de surfactantes aniónicos presentes en la muestra.

## MÉTODO COLORIMÉTRICO

### Procedimiento



### Interferencias

1. Cualquier compuesto orgánico e inorgánico que pueda formar un complejo con el azul de metileno extractable con cloroformo producirá interferencias positivas, a menos que el par iónico sea eliminado. Estas interferencias positivas incluyen sulfonatos orgánicos, carboxilatos y fenoles, además de cianuros, tiocianatos y nitratos
2. Cualquier compuesto que compite efectivamente con el azul de metileno para formar un par iónico no extractable con cloroformo da resultados negativos. Estas interferencias negativas se dan cuando existen aminas en la muestra.

3. Cuando se utiliza mezcla crómica como disolución limpiadora para el material de vidrio, debe tenerse cuidado de eliminar por completo todo el ácido crómico. Si no se retira todo el ácido, puede provocar errores en los resultados.
4. Nunca use un detergente para limpiar el material de vidrio utilizado en el desarrollo de este método, ya que el detergente es difícil de remover, y cualquier residuo de detergente puede causar resultados altos.

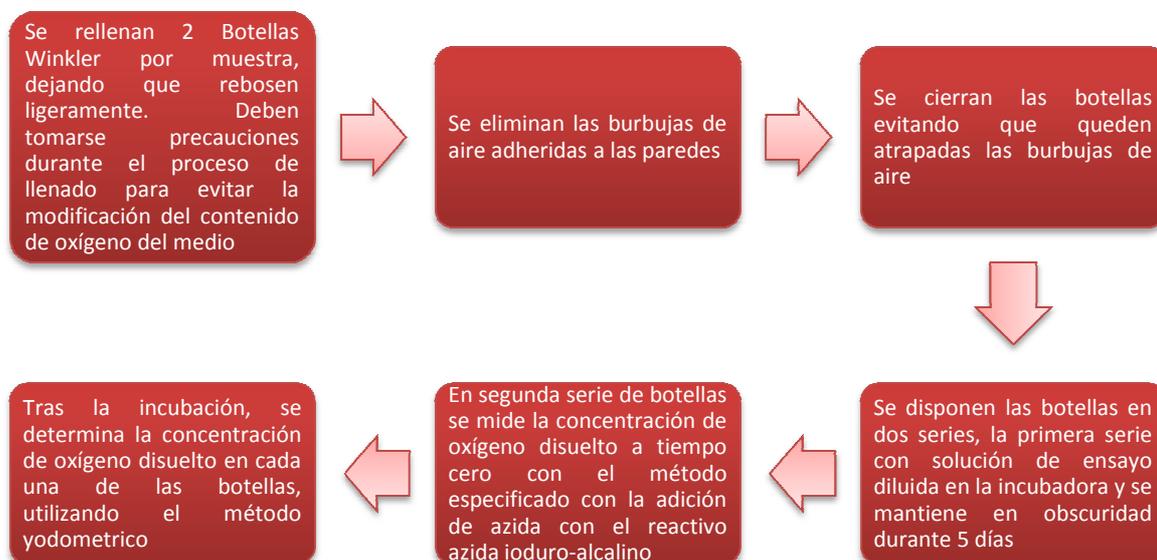
## 11. DETERMINACION DE LA DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO (DBO<sub>5</sub>)

### Principio del método

Este método se basa en la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en el agua y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de 5 días de incubación a 293 K (20°C).

### METODO DE DILUCIÓN

#### Procedimiento



#### Interferencias

- El pH ácido o alcalino
- Cloro residual
- Nitritos: Es la interferencia más común en las muestras de DBO<sub>5</sub> incubadas.
- Sustancias inorgánicas y orgánicas reductoras.

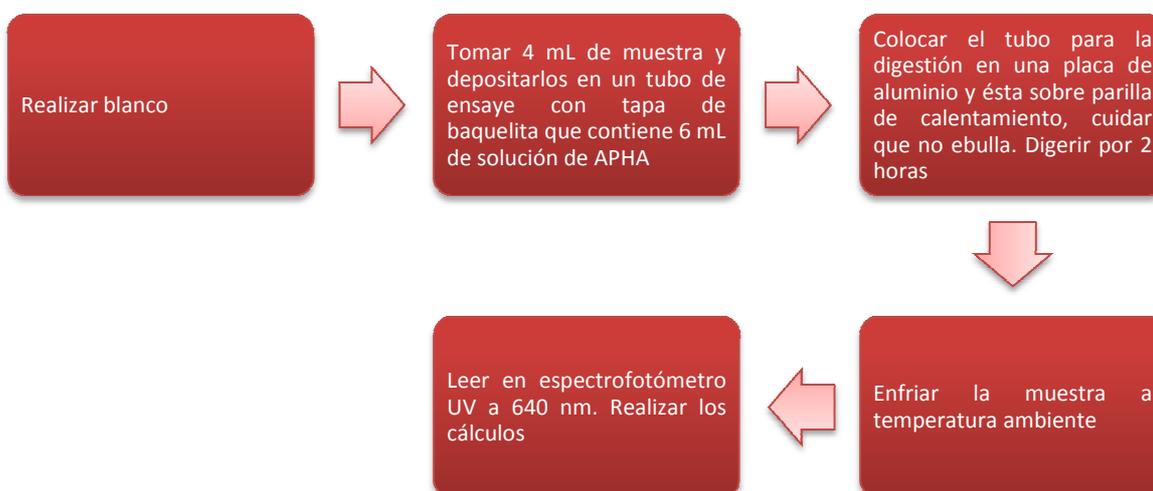
## 12. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO)

### Principio del método

Una gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos son oxidados con una mezcla de ácido crómico y sulfúrico a ebullición. La muestra se coloca a reflujo en una disolución de ácido fuerte con un exceso conocido de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ). Después de la digestión, el dicromato no reducido se mide por titulación o espectrofotométricamente para determinar la cantidad de dicromato consumido y calcular la materia oxidable en términos de oxígeno equivalente.

### MÉTODO DE OXIDACIÓN CON DICROMATO

#### Procedimiento



#### Interferencias

1. El método no oxida uniformemente todos los materiales orgánicos. Algunos compuestos son muy resistentes a la oxidación, mientras que otros tales como los carbohidratos son fácilmente oxidables.
2. Los compuestos alifáticos volátiles de cadena abierta no se oxidan.

### 13. DETERMINACION DE SÓLIDOS TOTALES (ST), SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST), SÓLIDOS TOTALES VOLATILES (STV) Y SOLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT)

#### Principio del método

El principio de este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales y residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos.

#### Procedimiento

##### MÉTODO GRAVIMÉTRICO DE (ST)

Poner a peso constante (P1) una cápsula de porcelana, agregar 50mL de muestra llevarla a evaporación total en una estufa a 105°C



Dejar enfriar la cápsula en un desecador más de 1hr, pesar nuevamente, obteniéndose el P2

##### MÉTODO GRAVIMÉTRICO DE (STV)

Colocar la cápsula de porcelana de los ST en la mufla, para su calcinación a 550±50°C por 15



Finalizada la calcinación, dejar enfriar la cápsula en el desecador por más de 1hr y pesar, obteniendo el P3.

### MÉTODO GRAVIMÉTRICO DE (SST)

Poner a peso constante un crisol gooch con un filtro de fibra de vidrio



Filtrar 100 mL de la muestra, seguido de 3 lavadas con 10 mL de agua destilada

### MÉTODO GRAVIMÉTRICO DE (SDT)

Secar en estufa a 103-105°C por 1 hora, dejar enfriar en el desecador y pesar



La determinación de las sales disueltas totales es por diferencia entre los sólidos totales menos sólidos suspendidos totales

### Interferencias

Es importante agitar homogéneamente la muestra, ya que se puede ver afectada por: La presencia de partículas grandes, materia flotante, precipitados o muestras no homogéneas que conducen a resultados no reproducibles y por las películas de grasas presentes en las muestras.

1. La heterogeneidad de la muestra que contiene una o más de dos fases puede provocar errores durante el muestreo en campo y en la toma de

alícuotas de la misma para la determinación de sólidos. Se recomienda homogeneizar la muestra en lo posible antes de tomar la alícuota.

2. Si parte de los sólidos de la muestra se adhieren a las paredes de los contenedores, ya sea en el material de muestreo o en los utensilios de trabajo, considerar lo anterior en la evaluación y en el reporte de resultados.

3. La temperatura a la cual el residuo se seca, tiene un efecto muy importante sobre los resultados, ya que pueden ocurrir pérdidas en el peso de la materia orgánica presente durante la etapa de secado y/o el desprendimiento de gases por descomposición química y/o por la oxidación del residuo, así como por la oclusión de agua.

4. El tipo de filtro, el tamaño del poro, el grosor del filtro, el tamaño de la partícula y la cantidad de material depositado en el filtro son los principales factores que afectan la separación de los sólidos suspendidos y las sales disueltas.

5. Los resultados para las muestras con alto contenido de grasas y aceites son cuestionables debido a la dificultad de secado a peso constante en un tiempo razonable.

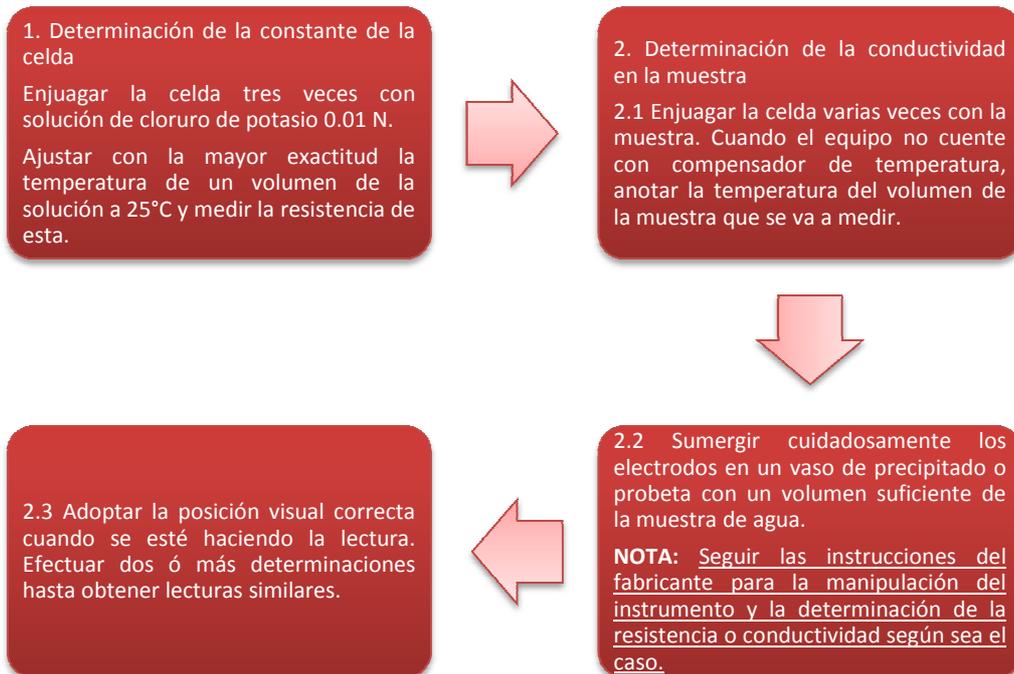
## 14. DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

### Principio del método

Este método se basa en la propiedad que adquiere el agua de conducir la corriente eléctrica cuando tiene iones disueltos. Para medir la conductividad eléctrica en agua se utiliza una celda electrolítica con un puente de Wheatstone, este aparato mide la resistencia eléctrica de la muestra. El puente de Wheatstone debe trabajar para esta prueba con corriente alterna a fin de evitar cambios en la composición de los electrodos debido a la acumulación de iones (efecto de la polarización).

## METODO DEL ELECTRODO

### Procedimiento



### Interferencias

- Cuando el agua contenga grandes cantidades de material en suspensión es preferible dejarla sedimentar antes de medir la conductividad con objeto de disminuir la posibilidad de ensuciar el electrodo de la celda.
- Evitar que las grasas y aceites cubran el electrodo, porque afectan la precisión de la lectura.
- Eliminar las burbujas del aire presentes en la celda de medición.

### XIII.2 Anexo II Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de Tlahuapan, Puebla

El Registro Público de Derechos de Agua: (REPDA) dependiente de Semarnat y Conagua. Es un registro que proporciona información y seguridad jurídica (poder público) a los usuarios de aguas nacionales y bienes inherentes a través de la inscripción de los títulos de concesión, asignación y permisos de descarga, así como las modificaciones que se efectúen en las características de los mismos.

En Santa Rita Tlahuapan se tienen autorizados los siguientes puntos de descarga a nombre del H. Ayuntamiento Municipal, marcando el volumen de descarga ( $m^3/día$ ) y ( $m^3/año$ ), en algunos casos se marca la superficie, el tipo de uso que ampara, procedencia, cuerpo receptor, ubicación geográfica y descarga al afluente. El municipio aporta una descarga de 595267.96 ( $m^3/año$ ) de uso público urbano procedente de servicios doméstico y sanitario.

Título	5PUE101365/18HOG94												
Titular	H. AYUNTAMIENTO MUNICIPAL DE TLAHUAPAN												
Volumen extracción de aguas nacionales que ampara el título ( $m^3/año$ )	0.00												
Aprovechamientos superficiales que ampara el título	0												
Volumen aprovechamientos superficiales ( $m^3/año$ )	0.00												
Aprovechamientos subterráneos que ampara el título	0												
Volumen aprovechamientos subterráneos ( $m^3/año$ )	0.00												
Puntos de descarga que ampara el título ( <b>Ver Anexos</b> )	1												
Volumen de descarga ( $m^3/día$ )	0.00												
Zonas federales que ampara el título	0												
Superficie de zona federal ( $m^2$ )	0.00												
Anotación marginal	NO												
<b>Anexo(s) que ampara el título</b>													
Anexo	Volumen Descarga ( $m^3/día$ )	Volumen Descarga ( $m^3/año$ )	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Procedencia	Cuerpo Receptor	Tipo	Latitud	Longitud	Descarga Afluente
1	0	65700	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	SERVICIOS DOMESTICO Y SANITARIOS	BARRANCA EL CUERVO	PUBLICO URBANO	19° 15'16.00"	-98° 29'18.00"	BARRANCA EL CUERVO
													1

# Evaluación de la Calidad del Agua Tratada en un Sistema de Humedales de Flujo Subsuperficial, para Uso Recreativo.

Título		5PUE101249/18HOGEG4											
Titular		H. AYUNTAMIENTO MUNICIPAL DE TLAHUAPAN											
Volumen extracción de aguas nacionales que ampara el título (m3/año)		0.00											
Aprovechamientos superficiales que ampara el título		0											
Volumen aprovechamientos superficiales (m3/año)		0.00											
Aprovechamientos subterráneos que ampara el título		0											
Volumen aprovechamientos subterráneos (m3/año)		0.00											
Puntos de descarga que ampara el título (Ver Anexos)		1											
Volumen de descarga (m3/día)		383.61											
Zonas federales que ampara el título		0											
Superficie de zona federal (m2)		0.00											
Anotación marginal		NO											
<b>Anexo(s) que ampara el título</b>													
Anexo	Volumen Descarga (m3/día)	Volumen Descarga (m3/año)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Procedencia	Cuerpo Receptor	Tipo	Latitud	Longitud	Descarga Afluente
1	383.61	140017.65	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	SERVICIOS DOMESTICOS Y SANITARIOS	BARRANCA EL PLAN	PUBLICO URBANO	19° 27'54.00"	-98° 40'06.00"	BARRANCA EL PLAN
1													
Título		04PUE111752/18HMGE01											
Titular		H. AYUNTAMIENTO MUNICIPAL DE TLAHUAPAN											
Volumen extracción de aguas nacionales que ampara el título (m3/año)		0.00											
Aprovechamientos superficiales que ampara el título		0											
Volumen aprovechamientos superficiales (m3/año)		0.00											
Aprovechamientos subterráneos que ampara el título		0											
Volumen aprovechamientos subterráneos (m3/año)		0.00											
Puntos de descarga que ampara el título (Ver Anexos)		1											
Volumen de descarga (m3/día)		267.86											
Zonas federales que ampara el título		0											
Superficie de zona federal (m2)		0.00											
Anotación marginal		NO											
<b>Anexo(s) que ampara el título</b>													
Anexo	Volumen Descarga (m3/día)	Volumen Descarga (m3/año)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Procedencia	Cuerpo Receptor	Tipo	Latitud	Longitud	Descarga Afluente
1	267.86	97769.81	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	SERVICIOS DOMESTICOS Y SANITARIOS	TERRENOS	PUBLICO URBANO	19° 21'26.00"	-98° 33'24.00"	TERRENOS
1													
Título		04PUE111758/18HOGEG1											
Titular		H. AYUNTAMIENTO MUNICIPAL DE TLAHUAPAN											
Volumen extracción de aguas nacionales que ampara el título (m3/año)		0.00											
Aprovechamientos superficiales que ampara el título		0											
Volumen aprovechamientos superficiales (m3/año)		0.00											
Aprovechamientos subterráneos que ampara el título		0											
Volumen aprovechamientos subterráneos (m3/año)		0.00											
Puntos de descarga que ampara el título (Ver Anexos)		1											
Volumen de descarga (m3/día)		104.70											
Zonas federales que ampara el título (Ver Anexos)		1											
Superficie de zona federal (m2)		100.00											
Anotación marginal		NO											
<b>Anexo(s) que ampara el título</b>													
Anexo	Volumen Descarga (m3/día)	Volumen Descarga (m3/año)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Procedencia	Cuerpo Receptor	Tipo	Latitud	Longitud	Descarga Afluente
1	104.7	38215	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	SERVICIOS DOMESTICOS Y SANITARIOS	BARRANCA LAS ROSITAS	PUBLICO URBANO	19° 24'24.00"	-98° 32'21.00"	BARRANCA LAS ROSITAS
1													
Anexo	Superficie (m2)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Corriente o Vaso	Latitud	Longitud				
1	100	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	BARRANCA LAS ROSITAS	19°24'24.00"	-98°32'21.00"				
1													

# Evaluación de la Calidad del Agua Tratada en un Sistema de Humedales de Flujo Subsuperficial, para Uso Recreativo.

Título	04PUE111759/18HOGEO1													
Titular	H. AYUNTAMIENTO MUNICIPAL DE TLAHUAPAN													
Volumen extracción de aguas nacionales que ampara el título (m3/año)	0.00													
Aprovechamientos superficiales que ampara el título	0													
Volumen aprovechamientos superficiales (m3/año)	0.00													
Aprovechamientos subterráneos que ampara el título	0													
Volumen aprovechamientos subterráneos (m3/año)	0.00													
Puntos de descarga que ampara el título ( <b>Ver Anexos</b> )	1													
Volumen de descarga (m3/día)	38.60													
Zonas federales que ampara el título ( <b>Ver Anexos</b> )	1													
Superficie de zona federal (m2)	100.00													
Anotación marginal	NO													
<b>Anexo(s) que ampara el título</b>														
Anexo	Volumen Descarga (m3/día)	Volumen Descarga (m3/año)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Procedencia	Cuerpo Receptor	Tipo	Latitud	Longitud	Descarga Afluente	
1	38.6	14089	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	SERVICIOS DOMESTICOS Y SANITARIOS	BARRANCA INNOMINADA	PUBLICO URBANO	19° 26'06.00"	-98° 33'11.00"	BARRANCA INNOMINADA	1
1														
Anexo	Superficie (m2)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Corriente o Vaso	Latitud	Longitud					
1	100	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	BARRANCA INNOMINADA	19°26'06.00"	-98°33'11.00"					
1														

Título	04PUE111760/18HOGEO1													
Titular	H. AYUNTAMIENTO MUNICIPAL DE TLAHUAPAN													
Volumen extracción de aguas nacionales que ampara el título (m3/año)	0.00													
Aprovechamientos superficiales que ampara el título	0													
Volumen aprovechamientos superficiales (m3/año)	0.00													
Aprovechamientos subterráneos que ampara el título	0													
Volumen aprovechamientos subterráneos (m3/año)	0.00													
Puntos de descarga que ampara el título ( <b>Ver Anexos</b> )	2													
Volumen de descarga (m3/día)	93.30													
Zonas federales que ampara el título ( <b>Ver Anexos</b> )	2													
Superficie de zona federal (m2)	200.00													
Anotación marginal	NO													
<b>Anexo(s) que ampara el título</b>														
Anexo	Volumen Descarga (m3/día)	Volumen Descarga (m3/año)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Procedencia	Cuerpo Receptor	Tipo	Latitud	Longitud	Descarga Afluente	
1	46.65	17027.25	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	SERVICIOS DOMESTICOS Y SANITARIOS	BARRANCA GUANALATLACO	PUBLICO URBANO	19° 20'20.00"	-98° 34'19.00"	BARRANCA GUANALATLACO	
2	46.65	17027.25	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	SERVICIOS DOMESTICOS Y SANITARIOS	BARRANCA GUANALATLACO	PUBLICO URBANO	19° 20'41.00"	-98° 35'08.00"	BARRANCA GUANALATLACO	
1														
Anexo	Superficie (m2)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Corriente o Vaso	Latitud	Longitud					
1	100	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	BARRANCA GUANALATLACO	19° 20'20.00"	-98° 34'19.00"					
2	100	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	BARRANCA GUANALATLACO	19° 20'41.00"	-98° 35'08.00"					
1														

# Evaluación de la Calidad del Agua Tratada en un Sistema de Humedales de Flujo Subsuperficial, para Uso Recreativo.

Título	04PUE111766/18HOGEO1												
Titular	H. AYUNTAMIENTO MUNICIPAL DE TLAHUAPAN												
Volumen extracción de aguas nacionales que ampara el título (m3/año)	0.00												
Aprovechamientos superficiales que ampara el título	0												
Volumen aprovechamientos superficiales (m3/año)	0.00												
Aprovechamientos subterráneos que ampara el título	0												
Volumen aprovechamientos subterráneos (m3/año)	0.00												
Puntos de descarga que ampara el título ( <b>Ver Anexos</b> )	1												
Volumen de descarga (m3/día)	378.48												
Zonas federales que ampara el título ( <b>Ver Anexos</b> )	1												
Superficie de zona federal (m2)	100.00												
Anotación marginal	NO												
<b>Anexo(s) que ampara el título</b>													
Anexo	Volumen Descarga (m3/día)	Volumen Descarga (m3/año)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Procedencia	Cuerpo Receptor	Tipo	Latitud	Longitud	Descarga Afluente
1	378.48	138145.2	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	SERVICIOS DOMESTICOS Y SANITARIOS	BARRANCA PASO DE LA ATARJEJA	PUBLICO URBANO	19° 22'29.00"	-98° 34'10.00"	BARRANCA PASO DE LA ATARJEJA
1													
Anexo	Superficie (m2)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Corriente o Vaso	Latitud	Longitud				
1	100	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	BARRANCA PASO DE LA ATARJEJA	19° 22'29.00"	-98° 34'10.00"				
1													

Título	04PUE111769/18HOGEO1												
Titular	H. AYUNTAMIENTO MUNICIPAL DE TLAHUAPAN												
Volumen extracción de aguas nacionales que ampara el título (m3/año)	0.00												
Aprovechamientos superficiales que ampara el título	0												
Volumen aprovechamientos superficiales (m3/año)	0.00												
Aprovechamientos subterráneos que ampara el título	0												
Volumen aprovechamientos subterráneos (m3/año)	0.00												
Puntos de descarga que ampara el título ( <b>Ver Anexos</b> )	1												
Volumen de descarga (m3/día)	16.80												
Zonas federales que ampara el título ( <b>Ver Anexos</b> )	1												
Superficie de zona federal (m2)	100.00												
Anotación marginal	NO												
<b>Anexo(s) que ampara el título</b>													
Anexo	Volumen Descarga (m3/día)	Volumen Descarga (m3/año)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Procedencia	Cuerpo Receptor	Tipo	Latitud	Longitud	Descarga Afluente
1	16.8	6132	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	SERVICIO DOMESTICO Y SANITARIO	BARRANCA EL GAVILLESO	PUBLICO URBANO	19° 20'53.00"	-98° 37'18.00"	BARRANCA EL GAVILLESO
1													
Anexo	Superficie (m2)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Corriente o Vaso	Latitud	Longitud				
1	100	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	BARRANCA EL GAVILLERO	19°20'53.00"	-98°37'18.00"				
1													

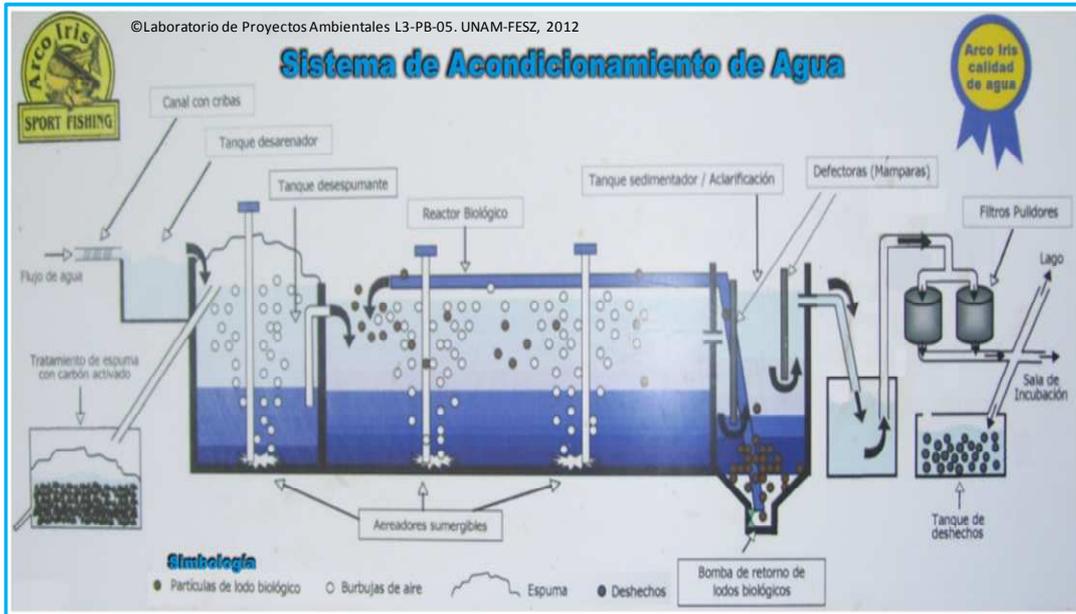
# Evaluación de la Calidad del Agua Tratada en un Sistema de Humedales de Flujo Subsuperficial, para Uso Recreativo.

Título	04PUE111770/18H0GE01													
Titular	H. AYUNTAMIENTO MUNICIPAL DE TLAHUAPAN													
Volumen extracción de aguas nacionales que ampara el título (m3/año)	0.00													
Aprovechamientos superficiales que ampara el título	0													
Volumen aprovechamientos superficiales (m3/año)	0.00													
Aprovechamientos subterráneos que ampara el título	0													
Volumen aprovechamientos subterráneos (m3/año)	0.00													
Puntos de descarga que ampara el título <b>(Ver Anexos)</b>	1													
Volumen de descarga (m3/día)	167.52													
Zonas federales que ampara el título <b>(Ver Anexos)</b>	1													
Superficie de zona federal (m2)	100.00													
Anotación marginal	NO													
<b>Anexo(s) que ampara el título</b>														
Anexo	Volumen Descarga (m3/día)	Volumen Descarga (m3/año)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Procedencia	Cuerpo Receptor	Tipo	Latitud	Longitud	Descarga Afluente	
1	167.52	61144.8	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	SERVICIOS DOMESTICOS Y SANITARIOS	BARRANCA TEXAL	PUBLICO URBANO	19° 21'08.00"	-98° 33'18.00"	BARRANCA TEXAL.	
													1	
Anexo	Superficie (m2)	Uso que ampara el Título	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Corriente o Vaso	Latitud	Longitud					
1	100	PUBLICO URBANO	21 - PUEBLA	180 - TLAHUAPAN	18 - BALSAS	1	BARRANCA TEXAL	19°21'08.00"	-98°33'18.00"					
									1					

### XIII.3 Anexo III. Álbum Fotográfico

#### Antecedentes del lugar

- El sitio donde actualmente se encuentra el “Humedal 1”, formaba parte integral de la planta de tratamiento de aguas residuales en Arcoiris; considerada un foco de infección, generaba altos costos en electricidad y reactivos químicos, además de un fuerte impacto ambiental ya que producía malos olores, lodos activados y perturbación sonora por la activación de bombas de agua. En la imagen inferior se muestra el plano del sistema de acondicionamiento de agua, ilustrando cómo funcionaba la planta de tratamiento.



#### Antecedentes del lugar

Antes de comenzar la adaptación para el “Humedal 1” la parte denominada “Reactor biológico” de la planta de tratamiento de Arcoiris estaba inactiva, inundada además de que presentaba alta cantidad de *Eichhornia sp.* (lirio acuático -planta invasora-) y posiblemente de *Aedes aegypti* (Mosquito transmisor del dengue). Las imágenes muestran las partes previas al “reactor biológico” como son el “cribado”, “Tanque desarenador” lleno al 70% de sedimentos y la parte posterior “Filtros pulidores” inactivos.



### Preparación del lugar para la construcción del humedal de flujo subsuperficial

En las imágenes se muestra el inicio de la construcción del "Humedal 1"; para esto el "Reactor biológico" se dejó totalmente vacío y seco, cabe señalar que se utilizó la infraestructura existente de la planta de tratamiento.



Se rehabilitó la planta de tratamiento inoperante, con la finalidad de implementar un humedal de flujo subsuperficial. En las imágenes superiores se aprecia la construcción de una barda con el objetivo de distribuir el flujo del agua de manera uniforme y finalmente en la imagen inferior derecha se muestra el momento en el que se rellena con sustrato.



### "Barranca Panacuale"

Las imágenes muestran tramos con agua de la "Barranca Panacuale", misma que procede de la comunidad de "Santa Rita Tlahuapan". En la imagen de la derecha se muestran descargas de aguas municipales que son vertidas a los tramos de la barranca. La figura central inferior muestra el medidor de la derivación que "Arcolris" realiza a la "Barranca Panacuale" con el fin de incorporar agua cruda - 1,296,000 L/día- al sistema de humedales para mejorar su calidad y posteriormente utilizarla con fines recreativos.



### Afluente (Canal de ingreso)

A: El agua que proviene de la "Barranca Panacuale" entra por el "Canal de ingreso" trae consigo aguas residuales municipales y no municipales con carga orgánica proveniente de la comunidad de "Santa Rita Tlahuapan"



B: El "Canal de ingreso" cuenta con sistema de cribado (círculos rojos). Figura C: "Biofiltro" entrando al "Humedal 1"; se aprecian tubos de PVC para distribución del agua y donde crecen algas filamentosas cuya función es retener contaminantes.



### Flora del sistema de humedales en Arcoíris

El sistema de humedales cuenta con dos especies de plantas ornamentales; la que mas predomina es *Zantedeschia Aethiopica* (alcatraz) por su adaptación a las condiciones climáticas del lugar.



Se introdujo una segunda planta que es el *Cyperus papyrus* (papiro), esta planta solo se sembró en "Humedal 1" porque ocupan un mayor volumen y allí se disponía de él.



### Sistema de humedales de Arcoiris

El sistema cuenta con 6 humedales. En la imagen A y B: Se aprecia el crecimiento de (papiro) y (alcatraz) dentro del "Humedal 1". En la imagen C: se observa un crecimiento mas avanzado de (alcatraz) dentro del "Humedal 2". La imagen D: se ven los "Humedales 3 y 4" (círculo rojo) con crecimiento de (alcatraz). La Imagen E: muestra los "Humedales 5 y 6" (círculo rojo) cabe mencionar que su crecimiento es bajo porque tenían poco tiempo de haberse sembrado y por ultimo en la Imagen F: se aprecian los estanques de cultivo de *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoiris).



### Crecimiento de *Zantedeschia Aethiopica* (alcatraz) y *Cyperus papyrus* (papiro) en el "Humedal 1"



**Algunos de los mejores ejemplares de *Zantedeschia Aethiopica* (alcatraz) en el sistema de humedales**



**Efluente (Salida de humedales)**

Se muestra la distribución del agua que proviene de la salida del "Humedal 1" para los "Humedales 3 y 4" (Figura A) y para el "Humedal 2" (Figura B).



Figura C: Se muestra la salida de agua del "Humedal 2". Figura D: se observa la salida de agua de los "Humedales del 3-6". Figura E y F: muestran el tubo que contiene las salidas de todos los humedales. -Es importante resaltar que se tomó como punto de muestreo: indicado como "Efluente"-.



## Toma de muestras

Las figuras muestran el etiquetado y preparación de botellas para la toma de muestras de parámetros físicos, químicos y biológicos, así como la toma de muestras en los puntos denominados “canal de ingreso”(afluente) y “salida de humedales”(efluente).



## Parámetros *in situ*

Realización de parámetros *in situ*: oxígeno disuelto y fijación de muestras



Realización de parámetros físicos y químicos *in situ*: temperatura, conductividad y pH



### Parámetros realizados en laboratorio

Realización de parámetros físicos, químicos y biológicos dentro del laboratorio ambiental



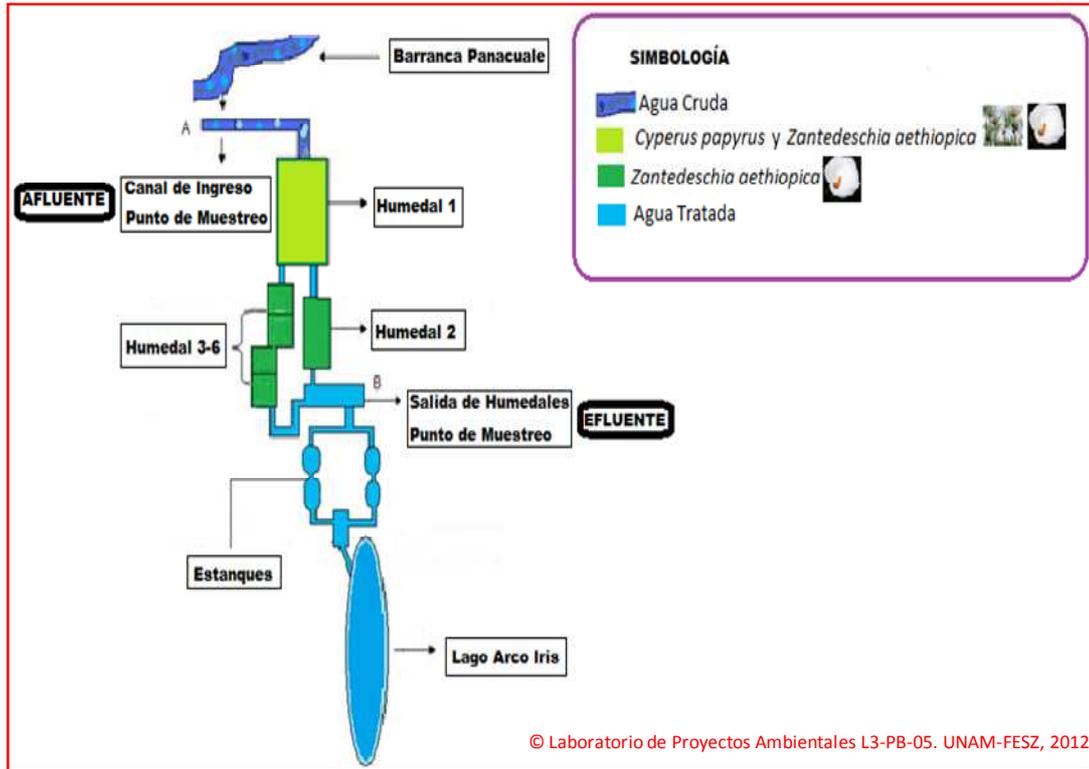
### Lago de recreación Arcoíris

El agua que entra al lago Arcoíris proviene del sistema de humedales. En estas imágenes se muestra la entrada al lago.

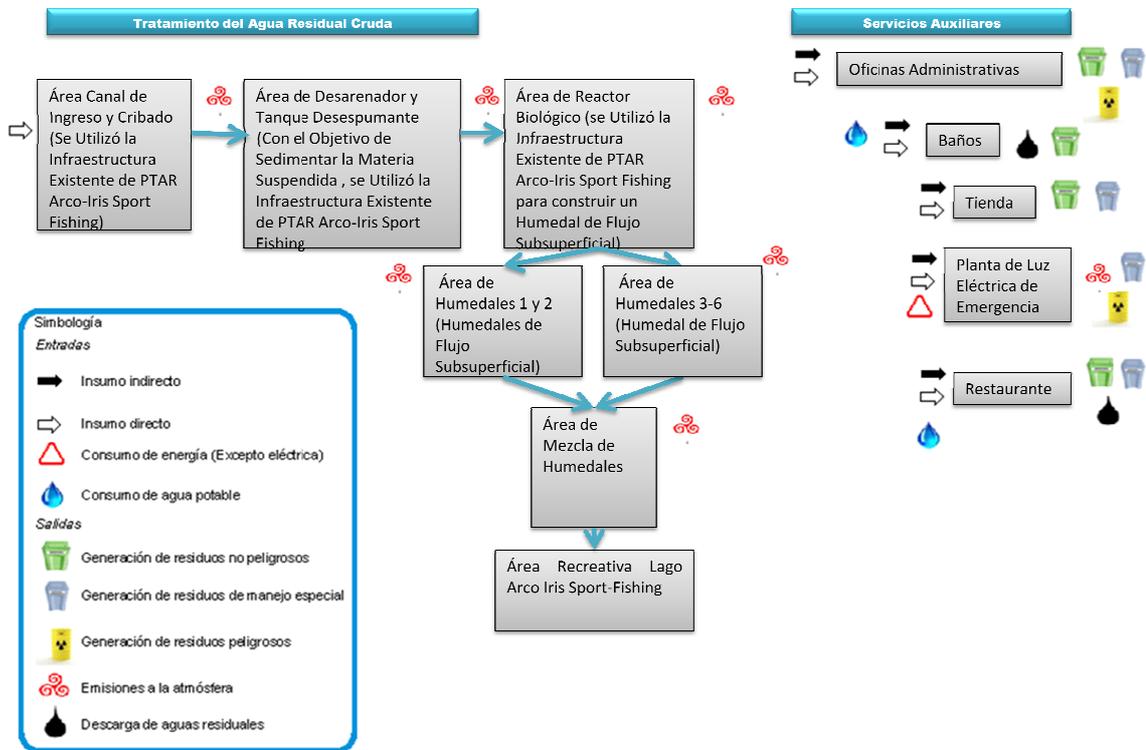
El lago Arcoíris se utiliza con fines recreativos, donde se reúnen las familias para convivir, descansar, practicar remo y canotaje en lancha, paseos en caballo, bicicleta y para practicar la pesca deportiva.



**Diagrama completo de depuración de aguas residuales para reuso en actividades recreativas**



### XIII.4. Anexo IV. Diagrama de flujo de las operaciones de “Arcoíris Sport Fishing”



Fuente: Laboratorio de Proyectos Ambientales. L3-PB-05. UNAM-FESZ, 2012

Insumos directos: Aquellos materiales o sustancias que intervienen en el proceso productivo o de tratamiento. Incluyen materias primas.

Insumos indirectos: Aquellos materiales o sustancias que no intervienen de manera directa en los procesos productivos o de tratamiento y son empleados dentro del establecimiento en servicios auxiliares, en mantenimiento y limpieza, en laboratorios (UNAM-FESZ, 2011).