

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL AUMENTO DE LA CARGA HIDRÁULICA  
SOBRE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN  
HUMEDALES CONSTRUIDOS SEMBRADOS CON *Guadua angustifolia* Kunth  
UTILIZANDO GRAVA Y ARENA COMO MEDIO FILTRANTE.**

**Juan David García Maya.**

**Manuel Fernando Giraldo Velásquez**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE TECNOLOGÍAS**

**ESCUELA DE QUÍMICA**

**Pereira, Colombia**

**2014**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL AUMENTO DE LA CARGA HIDRÁULICA  
SOBRE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN  
HUMEDALES CONSTRUIDOS SEMBRADOS CON *Guadua angustifolia* Kunth  
UTILIZANDO GRAVA Y ARENA COMO MEDIO FILTRANTE.**

**Juan David García Maya.**

**Manuel Fernando Giraldo Velásquez**

**Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogos Químicos.**

**Director:**

**Diego Paredes Cuervo. Ing. M.Sc. Ph D.**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE TECNOLOGÍAS**

**ESCUELA DE QUÍMICA**

**Pereira, Colombia.**

**2014**

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestros padres que siempre nos han apoyado en el transcurso de nuestro camino con el fin de alcanzar nuestras metas propuestas.

A la Escuela de Química por la formación recibida a lo largo de nuestra carrera, a los docentes del programa de Tecnología Química los cuales fueron fuente y herramienta para alcanzar los conocimientos que nos permitieron realizar y culminar este documento.

A todo el personal del GIAS, a las personas con quienes tuvimos la oportunidad trabajar en el Laboratorio de Procesos Biológicos, a los integrantes del Laboratorio de Química Ambiental por su colaboración y apoyo en la realización de este trabajo, y en especial a la profesora Janeth Astrid Cubillos por su paciencia y valiosa colaboración a lo largo de este proyecto.

# ÍNDICE GENERAL.

---

<b>RESUMEN.</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>13</b>
<b>2.1 AGUAS RESIDUALES.</b>	<b>13</b>
<b>1.1.1 AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS:</b>	13
<b>1.1.2 PARÁMETROS DE ANÁLISIS EN AGUAS RESIDUALES.</b>	14
2.2.2 Demanda química de oxígeno.	14
2.2.3 Nitrógeno:	15
2.2.4 Oxígeno Disuelto:	16
2.2.5 Solidos suspendidos totales:	16
2.2.6 Temperatura.	17
2.2.7 Caudal (Q).	17
2.2.8 pH.	17
<b>2.3 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES:</b>	<b>17</b>
2.3.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL GRADO DE TRATAMIENTO:	18
2.3.1.1 Tratamiento preliminar:	18
2.3.1.2 Tratamiento primario:	18
2.3.1.3 Tratamiento Secundario.	18
2.3.1.4 Tratamientos terciarios.	19
<b>2.4 HUMEDALES.</b>	<b>19</b>
2.5 HUMEDALES ARTIFICIALES.	20
2.5.1 Humedales con espejo de agua o de flujo superficial.	20
2.5.2 Humedales contruidos de flujo subsuperficial horizontal.	21
<b>2.5 MECANISMOS DE REMOCIÓN EN HUMEDALES ARTIFICIALES</b>	<b>23</b>
2.5.1 REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.	23
2.5.2 REMOCIÓN DE NITRÓGENO:	23
2.5.3 SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN:	23
<b>2.6 PROCESOS BIOLÓGICOS:</b>	<b>25</b>
2.6.1 REMOCIÓN BIOLÓGICA DE NUTRIENTES:	25
2.6.2 REMOCIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO:	25
2.6.2.1 <i>Nitrificación Biológica:</i>	26
2.6.2.2 <i>Desnitrificación Biológica:</i>	26
<b>2.7 GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH:</b>	<b>27</b>
2.7.1 IMPORTANCIA ECONÓMICA, ECOLÓGICA Y SOCIAL:	28
<b>2.8 VENTAJAS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES:</b>	<b>29</b>
<b>2.9 LIMITACIONES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES:</b>	<b>30</b>

<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>31</b>
<hr/>	
<b>OBJETIVOS</b>	<b>33</b>
<hr/>	
<b>4.1 OBJETIVO GENERAL.</b>	<b>33</b>
<b>4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.</b>	<b>33</b>
<hr/>	
<b>5. METODOLOGÍA</b>	<b>34</b>
<hr/>	
5.1 PLANTA DE TRATAMIENTO	34
<b>5.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.</b>	<b>35</b>
<b>5.2 UNIDADES EXPERIMENTALES:</b>	<b>37</b>
5.2.1 ESPECIFICACIONES HUMEDALES.	38
<b>5.3 ETAPAS DE SEGUIMIENTO.</b>	<b>38</b>
<b>5.4 .MUESTREO.</b>	<b>38</b>
5.4.1 ZONA DE MUESTREO.	38
5.4.2 TAMAÑO DE MUESTRA.	39
5.4.3 FRECUENCIA DE MUESTREO.	39
5.5 PARÁMETROS A ANALIZAR.	39
<hr/>	
<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>41</b>
<hr/>	
<b>6.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LOS HUMEDALES:</b>	<b>41</b>
6.1.1 TIEMPOS DE RETENCIÓN Y COMPORTAMIENTO DEL CAUDAL.	41
<b>6.2 TEMPERATURA.</b>	<b>41</b>
<b>PH:</b>	<b>43</b>
<b>OXÍGENO DISUELTO:</b>	<b>46</b>
<b>6.2 MATERIA ORGÁNICA.</b>	<b>48</b>
6.2.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).	48
6.2.2 DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO <sub>5</sub> ).	51
6.2.3 CARGAS MÁSCAS DE MATERIA ORGÁNICA:	54
6.2.4 REMOCIONES DE MATERIA ORGÁNICA.	56
6.2.5 EFICIENCIAS DE MATERIA ORGÁNICA	59
6.2.5.1 Eficiencia de remoción de DQO.	59
6.2.5.2 Eficiencias de remoción de DBO <sub>5</sub> :	60
6.2.6 ANÁLISIS INTER-ETAPAS:	61
6.2.7 ANÁLISIS INTER-HUMEDALES.	63
6.2.6.1 COMPARACIÓN CON OTROS ESTUDIOS:	64
<b>6.3 NITRÓGENO TOTAL:</b>	<b>65</b>
6.3.1 COMPORTAMIENTO NITRÓGENO AMONICAL:	65
6.3.2 COMPORTAMIENTO NITRITOS:	68
6.3.3 COMPORTAMIENTO NITRATOS:	70
6.3.4 CARGAS MÁSCAS.	72
6.3.5 REMOCIONES DE NITRÓGENO TOTAL:	74
6.3.6 EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE NITRÓGENO TOTAL:	76
6.3.7 ANÁLISIS INTER-ETAPAS.	77

6.4. COMPORTAMIENTO SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.	79
6.4. 1 CARGAS MÁSICAS PARA SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.	81
6.4.2 REMOCIONES DE SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES:	83
6.4.3 EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES:	84
6.4.4 ANÁLISIS INTER-ETAPAS.	85
ANÁLISIS INTER-HUMEDALES.	86
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>88</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	<b>90</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>91</b>
<b>10. ANEXOS.</b>	<b>95</b>

# Índice de Figuras.

---

Figura 1. Aguas Residuales Domésticas. Fuente: Periódico Milenio, 2011.	13
Figura 3. Humedales naturales, Bogotá. Fuente: <a href="http://www.humedalesbogota.com">www.humedalesbogota.com</a>	19
Figura 4. Humedal de flujo superficial. Fuente: Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010.	21
Figura 5. Esquema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. Fuente:	21
Figura 6. Comparación entre humedales de flujo superficial y flujo subsuperficial. Fuente: Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 201	22
Figura 7. Principales mecanismos de eliminación y transformación de los contaminantes en los humedales construidos. Fuente: Mena et al., 2005	24
Figura 8. Almacenamiento para el transporte de la guadua. Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2005	29
Figura 9. Esquema planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. Fuente: Marín y Correa, 2010	34
Figura 10. Humedales de flujo subsuperficial. Fuente: Autores	35
Figura 11. Esquema planta de tratamiento y humedales artificiales. Modificado: (Marín y Correa, 2010).	36
Figura 12. Tanque de Sedimentación. Fuente: Autores	36
Figura 13. Comportamiento de la temperatura a través del tiempo para la primera etapa.	42
Figura 14. Comportamiento de la temperatura a través del tiempo para la segunda etapa.	43
Figura 15. Comportamiento del pH a través del tiempo para la primera etapa.	44
Figura 16. Comportamiento del pH a través del tiempo para la segunda etapa.	45
Figura 17. Comportamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto a través del tiempo para la primera etapa.	47
Figura 18. Comportamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto a través del tiempo para la segunda etapa.	48
Figura 19. Comportamiento de las concentraciones de DQO a través del tiempo para la primera etapa.	49
Figura 20. Comportamiento de las concentraciones de DQO a través del tiempo para la segunda etapa.	50
Figura 21. Esquema simplificado de los procesos que intervienen en la degradación de la materia orgánica en los humedales. Fuente: (García y Corzo, 2008)	52
Figura 22. Comportamiento de las concentraciones de DBO <sub>5</sub> a través del tiempo para la primera etapa.	53
Figura 23. Comportamiento de las concentraciones de DBO <sub>5</sub> a través del tiempo para la segunda etapa.	54
Figura 24. Cargas máxicas de entrada y salida para DQO y DBO <sub>5</sub> en el humedal 1 (lecho de grava) en la primera etapa.	55
Figura 25. Cargas máxicas de entrada y salida para DQO y DBO <sub>5</sub> en el humedal 2 (lecho de arena) en la primera etapa.	55
Figura 26. Cargas máxicas de entrada y salida para DQO y DBO <sub>5</sub> en el humedal 1 (lecho de grava) en la segunda etapa.	56
Figura 27. Cargas máxicas de entrada y salida para DQO y DBO <sub>5</sub> en el humedal 2 (lecho de arena) en la segunda etapa.	56
Figura 28. Comportamiento de la remoción de DQO durante la primera etapa.	57
Figura 29. Comportamiento de la remoción de DBO <sub>5</sub> durante la primera etapa.	58
Figura 30. Comportamiento de la remoción de DQO durante la segunda etapa.	58
Figura 31. Comportamiento de la remoción de DBO <sub>5</sub> durante la segunda etapa	59
Figura 32. Porcentajes de remoción de DQO para ambas etapas.	60
Figura 33. Porcentajes de remoción de DBO <sub>5</sub> para ambas etapas.	61
Figura 34. Comportamiento de las concentraciones de nitrógeno amoniacal a través del tiempo de funcionamiento de los sistemas durante la primera etapa.	66
Figura 35. Comportamiento de las concentraciones de nitrógeno amoniacal a través del tiempo para la segunda etapa.	67
Figura 36. Comportamiento de las concentraciones de nitritos (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) a través del tiempo de funcionamiento de los sistemas durante la primera etapa.	69

Figura 37. Comportamiento de las concentraciones de nitritos ( $N-NO_2^-$ ) a través del tiempo para la segunda etapa. _____	70
Figura 38. Comportamiento de las concentraciones de nitratos a través del tiempo para la primera etapa. _____	71
Figura 39. Comportamiento de las concentraciones de nitratos a través del tiempo para la segunda etapa. _____	72
Figura 40. Cargas másicas promedio de entrada y salida para nitrógeno en la primera etapa. _____	73
Figura 41. Cargas másicas promedio de entrada y salida para nitrógeno total en la segunda etapa. _____	74
Figura 42. Comportamiento de la remoción de nitrógeno total durante la primera etapa _____	75
Figura 43. Comportamiento de la remoción de nitrógeno total durante la segunda etapa. _____	76
Figura 44. Porcentajes de remoción de nitrógeno total en ambas etapas. _____	77
Figura 45. Comportamiento de las concentraciones de sólidos suspendidos totales a través del tiempo para la primera etapa. _____	80
Figura 46. Comportamiento de las concentraciones de sólidos suspendidos totales a través del tiempo para la primera etapa. _____	81
Figura 47. Cargas másicas de entrada y salida para sólidos suspendidos totales para la primera etapa. ____	82
Figura 48. Cargas másicas de entrada y salida para sólidos suspendidos totales para la segunda etapa. ____	83
Figura 49. Comportamiento de la remoción de sólidos suspendidos totales durante la primera _____	84
Figura 50. Comportamiento de la remoción de sólidos suspendidos totales durante la segunda etapa. ____	84
Figura 51. Porcentajes de remoción de sólidos suspendidos totales en ambas etapas. _____	85



# Índice de Tablas.

---

Tabla 1. Datos y ubicación geográfica de la Zona .....	37
Tabla 2. Especificaciones de los humedales. ....	38
Tabla 3. Caudales alimentados a los humedales.....	38
Tabla 4. Parámetros de calidad de agua residual a analizar, su método, frecuencia y número de registros en las dos etapas.....	39
Tabla 5. Códigos de identificación de los métodos de parámetros de calidad de agua residual. En el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.....	40
Tabla 6. Promedios de temperatura para la primera etapa.....	42
Tabla 7. Promedios de temperatura para la segunda etapa.....	43
Tabla 8. Promedios de pH para la primera etapa.....	44
Tabla 9. Datos de pH para humedales 1 y 2 en la segunda etapa.....	45
Tabla 10. Promedios de concentraciones de oxígeno la primera etapa.....	46
Tabla 11. Promedios de concentraciones de oxígeno disuelto la segunda etapa.....	47
Tabla 12. Datos de concentraciones de DQO para humedales 1 y 2 en la primera etapa.....	49
Tabla 13. Promedios de concentración de DQO para la segunda etapa.....	50
Tabla 14. Promedios de concentración de DBO <sub>5</sub> para la primera etapa.....	52
Tabla 15. Promedios de concentraciones de DBO <sub>5</sub> para la segunda etapa.....	54
Tabla 16. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para DQO y DBO <sub>5</sub> del humedal 1.....	63
Tabla 17. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para DQO y DBO <sub>5</sub> del humedal 2.....	63
Tabla 18. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para DQO y DBO <sub>5</sub> en la primera etapa.....	64
Tabla 19. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para DQO y DBO <sub>5</sub> en la segunda etapa.....	64
Tabla 20. Promedio de concentración de nitrógeno amoniacal la primera etapa.....	66
Tabla 21. Promedios de concentraciones de nitrógeno para la segunda etapa.....	67
Tabla 22. Promedio de concentraciones de para la primera etapa.....	68
Tabla 23. Promedio de concentraciones de nitritos para la segunda etapa.....	69
Tabla 24. Promedios de concentración de nitratos para la primera etapa.....	71
Tabla 25. Promedio de concentraciones de nitratos (NO <sub>3</sub> ) para la segunda etapa.....	72
Tabla 26. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total del humedal 1.....	78
Tabla 27. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total del humedal 2.....	78
Tabla 28. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total en la primera etapa.....	79
Tabla 29. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total en la segunda etapa.....	79
Tabla 30. Promedios de concentración de Sólidos Suspendidos Totales para la primera etapa.....	80
Tabla 31. Promedios de concentración de Sólidos Suspendidos Totales para segunda etapa.....	81
Tabla 32. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total del humedal 1.....	86
Tabla 33. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para sólidos suspendidos totales del humedal 2.....	86
Tabla 34. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total del humedal 1.....	87
Tabla 35. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total del humedal 1.....	87

# Índice de Anexos.

<i>Anexo 1. Datos recopilados.</i>	<u>95</u>
<i>Anexo 2 Tablas de contraste t-student y prueba Fisher.</i>	<u>103</u>
<i>Anexo 3. Registro de fotografía.</i>	<u>115</u>

## Resumen.

---

Desde los años de 1970 los humedales construidos se han utilizado en determinadas zonas (centro y norte de Europa) para tratar aguas residuales de pequeños municipios. En la actualidad estos sistemas se están aplicando de forma creciente en todo el mundo, tanto en los países del norte como del sur, para tratar aguas residuales de todo tipo. En los países del sur los humedales constituyen una alternativa francamente viable para abordar el problema del saneamiento.

En este trabajo se estudió el efecto del aumento de la carga hidráulica sobre la eficiencia de remoción de contaminantes en dos humedales construidos y sembrados con *guadua angustifolia* Kunt utilizando grava y arena como medio, dichos humedales se encuentran ubicados en la planta de tratamiento de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), ambos sistemas fueron alimentados con el agua residual originada en el campus de dicha universidad.

Se evaluaron dos humedales sembrados con la especie *angustifolia Kunth*, para diferentes condiciones de operación. La investigación se dividió en dos etapas, cada una caracterizada por una determinada carga hidráulica suministrada a cada sistema. Para evaluar la remoción de materia orgánica en ambas etapas se utilizó como análisis la demanda química de oxígeno (DQO) por el método volumétrico, demanda bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) por el método de autocontrol oxitop y sólidos suspendidos totales (SST) por el método gravimétrico, también se realizaron los análisis de nitrógeno Amoniacal por el método de destilación Kjeldahl (NTK) y nitritos y nitratos ambos por el método Fotométrico, todos estos parámetros se realizaron una vez por semana, sin embargo se realizó la medición diaria de algunos parámetros como fueron la medición de pH, temperatura y oxígeno disuelto.

En este documento se encuentra información pertinente acerca de los humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial, de su funcionamiento y aplicación en el tratamiento de aguas residuales; Así como la información necesaria para comprender los mecanismos que se llevan a cabo en el interior de este tipo de sistemas, también contiene los resultados de la investigación, los análisis de los mismos y algunas conclusiones y recomendaciones.

## INTRODUCCIÓN

---

Existe una gran presión sobre los recursos hídricos a nivel mundial. Según la UNESCO (2003) el 69% del agua dulce disponible en el planeta se destina a la agricultura, representa el 23% a la industria y el 8% al consumo doméstico. Diversos aspectos como la mala distribución temporal y espacial o la degradación determinan la actual situación que se resume en un gran desequilibrio entre la oferta existente y la creciente demanda de agua (Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010).

Las aguas residuales son el material resultante de la utilización del agua en actividades domésticas o de procesos industriales, las cuales por razones de salud pública, así como por razones de recreación, economía y estética, no deben ser desechadas o vertidas sin tratamiento a los cuerpos de agua. En la actualidad existen diferentes tipos de tratamientos con el fin de remover todo tipo de sustancias y de esta forma reducir las contaminaciones que estas pueden causar.

Existen tanto métodos biológicos como fisicoquímicos que permiten remover los contaminantes en aguas residuales domésticas, uno de ellos son los humedales artificiales los cuales hacen parte de los métodos biológicos.

Los humedales tienen un gran potencial de autodepuración gracias a la vegetación, suelo y la flora bacteriana. Desde hace algún tiempo se aprovechan para construir sistemas que imitan la naturaleza y depuran las aguas residuales de forma respetuosa con el entorno natural y tienen menos requerimientos energéticos. Entre los humedales se encuentran los artificiales los cuales son plantas que tratan el agua servida y los residuos industriales líquidos en forma natural.

El presente proyecto busca evaluar la eficiencia de dos humedales artificiales, uno con medio de grava y otro con medio de arena, construidos en la planta de tratamiento de la universidad tecnológica de Pereira. La eficiencia se determinará mediante el análisis de algunos parámetros importantes para el tratamiento de aguas residuales como:  $DBO_5$ , DQO, pH, Oxígeno disuelto, potencial redox, etc.

## MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 Aguas Residuales.

Son aquellas aguas que resultan del uso doméstico, agrícola o industrial del agua, las cuales contienen material disuelto y en suspensión. Tienen como características: producir olores desagradables, son putrescibles, ofensivas y representan un riesgo para la salud. Dependiendo de las características finales que se le deseen dar a las aguas residuales bien sea, por cumplimiento de aspectos legales o por conservación de los ríos y cuerpos de agua, se implementa un determinado sistema de tratamiento (Romero, 2004).

#### 1.1.1 Aguas Residuales Domesticas:

Se conocen como aguas residuales domésticas a aquellas utilizadas con fines higiénicos. Están constituidas principalmente por desechos corporales humanos (heces y orina), residuos sólidos grandes y pequeños, así como sólidos disueltos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación, también en residuos originados en establecimiento comerciales, públicos y similares (Romero 2004).



**Figura 1.** Aguas Residuales Domésticas. Fuente: Periódico Milenio, 2011.

### 1.1.2 Parámetros de Análisis en Aguas residuales.

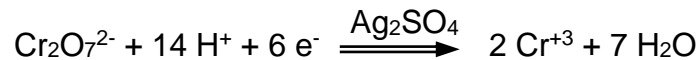
#### 2.2.1 Demanda bioquímica de oxígeno.

Se define como demanda biológica de oxígeno a la cantidad de oxígeno que los microorganismos especialmente bacterias consumen durante la oxidación de la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. Es un parámetro indispensable para determinar el estado o la calidad del agua de ríos, lagos, lagunas o efluentes. Como el proceso de descomposición varía según la temperatura, este análisis se realiza en forma estándar durante cinco días a 20°C; esto se indica como DBO<sub>5</sub> con valores numéricos expresados en mg/L (Romero, 2004).

#### 2.2.2 Demanda química de oxígeno.

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que se utiliza para controlar el grado de calidad de las aguas, permite medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable de una muestra. Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujo en solución fuertemente ácida con un exceso de dicromato de potasio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) en presencia de sulfato de plata (AgSO<sub>4</sub>) que actúa como agente catalizador, y de sulfato de mercurio (HgSO<sub>4</sub>) adicionado para remover la interferencia de los cloruros. Después de la digestión, el remanente de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> sin reducir se titula con sulfato ferroso de amonio; se usa como indicador de punto final el complejo ferroso de ortofenantrolina (ferroína). La materia orgánica oxidable se calcula en términos de oxígeno equivalente (Romero, 2004).

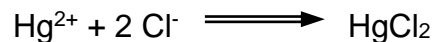
Las reacciones implicadas en la determinación de la DQO son estas:



Los cloruros interfieren:



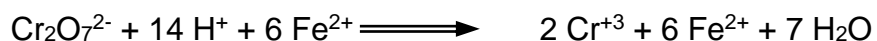
Para evitar la interferencia, se añade HgSO<sub>4</sub>:



Con HgSO<sub>4</sub> insuficiente:



Valoración con Sal de Mohr (Sulfato amónico ferroso):



La DQO es útil como parámetro de concentración orgánica en aguas residuales industriales o municipales tóxicas a la vida biológica y se puede realizar en solo tres horas (Romero, 2004).

### 2.2.3 Nitrógeno:

El nitrógeno presente en el agua residual se encuentra en sus formas de nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno en forma de nitritos y nitratos. Todas son formas interconvertibles bioquímicamente y componentes del ciclo del nitrógeno. Los datos del nitrógeno son necesarios para evaluar la tratabilidad de las aguas residuales por tratamientos biológicos; un agua residual insuficiente de nitrógeno puede requerir la adición de nitrógeno para su adecuada descomposición. En otros casos, cuando se exige control de eutrofización de las fuentes receptoras, la remoción de nitrógeno en el agua residual, puede ser una condición del tratamiento (Romero, 2004).

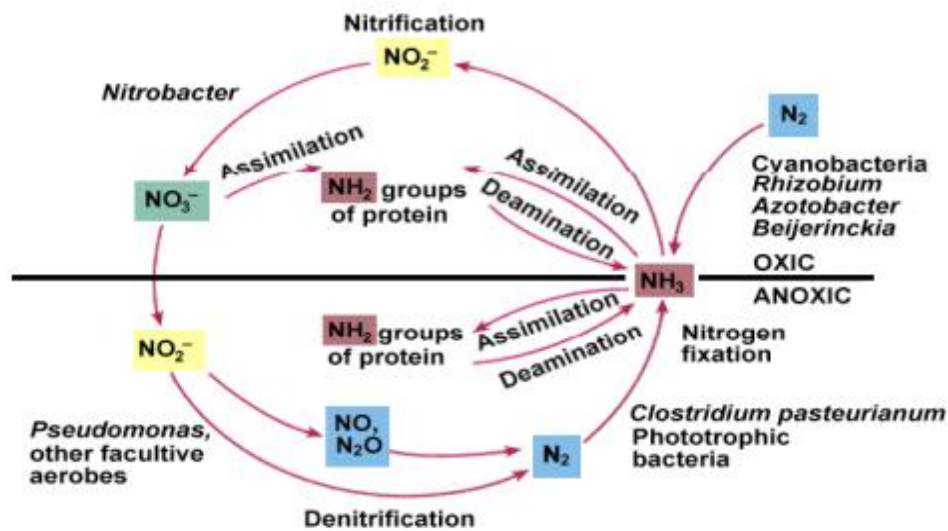


Figura 2. Ciclo de fijación del Nitrógeno. Fuente: Guangzhi Sun, 2012

En aguas residuales domésticas la forma predominante del nitrógeno es el nitrógeno orgánico, las bacterias descomponen este nitrógeno rápidamente en nitrógeno amoniacal, y si el medio es aerobio se descompone en nitritos y nitratos. El predominio de nitratos indica que el residuo se ha estabilizado con respecto a su demanda de oxígeno. Los nitratos sin embargo, pueden ser utilizados por las algas y otros organismos acuáticos para formar proteínas y por ello, puede necesitarse la remoción del nitrógeno para

prevenir dichos crecimientos. Se considera nitrógeno amoniacal todo el nitrógeno existente en solución como amoníaco o como ion amonio, dependiendo del pH de la solución.



La ecuación anterior indica que el amoníaco produce una solución básica cuando se disuelve en agua: sin embargo, a pH mayor de 9 predomina el ion amonio.

En aguas residuales domésticas la concentración de nitrógeno total puede ser de 30 a 100mg/L; la de nitrógeno amoniacal, de 5 a 20 mg/L; la de nitritos y nitratos menor de 1mg/L. En aguas residuales tratadas la concentración de nitratos puede ser del orden de 30 mg/L. La presencia de nitrógeno amoniacal en exceso de 1.600 mg/L es considerada inhibitoria para muchos microorganismos existentes en el proceso de lodos activados (Romero, 2004).

#### **2.2.4 Oxígeno Disuelto:**

El oxígeno disuelto es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios, así como para otras formas de vida. La solubilidad de oxígeno atmosférico en el agua dulce oscila entre 7mg/L a 35 °C y 14,6 mg/L a 0 °C para presión de una atmósfera. A menudo la capacidad auto purificador de los cuerpos de agua es limitada por la baja disponibilidad de oxígeno disuelto, en estos casos se hace necesario el tratamiento de las aguas residuales para su disposición en ríos y embalses.

La determinación de OD es el fundamento del cálculo de la DBO<sub>5</sub> y de la valoración de las condiciones de aerobividad de un agua. En general, todo proceso aerobio requiere una concentración de OD mayor de 0,5 mg/L. El suministro de oxígeno y las concentraciones de OD en tratamientos biológicos aerobios y aguas receptoras de aguas residuales son aspectos de mayor importancia en el diseño, operación y evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales. En aguas naturales, para evitar efectos perjudiciales sobre la vida acuática se recomienda emplear concentraciones mayores de 4 mg/L (Romero, 2004).

#### **2.2.5 Sólidos suspendidos totales:**

Los sólidos suspendidos totales o el residuo no filtrable de una muestra de agua natural o residual industrial o doméstica, se definen como la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103-105°C hasta peso constante (Cardona y Marín, 2009).

Los humedales construidos se han caracterizado por presentar una gran remoción de sólidos suspendidos, esto ocurre en gran parte, del 12 al 20%



del área inicial del sistema. Los humedales construidos pueden alcanzar remociones del 90 a 95% en un solo día produciendo efluentes con concentraciones inferiores a 10 mg/L (Londoño y Marín, 2009)

### **2.2.6 Temperatura.**

La temperatura de un humedal es una variable que afecta tanto las actividades físicas como biológicas de éste. Temperaturas menores a 10°C afectan las velocidades de remoción de DBO<sub>5</sub> y nitrógeno, mientras que temperaturas altas aumentan la tensión de vapor de saturación del agua, efecto que disminuye la solubilidad del oxígeno y genera una serie de reacciones químicas y biológicas que en algunos casos afectan el rendimiento de remoción de los humedales artificiales (Londoño y Marín, 2009).

### **2.2.7 Caudal (Q).**

El caudal, Q, se define como el volumen de agua que pasa por una sección en un determinado tiempo, t, es decir:  $Q = v/t$ . Es una variable de gran interés, puesto que su cuantificación se puede calcular rendimientos, consumos y planeaciones estratégicas para el trabajo en los humedales (Alianza por el agua, 2008 - manual de depuración de aguas residuales urbanas. Monográficos agua en Centroamérica, Ideasmares).

### **2.2.8 pH.**

La determinación del pH en el agua es una medida de la tendencia de su acidez o de su alcalinidad. La mayoría de las aguas naturales tienen un pH entre 4 y 9, aunque muchas de ellas tienen un pH ligeramente básico debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos. El valor del pH en el agua, es utilizado también cuando nos interesa conocer su tendencia corrosiva o incrustante (Londoño y Marín, 2009).

## **2.3 Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales:**

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales son aquellos que tienen como propósito separar o remover del vertimiento los constituyentes indeseables, así como también modificar las propiedades fisicoquímicas o biológicas del agua residual con el fin de alcanzar niveles compatibles con los requerimientos de la descarga (Collazos, 2008).

Los sistemas de tratamiento generalmente llevan a cabo procesos fisicoquímicos o procesos biológicos, que combinados adecuadamente o estando de manera independiente, pueden llegar a dar las características deseadas al agua residual para su posterior deposición en los cuerpos de agua (Collazos, 2008).

### **2.3.1 Clasificación según el grado de tratamiento:**

Cuando se agrupan los procesos y operaciones unitarias se constituyen los sistemas de tratamiento primario, secundario y terciario.

#### **2.3.1.1 Tratamiento preliminar:**

Es el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia puede provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos y operaciones (Romero, 2000).

#### **2.3.1.2 Tratamiento primario:**

Se refiere comúnmente a la remoción parcial de sólidos suspendidos y materia orgánica particulada mediante sedimentación o flotación, constituyendo una estrategia de preparar el agua residual para el tratamiento biológico. Por lo general, el tratamiento primario en un sistema convencional, remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y hasta un 40% de la DBO<sub>5</sub>, fundamentalmente particulada (Romero, 2000).

#### **2.3.1.3 Tratamiento Secundario.**

Cuando se habla de este tipo de tratamiento se refiere a la remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) soluble que por lo general escapa al tratamiento primario, además de remover cantidades adicionales de sólidos sedimentables. Este tratamiento permite remover aproximadamente el 85% de la DBO y los Sólidos Sedimentables aunque no remueve cantidades significativas de nitrógeno, fósforo, metales pesados, demanda química de oxígeno (DQO) y bacterias patógenas.

##### **2.3.1.3.1 Tratamiento secundario por procesos biológicos.**

Los tipos de tratamiento de aguas residuales que involucran procesos biológicos se han convertido en una alternativa tecnológica muy viable en países en vías de desarrollo como Colombia, ya que resultan eficientes y presentan bajos costos de implementación y mantenimiento. Los sistemas de tratamiento naturales se valen de procesos biológicos, en donde gracias a la interacción de elementos como: plantas, agua, suelo, microorganismos y atmósfera se pueden remover los contaminantes del agua residual. La actividad biológica se aprovecha para remover principalmente sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas del agua residual, mediante su conversión en gases que van a la atmósfera y en biomasa extraíble por medio de sedimentación, además también es posible remover nitrógeno y fósforo del agua residual (Romero 2004).

La implementación de un determinado sistema de tratamiento por métodos naturales dependerá entonces de los objetivos finales del tratamiento.

Algunos criterios importantes claves a la hora de seleccionar un sistema de este tipo son: las características del sitio, la topografía y las condiciones ambientales (Bernal *et al.*, 2003).

#### **2.3.1.4 Tratamientos terciarios.**

Remueven contaminantes específicos que generalmente son tóxicos o compuestos no biodegradables que se escapan del tratamiento secundario. Supone generalmente, la necesidad de remover nutrientes para prevenir la eutrofización de fuentes receptoras ambientalmente más sensibles o para mejorar la calidad de un efluente secundario con el fin de adecuar el agua para su reúso (Romero, 2000).

### **2.4 HUMEDALES.**

Los humedales naturales son complejos mosaicos de láminas de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con un nivel freático más o menos cercano a la superficie, en los cuales el suelo se mantiene saturado de agua durante un largo periodo de tiempo cada año. En los humedales crecen vegetales, animales y microorganismos especialmente adaptados a estas condiciones ambientales. Estos seres vivos, junto a procesos físicos y químicos, son capaces de depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo; por esta razón se ha llamado a los humedales “los riñones del mundo” (Lahora, 2001).



**Figura 2.** Humedales naturales, Bogotá. Fuente: [www.humedalesbogota.com](http://www.humedalesbogota.com)

## **2.5 Humedales Artificiales.**

Como medida ante el rápido crecimiento poblacional y desarrollo industrial se han venido implementando los humedales construidos para tratar las aguas residuales resultantes (Guangzhi Sun, 2012) de actividades domésticas e industriales. Los resultados que presentan este tipo de sistemas en cuanto a la remoción de nitrógeno y materia orgánica han sido muy buenos y han hecho que los humedales construidos ganen gran popularidad a nivel mundial. Los humedales construidos cuentan con la ventaja exclusiva de remover la mayor cantidad de contaminantes sin la necesidad de introducir energía al proceso de tratamiento (Bruch, 2011).

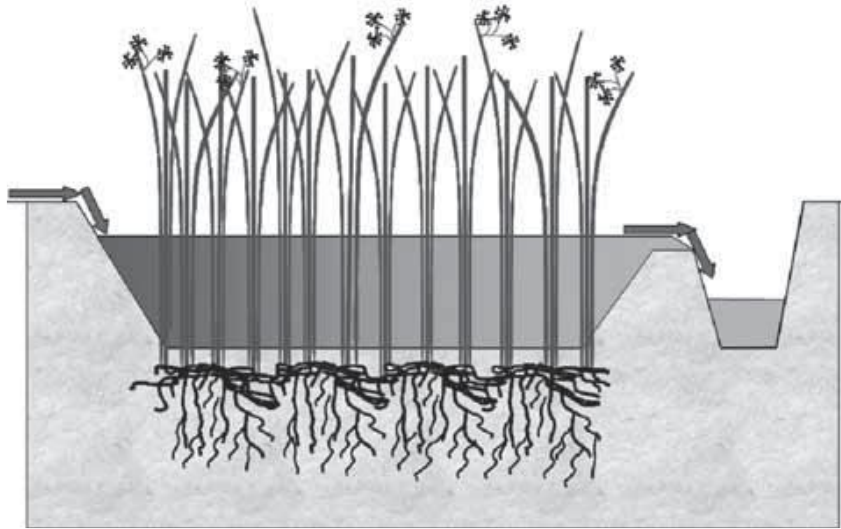
Los humedales construidos son sistemas de depuración pasivos naturales, constituidos por lagunas o canales poco profundos (generalmente menos de un metro) plantados con vegetación propia de zonas húmedas como micrófitos acuáticos y se caracterizan por su simplicidad de operación, bajo consumo energético, poca producción de residuos y una considerable integración al medio ambiente rural (García *et al.*, 2005).

En general, en la literatura se habla de dos tipos de humedales construidos referente a la presencia o no de una superficie libre de agua en contacto con la atmósfera: humedales de flujo superficial y los humedales de flujo subsuperficial. Estos últimos a su vez se dividen en dos tipos: de flujo vertical y flujo horizontal. Los más utilizados en el tratamiento de aguas residuales son los humedales de flujo superficial y humedales de flujo subsuperficial horizontal y en especial éste último ha tenido gran acogida a nivel mundial debido a los resultados que presentan (Kadlec, 2009).

### **2.5.1 Humedales con espejo de agua o de flujo superficial.**

Los sistemas de flujo superficial (conocidos en inglés como surface flow constructed wetlands o free water surface constructed wetlands) son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (no más de 0,6 m) y tienen plantas (Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010).

Los humedales de flujo superficial poseen vegetación densa compuesta por variedad de especies de plantas y típicamente tienen niveles de profundidad por el orden de 0,3m a 0,9m (Kadlec, 2009).

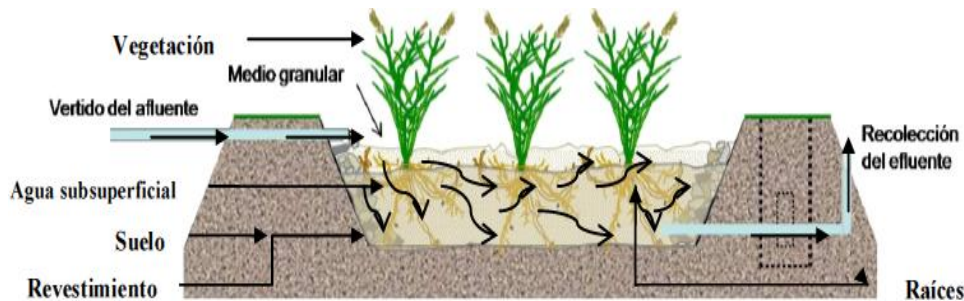


**Figura 3.** Humedal de flujo superficial. Fuente: Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010.

### 2.5.2 Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal.

Este tipo de humedales representan una de las alternativas de tratamiento natural de aguas residuales domésticas y/o municipales más estudiadas y utilizadas en diferentes países, ya que en comparación con los tratamientos físicos y químicos convencionales presentan menores costos de instalación y mantenimiento. Generalmente están contruidos en forma de canal en donde se encuentra el medio poroso adecuado para que le sirva de soporte a las plantas sembradas. (García *et al.*, 2005).

Se caracterizan por tener el nivel de agua por debajo de la superficie del soporte, el cual fluye horizontalmente y únicamente a través del lecho que sirve para el crecimiento de la película microbiana, que es la responsable en gran parte del tratamiento que ocurre, las raíces penetran hasta el fondo del lecho (Silva, 2005). El lecho puede estar relleno con arena, grava o suelo, donde crecen las plantas, que sólo tienen las raíces y rizomas en contacto con el agua. El valor más común en la profundidad del medio en estos humedales es de 0.6 metros (U.S. Environmental Protection Agency, 1993).



**Figura 4.** Esquema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. Fuente:

### 2.5.3 Comparación entre humedales de flujo superficial y flujo subsuperficial:

Para conocer las características que tienen los diferentes tipos de humedales artificiales tanto de flujo superficial como subsuperficial, se presenta a continuación el cuadro comparativo.

	<b>Flujo superficial</b>	<b>Flujo subsuperficial</b>
<b>Tratamiento</b>	Tratamiento de flujo secundario (aguas ya tratadas por otros medios, Ej: Lagunas, biodiscos, fangos, etc).	Para tratar flujos primarios (aguas pretratadas, ej: Tanques IMHOFF, pozos sépticos).
<b>Operación</b>	Operan con baja carga orgánica	Altas tasas de carga orgánica
<b>Olor</b>	Puede ser controlado	No existe
<b>Insectos</b>	Control es caro	No existe
<b>Protección Térmica</b>	Mala, las bajas temperaturas afectan el proceso de remoción.	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo el agua mantiene una temperatura constante.
<b>Área</b>	Requieren superficie de mayor tamaño	Requieren superficies de menor tamaño
<b>Costo</b>	Menor costo en relación al subsuperficial.	Mayor costo debido al material granular que puede llegar a incrementar el precio hasta un 30%.
<b>Valor Ecosistema</b>	Mayor valor como ecosistema para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna.	Menos valor como ecosistema para la vida, el agua es difícilmente accesible para la fauna.
<b>Usos Generales</b>	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas.	Tratamiento de aguas residuales principalmente en casas aisladas y núcleos menores a 200 habitantes
<b>Operación</b>	Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (usados para tratamientos terciarios y mejoramiento para la calidad del agua)	Puede usarse como tratamiento secundario

**Figura 5.** Comparación entre humedales de flujo superficial y flujo subsuperficial.  
Fuente: Delgado, Camacho, Pérez y Andrade, 201

En términos de costos, los humedales artificiales superficiales requieren menor inversión en relación a los de flujo subsuperficial ya que en los

primeros no se incurren en los gastos mayores: la impermeabilización y la provisión y colocación del sustrato.

## **2.5 Mecanismos de Remoción en Humedales Artificiales**

### **2.5.1 Remoción de Materia orgánica.**

La materia orgánica presente en forma de materia en suspensión sedimentable en las aguas residuales a tratar, se ira decantando paulatinamente en los humedales y experimentará procesos de degradación biológica. Igualmente, parte de la materia orgánica presente en forma particulada quedara retenida por filtración, al pasar las aguas por el entramado sustrato-raíces-tallos.

La eliminación de materia orgánica ya sea vía aerobia o anaerobia transcurre de forma rápida. En el caso de los HAFSSs, casi la mitad de la DBO<sub>5</sub> se elimina al pasar las aguas por lo primeros metros del humedal (Aguirre, 2004).

Sobre la materia orgánica disuelta, al igual que sobre la particulada, actúan los microorganismos presentes en el humedal, principalmente bacterias, que utilizaran esta materia orgánica a modo de sustrato.

En las distintas modalidades de humedales artificiales se dan zonas con presencia o ausencia de oxígeno molecular, por lo que la acción de las bacterias sobre la materia orgánica tiene lugar tanto a través de procesos biológicos aerobios, como anaerobios (Aguirre, 2004).

### **2.5.2 Remoción de Nitrógeno:**

En los sistemas de tasa baja o flujo subsuperficial, la remoción de nitrógeno ocurre como resultado de la incorporación del nitrógeno a los tejidos vegetales de los cultivos, por nitrificación/denitrificación, y en menor proporción por volatilización de amonio e incorporación de este en el suelo (almacenamiento en suelo). La nitrificación y la desnitrificación son dos procesos que ocurren inclusive en suelos aerobios, ya que estas condiciones promueven la nitrificación y las zonas anóxicas del suelo permiten la desnitrificación (Crites y Tchobanoglous, 2000).

### **2.5.3 Sólidos en suspensión:**

Los principales mecanismos que intervienen en la eliminación de la materia en suspensión en los humedales artificiales son:

**Sedimentación:** la materia en suspensión sedimentable (principalmente de naturaleza orgánica), presente en las aguas a tratar, decanta por la acción exclusiva de la gravedad.

Floculación: permite la sedimentación de partículas de pequeño tamaño, o de menor densidad que el agua, al producirse agregados de las mismas con capacidad para decantar.

Filtración: se produce la retención de materia en suspensión al pasar las aguas a través del conjunto que forman el sustrato y los rizomas, raíces y tallos de la vegetación (Aguirre, 2004).

Los mecanismos de remoción de contaminantes en los humedales construidos involucran procesos biológicos, químicos y físicos a través de rutas coexistentes, procesos que dependerán de los parámetros ambientales y operacionales (Guangzhi Sun, 2012). Estos sistemas están especialmente indicados para pequeñas comunidades rurales (Estrada, 2010).

Contaminantes	Mecanismos de Eliminación
<b>Sólidos Suspendidos</b>	- Sedimentación. - Filtración.
<b>Materia Orgánica</b>	- Degradación microbiana aerobia - Degradación microbiana anaerobia
<b>Nitrógeno</b>	- Amonificación seguido por nitrificación microbiana y desnitrificación - Asimilación por parte de las plantas. - Volatilización del amoniaco.
<b>Fósforo</b>	- Adsorción por parte del lecho. - Asimilación por parte de las plantas.
<b>Metales</b>	- Asimilación por parte de las plantas. - Intercambio Iónico

**Figura 6.** Principales mecanismos de eliminación y transformación de los contaminantes en los humedales construidos. Fuente: Mena *et al.*, 2005

Estos sistemas se pueden combinar con cualquier otro método de depuración, consiguiendo la eliminación complementaria de nutrientes. Están especialmente indicados para pequeñas comunidades rurales. El



nivel mínimo aceptable de tratamiento preliminar previo a un sistema de humedales es el equivalente al tratamiento primario. (Estrada, 2010).

## **2.6 Procesos Biológicos:**

### **2.6.1 Remoción Biológica de nutrientes:**

Dado que el nitrógeno puede causar impacto en la calidad del agua que los recibe, la descarga de este debe ser controlada con frecuencia. El nitrógeno puede estar presente en las aguas residuales de varias maneras (por ejemplo, en forma orgánica, amoníaco, nitratos y nitritos). La mayoría del nitrógeno disponible, en efluentes de agua residual doméstica se presenta en su gran mayoría como nitrógeno orgánico o de amoníaco. La concentración total habitual de este es de alrededor de 25 a 35 mg/L de concentración en estas. En el tratamiento de aguas residuales, cerca del 20% del nitrógeno total se decanta durante la sedimentación primaria. Durante el tratamiento biológico, una porción de nitrógeno orgánico se convierte en nitrógeno amoniacal, una parte de la cual se incorpora a las células biológicas que son extraídas del flujo del agua tratada antes de la descarga, retirando así otro 20% del nitrógeno entrante. Normalmente el 60% restante se descarga en aguas receptoras (Crites y Tchobanoglous, 2000).

### **2.6.2 Remoción biológica de nitrógeno:**

En las aguas residuales urbanas el nitrógeno puede encontrarse principalmente en forma orgánica y en forma amoniacal y, en mucha menor cuantía, como nitritos o nitratos.

Mediante procesos de amonificación, por vía enzimática, las fracciones de nitrógeno en forma orgánica se transforman en formas amoniacaes, parte de las cuales son asimiladas por los propios microorganismos, que la incorporan a su masa celular.

En los humedales artificiales la eliminación del nitrógeno en forma amoniacal transcurre básicamente por dos vías principales: asimilación por las propias plantas del humedal y procesos de nitrificación-desnitrificación. En el caso de la asimilación del nitrógeno amoniacal por las plantas del humedal, numerosos estudios han concluido que mediante esta asimilación y la posterior siega de las plantas no se llega a eliminar más allá del 15-20% del nitrógeno amoniacal presente en las aguas a tratar. Si no se procede a la siega y retirada periódica de la vegetación de los humedales, la mayor parte de los nutrientes retenidos volverán a las aguas mediante procesos de degradación de la biomasa vegetal. Por tanto, la principal vía de eliminación del nitrógeno amoniacal en humedales artificiales transcurre mediante procesos combinados de nitrificación-desnitrificación (Alianza por el agua, 2008).

### 2.6.2.1 Nitrificación Biológica:

La nitrificación es un proceso autotrófico (la energía necesaria para el crecimiento bacteriano se obtiene de la oxidación de compuestos inorgánicos), por el que el nitrógeno amoniacal es transformado en nitrógeno nítrico.

El proceso se desarrolla en dos etapas. En un primer momento bacterias del género Nitrosomas oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrógeno nitroso, de acuerdo con la reacción:



Posteriormente, bacterias del género Nitrobacter oxidan las formas nitrosas a formas nítricas, de acuerdo con:



Englobando el proceso de nitrificación en una única ecuación se obtiene:



Siendo necesarios 4,6 mg de oxígeno para oxidar 1 mg de N-amoniacal y consumiéndose una gran cantidad de alcalinidad (8,6 mg de  $\text{HCO}_3^-$  - por cada mg de N-amoniacal oxidado).

Las bacterias nitrificantes son organismos extremadamente sensibles a gran cantidad de sustancias inhibitoras, tanto orgánicas como inorgánicas, que pueden impedir el crecimiento y la actividad de estos organismos. Las altas concentraciones de amoniaco y de ácido nitroso ( $\text{HNO}_2$ ) pueden resultar inhibitoras, siendo también importante el efecto del pH, cuyo intervalo optimo es estrecho, entre 7,5 y 8,6 (Alianza por el agua, 2008).

### 2.6.2.2 Desnitrificación Biológica:

La desnitrificación se realiza por bacterias facultativas heterótrofas (Achromobacter, Aerobacter, Alcaligenes, Bacillus, Brevibacterium, Flavobacterium, Lactobacillus, Micrococcus, Proteus, Pseudomonas, Spirillum), en condiciones de anoxia y en dos etapas. En un primer paso se produce la conversión del nitrato en nitrito y a continuación, pasa a formas gaseosas que escapan del sistema hacia la atmosfera (óxido nítrico, óxido nitroso y nitrógeno gas):



En los sistemas de desnitrificación, el parámetro crítico es la concentración de oxígeno disuelto cuya presencia suprime el sistema enzimático necesario para el desarrollo del proceso de desnitrificación.

El pH óptimo para el proceso de desnitrificación se sitúa en el intervalo 7-8, viéndose afectado el proceso por la temperatura. El proceso requiere, igualmente, la presencia de carbono orgánico en cantidad suficiente, admitiéndose que para reducir 1 g. de nitrato, se necesitan 3 g. de DBO<sub>5</sub> no decantable. En los HAFSs vertical se potencian los procesos de nitrificación debido, fundamentalmente, a que se alimentan de forma intermitente, lo que favorece un lecho más oxidado y, por tanto, más eficiente. La adopción de sistemas combinados de humedales con diferentes características de flujo, HAFSs vertical seguidos de HAFSs horizontal, permite mejorar notablemente la eliminación de nitrógeno, al favorecerse en la primera etapa la nitrificación y la desnitrificación en la segunda (Alianza por el agua, 2008).

## **2.7 *Guadua Angustifolia* KUNTH:**

La Guadua es un producto forestal cuyo uso en la construcción del paisaje campesino Colombiano ha sido tradicional durante muchos años. Sin embargo, solo desde poco tiempo su importancia económica y social está siendo valorada. En la zona cafetera y, en general, en la región Andina colombiana la guadua es un producto significativo en la construcción de viviendas, puentes, canaletas, acueductos, y en la elaboración de artesanías, utensilios de cocina e instrumentos musicales. Además ha recibido un importante apoyo en las corporaciones autónomas regionales dadas sus características ecológicas que le permiten ser una fuente importante de agua. Igualmente es importante en la regulación de los caudales, así como la captura de CO<sub>2</sub>, y en la purificación del medio ambiente (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2005)

La *guadua angustifolia* Kunth constituye el género de bambú nativo más importante de Colombia y América tropical, es un excelente recurso renovable de rápido crecimiento y fácil manejo. Llama la atención que en algunos países de América se le ha dado múltiples usos al bambú, entre ellos está el uso para depuración de aguas residuales con humedales artificiales, así como el hecho de que a partir de las hojas de bambú principalmente *Phyllostachys nigra* var. *henonis*, se han aislado y caracterizado compuestos con actividad antioxidante (Revista Cubana de Plantas Medicinales, 2011).

La guadua es de la familia de los pastos, es un pasto gigante que más crece en el mundo y puede alcanzar hasta 30 metros de altura y un grosor hasta de 30 cm (Ministerio de agricultura y desarrollo rural, 1999). Ha sido el bambú leñoso y nativo más útil para el hombre colombiano. Sin este

recurso el desarrollo de la zona cafetera de Colombia habría sido totalmente diferente. La guadua es una especie forestal representada por esbeltos y modulados tallos que enaltecen el paisaje de los valles interandinos es larga, recta, uniforme en su desarrollo, liviana, hueca, resistente, suave, de rápido crecimiento, de bello color e imperceptiblemente cónica (Marín y Correa, 2010).

### **2.7.1 Importancia económica, ecológica y social:**

Colombia ocupa el segundo lugar en diversidad de bambú en Latinoamérica. Actualmente, 9 géneros y 70 especies están reportados, siendo 24 especies endémicas y por lo menos aún 12 por describir. La región andina tiene la mayor cantidad y la más grande diversidad en población de especies de árboles (89%) y la cordillera oriental la más rica, con el 55% de bosques de bambú reportados hasta ahora. Los departamentos de Colombia con mayor diversidad de bosques de bambú son Norte de Santander, Cundinamarca, Cauca, Valle del Cauca, Antioquia, Huila, Nariño y Quindío. La guadua es el bambú nativo de mayor importancia en el país. Es un excelente recurso renovable de rápido crecimiento y fácil manejo, que brinda beneficios económicos, sociales y ambientales a las comunidades rurales en el país. La guadua ha acompañado el desarrollo de la caficultura colombiana como el principal componente ambiental que hace parte del paisaje. Se estima que entre 1993 y el 2002 la guadua generó recursos que ascienden a la suma de 8.611 millones de pesos del 2003. Según las corporaciones autónomas regionales se deben haber aprovechado 3.075.592 millones de guaduas en pie, de las cuales se obtuvieron aproximadamente 12.302.368 piezas comerciales (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2005).

En cuanto a los beneficios ambientales, la guadua es agua, captura de CO<sub>2</sub> y producción de oxígeno que puede ser aprovechada en la protección de cuencas y microcuencas (el anterior es un aspecto de gran importancia en el desarrollo del protocolo de Kyoto). Asimismo, es una fibra calificada como “acero vegetal” por el científico director del Instituto de Ingeniería Estática de la Universidad de Bremen y ha sido utilizada ya en Japón por la industria de fibrocemento para reemplazar la fibra de asbesto. Igualmente, es una de las mejores materias primas para la producción de pisos y, muy útil para la construcción de vivienda en cualquier estrato de la población. Después del sismo registrado en enero de 1999 en el Eje Cafetero, este material demostró que por sus cualidades físico-mecánicas cuando se utiliza adecuadamente es muy resistente a estos eventos. Es así como ha sido utilizado masivamente en diferentes proyectos de reconstrucción en esta región (Corpocaldas, 2002).



**Figura 7.** Almacenamiento para el transporte de la guadua. Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2005

La guadua (*Guadua Angustifolia* Kunth) es una de las especies de bambú de mayor demanda y mejor aceptación por parte del sector productivo, dada su fácil capacidad de propagación, rápido crecimiento, utilidad y tradición para trabajar sus productos y el enorme potencial para la construcción, elaboración de muebles, artesanías, fabricación de papel, pisos, modulares, combustible y sus características benéficas para el medio ambiente (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2005).

### **2.8 VENTAJAS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES:**

Ventajas de los Humedales Artificiales (Wissing y Hoffman, 2002):

- Técnica sencilla
- Bajo costo de inversión en comparación con tecnologías de tratamiento convencionales
- Costos de mantenimiento y operación prácticamente despreciables
- No requiere de la adición de productos químicos
- Gasto energético nulo o muy bajo en dependencia de la topografía
- Vida útil superior a los 40 años
- Sistema versátil y altamente flexible que permite tratar muchos tipos de aguas residuales, así como amplias variaciones en las características del agua residual

- Sistema compacto que en forma integral agrupa procesos de biofiltración, degradación aerobia, degradación anaerobia y tratamiento de lodos en un mismo elemento de tratamiento
- No produce malos olores, dado que el flujo de agua residual fluye subsuperficialmente
- El sistema puede integrarse al paisaje natural de la zona donde se ubique

### **2.9 LIMITACIONES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES:**

Limitaciones de los Humedales Artificiales (Ocrospoma, 2011)

- Requieren áreas relativamente grandes
- Criterios de diseño y operación imprecisos
- Complejidad Biológica e Hidrológica.
- Diferencia en funcionamiento con el cambio de estaciones
- Requiere una mínima cantidad de agua para que sobrevivan, pero no soportan estar completamente secos.

## JUSTIFICACIÓN

---

Las aguas residuales son el material resultante de la utilización del agua en actividades domésticas o su utilización en procesos industriales, las cuales por razones de salud pública, así como por razones de economía y estética, no deben de ser descartadas o vertidas a ríos o corrientes convencionales. En la actualidad son vertidas a los ríos y otros cuerpos de agua, generando en mayor parte gran contaminación debido a que no reciben un tratamiento específico.

El tratamiento de aguas residuales es una cuestión prioritaria en cualquier parte del mundo debido a que es importante disponer de un agua con una buena calidad y en cantidad suficiente, permitiendo una mejora del medio ambiente, la salud y la calidad de vida.

En la actualidad existen diferentes alternativas de tratamiento para la remoción de contaminantes de aguas residuales, siendo uno de ellos el tratamiento mediante humedales artificiales, este mecanismo tiene grandes ventajas debido a que permite reducir costos e inversiones en cuanto a la utilización de plantas de tratamiento, los humedales construidos se caracterizan por su fácil manejo y mantenimiento en comparación con sistemas físicos, químicos y biológicos convencionales. Los humedales construidos pueden depurar las aguas municipales, industriales y lluvias, son eficaces en la eliminación de contaminantes del agua, como sólidos suspendidos, nitrógeno, fosforo, hidrocarburos y metales. Son una tecnología efectiva y segura para el tratamiento y recirculación del agua si se mantienen y operan en condiciones adecuadas (Miranda, 2000).

Los humedales construidos desde hace años se construyen en Europa con el fin de depurar las aguas residuales de pequeños núcleos urbanos. Su uso se encuentra exclusivamente en el norte de Europa en donde continuamente se ensayan e investigan diferentes estructuras de humedales construidos buscando mejores resultados.

En Colombia se han llevado a cabo diversas investigaciones acerca de los humedales artificiales algunas de ellas son: “Remoción de contaminantes de aguas residuales con humedales artificiales de flujo subsuperficial” (Arroyabe, 1997), realizado en la Universidad de los Andes, Bogotá; utilizando las especies junco (*Scirpus californicus*) y la enea (*Typha angustifolia*).

“Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética (Londoño y Marín, 2009), Universidad Tecnológica de Pereira, en la cual se utilizó la guadua *Phragmites australis*. “Evaluación de la remoción de la materia orgánica en filtros anaerobios de flujo ascendente utilizando aguas residuales sintéticas” (Osorio y Vásquez, 2007), universidad

tecnológica de Pereira; En el cual evaluaron la capacidad de degradación de materia orgánica en agua residual sintética, utilizando tres humedales de flujo subsuperficial con diferentes medios (Grava y arena) usando guadua *Angustifolia Kunth*. “Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas Residuales en humedales artificiales utilizando la *Guadua Angustifolia Kunt*” (Marín y Correa, 2010), universidad tecnológica de Pereira; En el cual evaluaron la remoción de contaminantes del agua residual de la Universidad Tecnológica de Pereira, utilizando dos humedales artificiales, uno con grava y otro con arcilla ambos sembrados con *Guadua Angustifolia Kunt*.

La *Guadua Angustifolia Kunth* es una gramínea gigante que pertenece a la gran familia del Bambú. Clasificada por Humboldt Bonplant como *Bambusa guadua* (Giraldo, 1999).

La *Guadua Angustifolia Kunth* es endémica de América y se considera como nativo de Colombia, Venezuela y Ecuador. En Colombia la *Guadua* se encuentra distribuida a lo largo de la Cordillera Central y la zona céntrica del país en los departamentos de Antioquia, Cauca, Caldas, Cundinamarca, Huila, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca. . Existe tanto en la región tropical como en la subtropical, pero se encuentra en mayores áreas en los bosques húmedos y muy húmedos concentrándose en las 33 laderas de montaña y en las riberas de los ríos. La *Guadua Angustifolia Kunth* se desarrolla muy bien entre los 0 y 1.600 metros, pero también crece en buenas condiciones hasta los 1.800 m, por encima de esta altura hasta los 2.000 m, los rendimientos son más bajos.



## OBJETIVOS

---

### **4.1 OBJETIVO GENERAL.**

Evaluar el efecto del aumento de la carga hidráulica sobre la eficiencia de remoción de contaminantes de tipo orgánico en aguas residuales domésticas en dos humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal sembrados con *Guadua angustifolia* Kunth, y dos medios filtrantes (grava y arena).

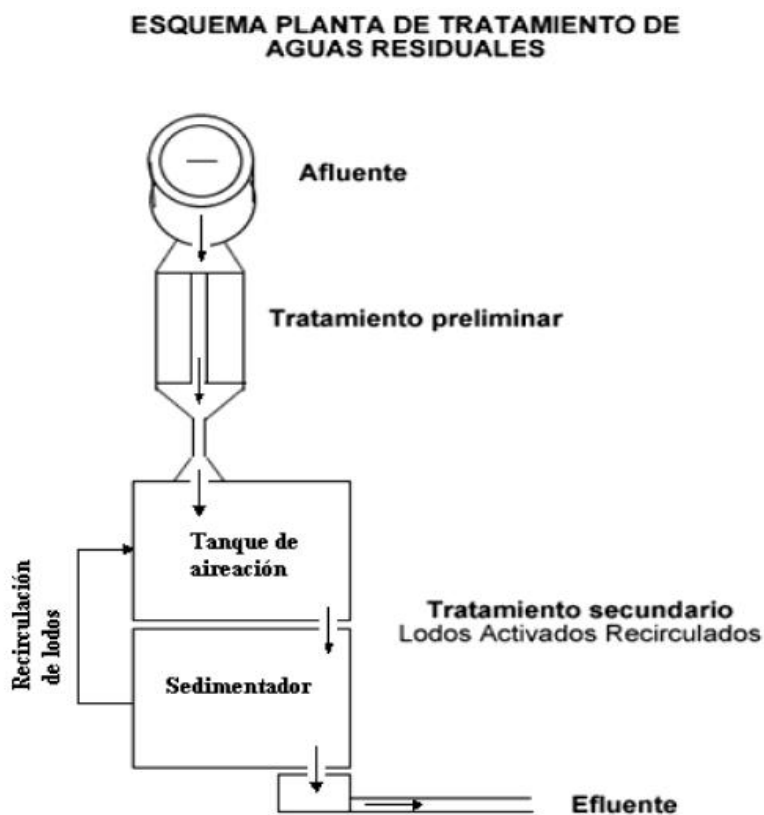
### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Evaluar parámetros fisicoquímicos de calidad en el agua residual doméstica: DBO<sub>5</sub> (Demanda Biológica de Oxígeno), DQO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), Nitrógeno Total y SST (Sólidos Suspendidos Totales).
- Determinar la influencia del incremento de la carga hidráulica en la remoción de contaminantes en el agua residual doméstica a tratar.
- Identificar cuál de los dos medios filtrantes (grava o arena), presenta una mayor capacidad de remoción de contaminantes en los humedales construidos de acuerdo a los resultados obtenidos.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 Planta de Tratamiento

La Universidad Tecnológica de Pereira actualmente cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, que busca tratar el agua contaminada antes de ser vertida a la quebrada el Bosque. El sistema de tratamiento cuenta con una unidad preliminar que busca la remoción de todos los sólidos de gran tamaño, así como un sistema de lodos activados con recirculación (tanque de aireación y tanque de sedimentación), permitiendo que cerca del 80% del agua residual generada en la Universidad sea vertida a la quebrada en mejores condiciones, ya que el último estudio donde se evaluó la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira mostró porcentajes de eficiencia del 90,06% y 89, 88% para remoción de DQO y DBO<sub>5</sub> respectivamente, lo que quiere decir que las cargas contaminantes del efluente son mucho menores a las del afluente (Caro *et al.*, 2009).



**Figura 8.** Esquema planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. Fuente: Marín y Correa, 2010

En las instalaciones de dicha planta de tratamiento, se encuentran las dos unidades experimentales que fueron objeto de estudio, las cuales son dos humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, que anteriormente habían sido utilizados como sistemas experimentales para el tratamiento terciario del efluente de la planta de tratamiento.

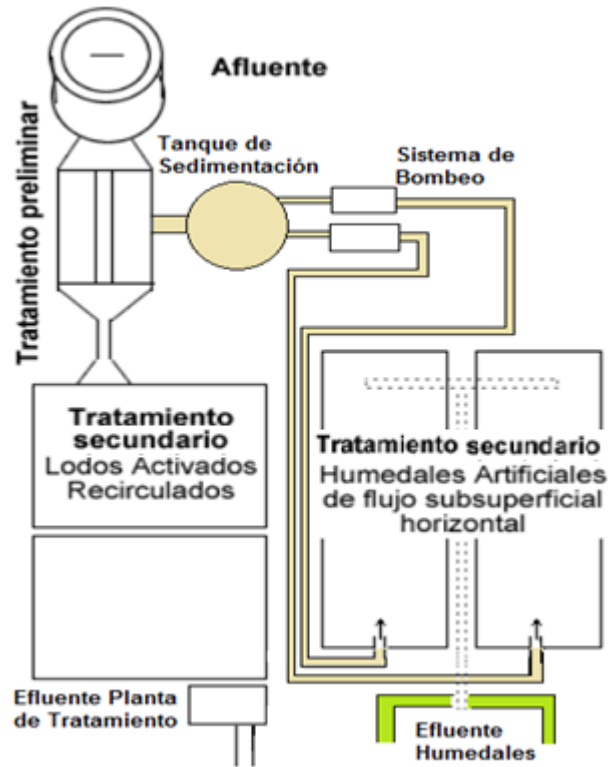
Para este estudio, se usaron estos sistemas como unidades de tratamiento secundario, es decir, no se alimentaron con el agua residual ya tratada por el sistema de lodos activados, sino con el agua residual cruda, después de ser sometida a un proceso de sedimentación primaria.



**Figura 9.** Humedales de flujo subsuperficial. Fuente: Autores

## **5.2. Descripción del Sistema.**

Es allí, en la planta el lugar en donde se encuentran las unidades experimentales utilizadas para este proyecto, las cuales son dos humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con diferentes medios filtrantes (grava y arena), que se utilizarán como tratamiento secundario. Estos humedales son alimentados con una pequeña parte del afluente de la planta de tratamiento, y sus efluentes son vertidos junto con el efluente de la planta de tratamiento. (*Ver figura 11*)



**Figura 10.** Esquema planta de tratamiento y humedales artificiales.  
Modificado: (Marín y Correa, 2010).

En general el sistema consta de dos partes principales: el tanque de sedimentación de sólidos y los humedales construidos como tal. El agua residual doméstica que alimentaba al tanque de sedimentación primario era tomada directamente del afluente de la P.T.A.R. y llegaba al tanque mediante una tubería que se encontraba conectada con el flujo principal del afluente de la P.T.A.R.



**Figura 11.** Tanque de Sedimentación. Fuente: Autores

Seguido de la sedimentación primaria el agua residual doméstica a tratar (afluente en estudio) era llevado a los humedales mediante un sistema de bombeo que consta de dos bombas peristálticas, una para cada humedal, y de esta forma regular el caudal de entrada, punto fundamental en este estudio.

Luego de que el agua realizará su recorrido a través del respectivo humedal y se diera la remoción de contaminantes y materia orgánica ésta sale como efluente gracias a un conjunto de tuberías interno ubicado al lado posterior de la entrada del agua.

## 5.2 Unidades Experimentales:

Este Proyecto se llevó a cabo en la Universidad Tecnológica de la ciudad de Pereira, la cual tiene una ubicación y presenta unos datos geográficos que se ilustran en la tabla 1.

UBICACIÓN Y DATOS GEOGRÁFICOS DE LA ZONA	
<b>Latitud</b>	4° 48' 51,40" N
<b>Longitud</b>	75° 41' 40,41" W
<b>Altitud</b>	1411 msnm
<b>Temperatura</b>	23°C

Tabla 1. Datos y ubicación geográfica de la Zona

Los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, están construidos en concreto (canales rectangulares de 4,48 m de largo, 1,06 m de ancho y 1 m de profundidad); se encuentran acondicionados con un lecho de arena y otro con lecho de grava, los cuales tienen sembrados 20 chusquines de *Guadua angustifolia Kunth*.

La estructura de entrada del afluente, consiste de una llave de paso tipo grifo que permitirá regular manualmente el caudal del afluente de cada humedal, este grifo llevará el agua hacia uno de los costados del humedal, y allí el agua realizará su recorrido al interior del humedal permitiendo que ocurra la fitorremediación. Después del proceso de saneamiento por acción conjunta de las plantas y los microorganismos ésta saldrá como efluente por el otro costado del humedal por medio de un tubo con múltiples perforaciones

### 5.2.1 Especificaciones Humedales.

Especificaciones	Humedal 1	Humedal 2
Medio Filtrante	grava	arena
Porosidad en %	31%	42%
Pendiente del lecho %	1	1

Tabla 2. Especificaciones de los humedales.

### 5.3 Etapas de seguimiento.

Para el cumplimiento del primer y segundo objetivo específico, el estudio se desarrolló en dos etapas:

- En la primera se trabajó con una alimentación a los humedales con una carga hidráulica baja, la cual se controló mediante el caudal aplicado a los humedales, con el cual se mantuvo tiempos de retención hidráulicos iguales para los dos sistemas.
- En la segunda etapa se incrementó la carga hidráulica (se duplicó el caudal aplicado a cada humedal respectivamente) para evaluar el efecto de ésta sobre la remoción de contaminantes en el agua residual doméstica generada en el campus universitario.

Cabe mencionar que debido al calendario establecido en la Universidad, en parte de la segunda etapa de seguimiento hubo una disminución en la población estudiantil que frecuentaba la Universidad debido al periodo vacacional, situación que se tendrá en cuenta posteriormente en los análisis de resultados.

	Caudales (ml/min)	
	Humedal 1 (Lecho de grava)	Humedal 2 (Lecho de arena)
Etapa 1	128	153
Etapa 2	256	306

Tabla 3. Caudales alimentados a los humedales.

### 5.4.Muestreo.

#### 5.4.1 Zona de muestreo.

En total, el muestreo se realizó en tres zonas del sistema de forma puntual:

- La primera zona de muestreo de agua residual: a la entrada de los humedales artificiales, la misma muestra para ambos, después de haber salido del tanque de sedimentación.
- La segunda zona de muestreo: en la salida del humedal con lecho de grava.



- La tercera zona de muestreo: en la salida del humedal con lecho de arena.

#### 5.4.2 Tamaño de muestra.

El tamaño de las muestras tomadas en cada uno de las zonas de muestreo fue de 4L y se recolectaron en envases plásticos (polipropileno).

#### 5.4.3 Frecuencia de muestreo.

La frecuencia de muestreo fue de una vez por semana, durante la cual se realizaron también los análisis de los parámetros de calidad en agua residual.

#### 5.5 Parámetros a analizar.

En la tabla 4, se presenta en forma general los métodos, la frecuencia y el número de registros para las etapas y parámetros que se analizaron, esto de acuerdo al primer objetivo específico.

Parámetros.	Método.	Frecuencia.	No. Registros
<b>DBO<sub>5</sub>.</b>	Método Oxitop	Semanal.	12
<b>DQO.</b>	Reflujo micro cerrado	Semanal.	12
<b>SST.</b>	Gravimétrico	Semanal.	12
<b>Nitrógeno (NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>)</b>	Colorimétrico	Semanal.	12
<b>Oxígeno disuelto.</b>	Potenciométrico	Diario	60
<b>pH</b>	Potenciométrico	Diario	60
<b>Temperatura.</b>	Termómetro	Diario	60
<b>Caudal.</b>	Aforo Volumétrico.	Diario	60

Tabla 4. Parámetros de calidad de agua residual a analizar, su método, frecuencia y número de registros en las dos etapas.

En la tabla 5, se presentan también los códigos de los métodos y técnicas a seguir:

Parámetro.	Código	
DBO <sub>5</sub> .	5210-B	
DQO.	5220-C	
SST.	2540-D	
Nitrógeno	NH <sub>3</sub>	4500-NH <sub>3</sub> -C.
	NO <sub>2</sub>	4500-NO <sub>2</sub> -B.
	NO <sub>3</sub>	4500- NO <sub>3</sub> -B.

Tabla 5. Códigos de identificación de los métodos de parámetros de calidad de agua residual. En el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

### 5.5 Análisis Estadístico:

El análisis estadístico que se empleó para llevar a cabo la evaluación de estos dos sistemas en ambas etapas, fue un análisis estadístico básico, en donde se trabajaron los datos comparando los promedios de las cargas y sus desviaciones estándar, sus valores máximos y mínimos para cada uno de los parámetros, así como también un análisis estadístico de contraste F, y un t-student de dos colas, esto con el fin de establecer si había diferencias significativas, en varianzas y medias, en cuanto a los resultados obtenidos en ambas etapas de la investigación.



## RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

### 6.1 Condiciones de Operación de los humedales:

Para la discusión y análisis de resultados se debe tener en cuenta cómo operan los humedales, permitiendo establecer los cambios o transformaciones que se pueden dar en el transcurso del estudio. Estos cambios o transformaciones están determinados por algunos componentes tales como: el caudal, tiempo de retención, variación en las concentraciones de contaminantes en el afluente, el clima en la zona, etc. Los cuales marcaron la operación del humedal en el transcurso de la investigación.

#### 6.1.1 Tiempos de retención y comportamiento del caudal.

La investigación constó de dos etapas, cada una de ellas con una duración de 6 semanas, para cada etapa se operó con diferente carga hidráulica. Para la primera etapa se utilizó un caudal de 128 mL/min para el humedal 1 (Lecho de grava) y 154 mL/min para el humedal 2 (Lecho de arena). Posteriormente en la segunda etapa se procedió a duplicar la carga hidráulica para cada humedal, 256 mL/min para el humedal 1 (Lecho de grava) y 308 mL/min para el humedal 2 (Lecho de arena). Teniendo en cuenta los diferentes caudales utilizados en ambas etapas se determinaron los correspondientes tiempos de retención hidráulico, para la primera etapa se tienen tiempos de retención alrededor de 6 y 4 días para el humedal de grava y arena respectivamente, para la segunda etapa se tienen tiempos de retención de aproximadamente 3 y 2 días para el humedal de grava y arena respectivamente. Se realizaron diariamente mediciones de caudal para llevar el control operativo de los humedales. Los caudales de entrada mantuvieron un comportamiento controlado, aunque algunas veces se presentaron inconvenientes ya que se tapaban las mangueras que conectaban la motobomba y el humedal, pero en general se puede decir que no hubo variaciones demasiado grandes.

### 6.2 Temperatura.

#### Primera etapa:

Para la temperatura los valores promedios no presentan variaciones considerables debido a que los datos se mantuvieron estables a través de la etapa de estudio, además se denota como el comportamiento tanto de la entrada como de las salidas no tuvieron máximos ni mínimos muy alejados del promedio de operación correspondiente. El rango de temperatura determinado para ambos humedales es adecuado para la remoción eficiente de materia orgánica (Kadlec, 1996).

Temperatura (°C)	Entrada	Salida H.1	Salida H.2
<b>Promedio</b>	22.9	21.9	21.9
<b>Máx.</b>	25	24	24
<b>Mín.</b>	20	20	20

Tabla 6. Promedios de temperatura para la primera etapa.

En la figura 13 se observa el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo, se nota claramente que la temperatura del afluente con respecto a los efluentes es mayor, esto se debe a la configuración del sistema de bombeo del tanque hacia los humedales (*ver diseño metodológico*) ya que las mangueras que se utilizaban para el transporte del agua quedaban expuestas al sol por lo tanto se daba un calentamiento del agua en este punto. Se observa un comportamiento muy estable para la temperatura de los efluentes

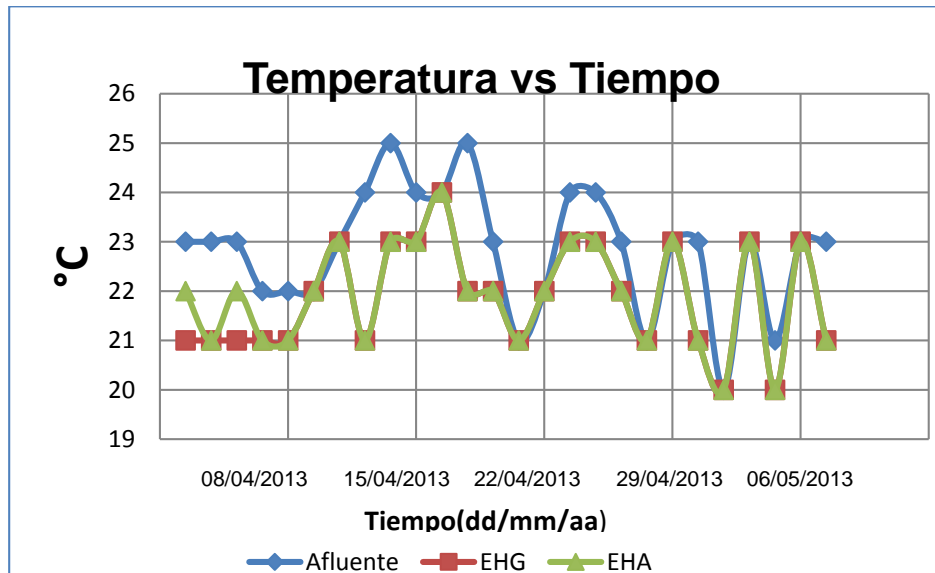


Figura 12. Comportamiento de la temperatura a través del tiempo para la primera etapa.

### Segunda etapa:

Al analizar los promedios para la segunda etapa no se aprecia una variación considerable con respecto a la primera etapa, los valores máximos y mínimos permanecen sin mucha variación entre estos.

Temperatura (°C)	Entrada	Salida H.1	Salida H.2
Promedio	22.7	21.2	21.2
Máx.	24	23	23
Mín.	21	20	20

Tabla 7. Promedios de temperatura para la segunda etapa.

La figura 14 se ilustra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo, se puede deducir que las mediciones no presentan variaciones considerables con respecto a la primera etapa, por lo tanto se concluye que ambas etapas mantuvieron un comportamiento similar a través de la investigación.

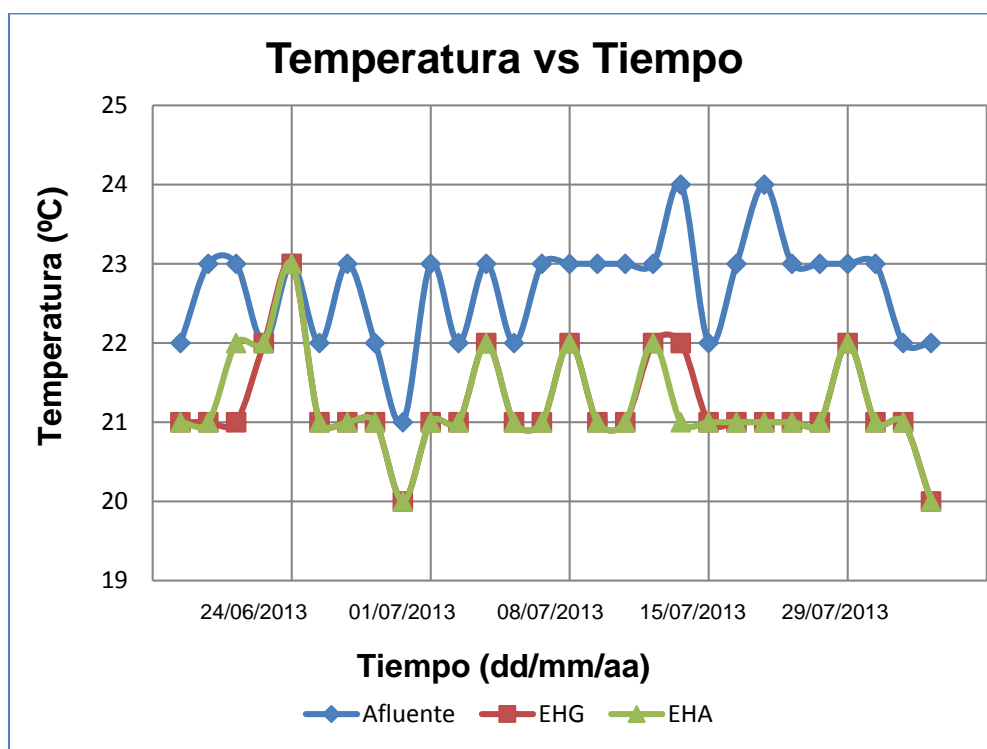


Figura 13. Comportamiento de la temperatura a través del tiempo para la segunda etapa.

#### pH:

La medida del pH en humedales es fundamental para la determinación de las acciones de factores bióticos, abióticos y bioquímicos llevados a cabo en el interior del humedal. Generalmente se estima que aguas residuales con pH bajos, son muy difíciles de tratar biológicamente ya que se altera la biota de las fuentes receptoras, limitando la vida de los microorganismos. Las aguas residuales con pH bajos estimulan el crecimiento de hongos, mientras que en pH muy altos predomina el nitrógeno amoniacal en forma

gaseosa no iónica, la cual se caracteriza por ser muy toxica, sin embargo existen técnicas muy efectivas para la remoción a pH cercanos a 11.

**Primera etapa:**

Para la entrada se reporta un promedio de 7,81 para los humedales 1 y 2 se registran promedios de 7,4 y 7,23 respectivamente, teniendo en cuenta el origen del agua residual de entrada es posible establecer su carácter más básico con respecto a los efluentes de los humedales, se observa como ambos humedales tiene un buen efecto ya que amortiguan el pH de entrada reduciendo un poco su basicidad.

pH	Entrada	Salida H.1	Salida H.2
<b>Promedio</b>	7.84	7.40	7.24
<b>Máx.</b>	8.55	7.67	7.51
<b>Mín.</b>	7.08	7.26	6.94

Tabla 8. Promedios de pH para la primera etapa.

La figura 15 representa en comportamiento del pH con respecto al tiempo, se observa que la entrada presenta pH más altos debido a las características del agua proveniente de la Universidad, los efluentes presentan valores más bajos, siendo el humedal 2 el que presenta el pH más bajo con un valor mínimo de 6,94

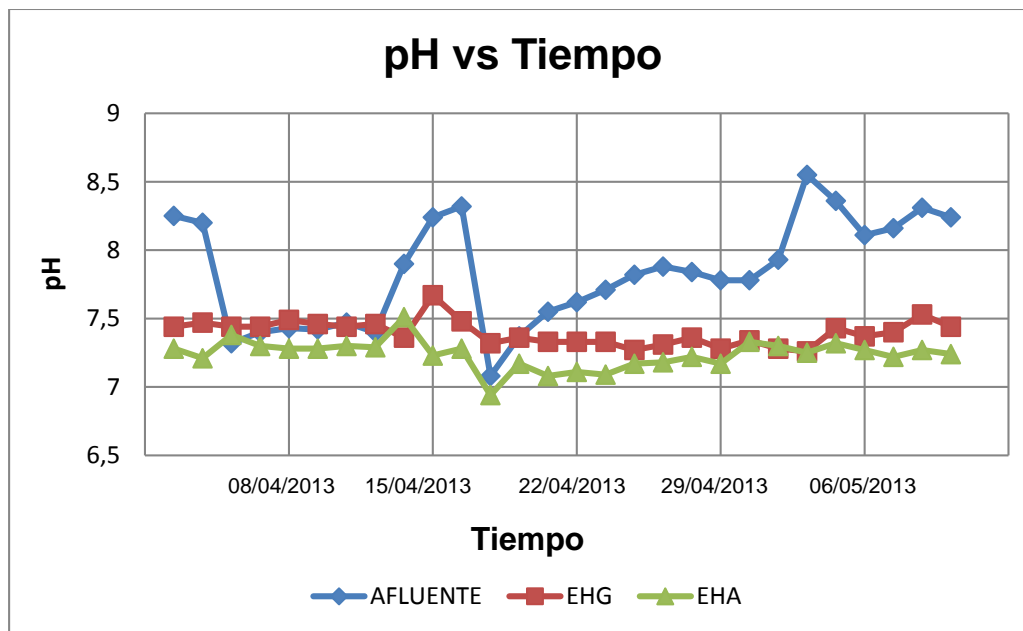


Figura 14. Comportamiento del pH a través del tiempo para la primera etapa.

## Segunda etapa:

No se observan variaciones considerables en cuanto a los promedios de pH registrados en la primera etapa, la entrada presenta un promedio de 7,71 conservando su carácter un poco más básico, el humedal de arena presenta un mayor amortiguamiento del pH con un promedio de 7,10.

pH	Entrada	Salida H.1	Salida H.2
<b>Promedio</b>	7.71	7.42	7.10
<b>Max</b>	8.14	7.63	7.84
<b>Min</b>	7.08	7.26	6.63

Tabla 9. Datos de pH para humedales 1 y 2 en la segunda etapa.

La figura 16 representa el comportamiento del pH con respecto al tiempo. En esta etapa se obtuvieron resultados sin mucha variación, siendo aún la entrada la que reporta los valores más altos, las salidas presentan valores inferiores por lo tanto se puede decir que ambos humedales tienen un comportamiento amortiguador del pH ya que el efluente de ambos humedales presenta un carácter más neutro en comparación con la entrada.

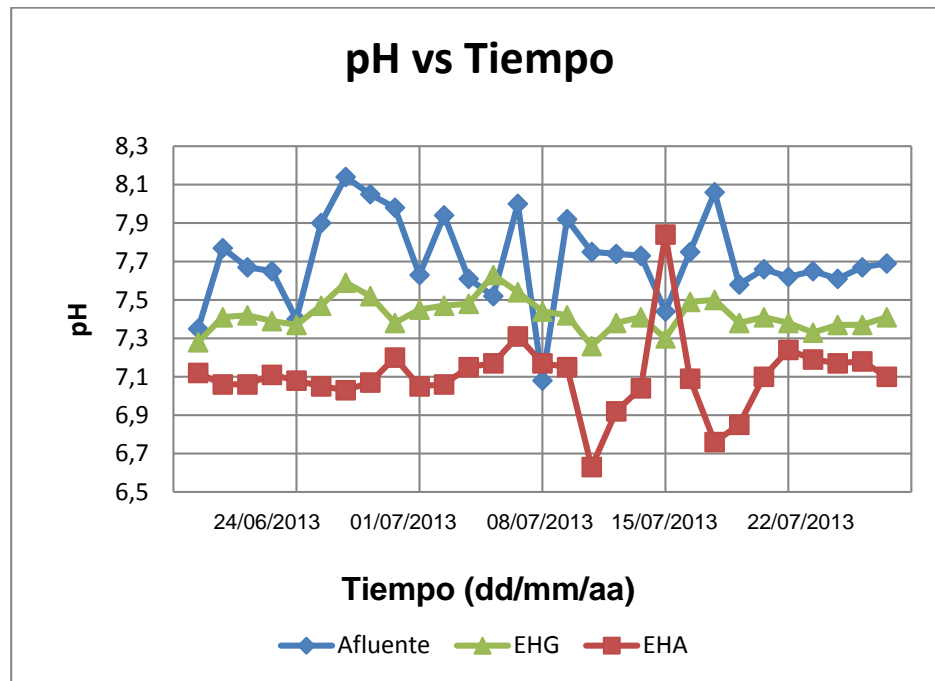


Figura 15. Comportamiento del pH a través del tiempo para la segunda etapa.

### **Oxígeno disuelto:**

La determinación de oxígeno disuelto permite establecer un indicio de la calidad del agua. El oxígeno es un elemento necesario para la mayoría de las formas de vida. Los procesos de purificación naturales de la corriente requieren niveles de oxígeno adecuados para facilitar las formas de vida aeróbicas. La vida acuática está bajo tensión, a concentración más bajas, mayor tensión. Los niveles de oxígeno que permanecen bajo 1-2 mg/L no permiten la existencia de algunos seres vivos y microorganismo a estas condiciones.

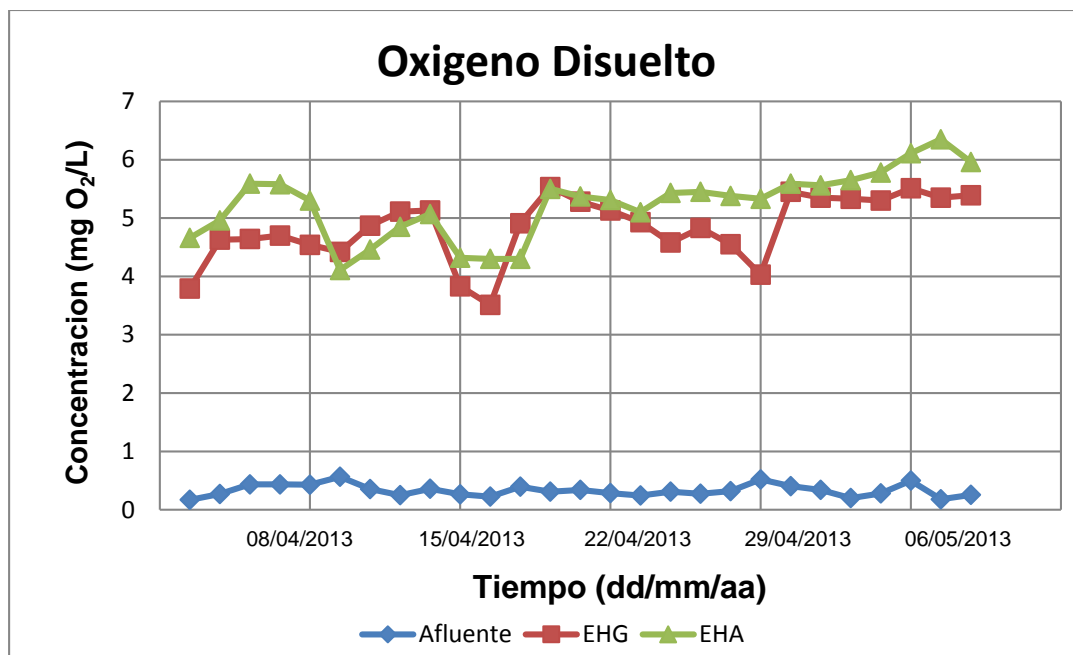
### **Primera etapa:**

A continuación se especifican los promedios obtenidos de oxígeno disuelto así como también sus respectivos máximos y mínimos, para el afluente se reportan valores muy bajos de oxígeno disuelto, siendo el promedio de 0,329 mg O<sub>2</sub>/L, los efluentes presentan promedios mayores siendo estos de 4,84 mg O<sub>2</sub>/L para el humedal 1 y 5,20 mg O<sub>2</sub>/L para el humedal, estos valores se deben a los procesos llevados en el interior de humedal que permiten el aumento del oxígeno disuelto.

<b>OD</b>	<b>Entrada (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	<b>Salida H.1 (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	<b>Salida H.2 (mg O<sub>2</sub>/L)</b>
<b>Promedio</b>	0.329	4.84	5.20
<b>Máx.</b>	0.565	5.53	6.35
<b>Mín.</b>	0.17	3.51	4.11

Tabla 10. Promedios de concentraciones de oxígeno la primera etapa.

En la figura 17 se presenta el comportamiento del oxígeno disuelto a través del tiempo, se puede denotar que la entrada presenta un bajo oxígeno disuelto, eso se debe principalmente a las altas concentraciones de sólidos suspendidos y materia orgánica que se caracterizan por reducir los niveles de oxígeno en el agua, los efluentes presentan mayores concentraciones por lo tanto se puede decir que los humedales son útiles a la hora de depurar las aguas residuales con el fin de eliminar aquellos compuestos que afectan en gran medida el oxígeno retenido en el agua.



**Figura 16.** Comportamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto a través del tiempo para la primera etapa.

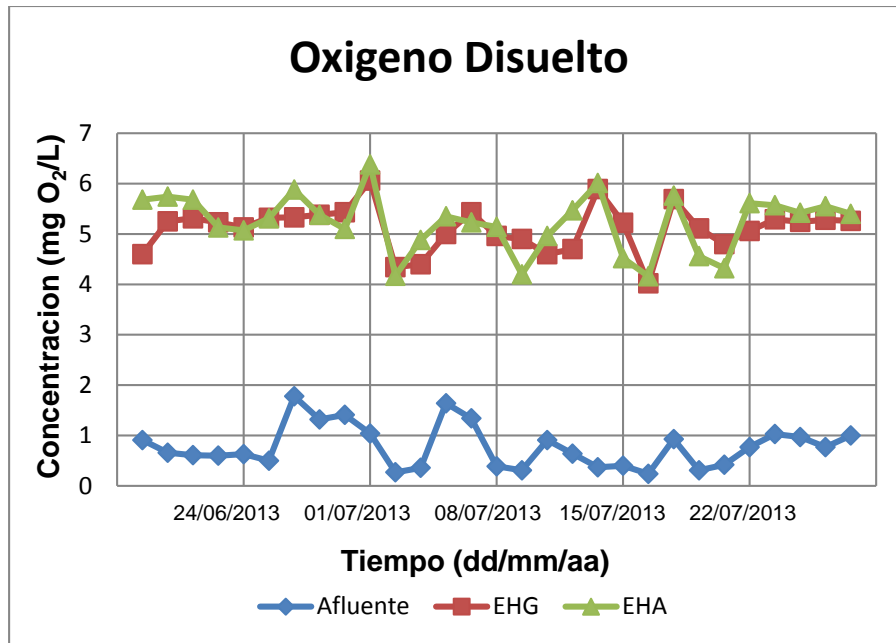
### Segunda etapa:

La tabla 11 contiene los promedios obtenidos para la segunda etapa, el oxígeno disuelto del afluente se encuentra un poco más alto en comparación con la primera etapa, el humedal 1 presenta un promedio de 5,11 y el humedal 2 un promedio de 5,23, los valores reportados para ambos humedales no tienen mucha variación en relación con la primera etapa.

OD	Entrada (mg O <sub>2</sub> /L)	Salida H.1 (mg O <sub>2</sub> /L)	Salida H.2 (mg O <sub>2</sub> /L)
<b>Promedio</b>	0.78	5.11	5.23
<b>Máx.</b>	1.78	6.06	6.38
<b>Mín.</b>	0.24	4.02	4.16

Tabla 11. Promedios de concentraciones de oxígeno disuelto la segunda etapa.

La figura 18 representa el comportamiento del oxígeno disuelto, se observan algunas variaciones con respecto a la primera etapa principalmente en los efluentes ya que los valores reportados en esta etapa son más altos, esto se debe a que la segunda etapa se caracterizó por una disminución de las actividades en la universidad, debido a la finalización del primer calendario académico.



**Figura 17.** Comportamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto a través del tiempo para la segunda etapa.

## 6.2 Materia orgánica.

La eliminación de la materia orgánica en humedales es compleja ya que es el resultado de la interacción de numerosos procesos físicos, químicos y bióticos que suceden de forma simultánea. La materia orgánica presente en forma de materia en suspensión sedimentable en las aguas residuales, se ira decantando paulatinamente y experimentará procesos de degradación principalmente biológica en el humedal (Alianza por el agua, 2008).

### 6.2.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO).

#### Primera etapa:

Para la entrada se obtuvo un promedio de 340 mgO<sub>2</sub>/L, siendo el valor mínimo de 205 mgO<sub>2</sub>/L reportado en la semana de receso de actividades en la universidad, para los efluentes se observan promedios de materia orgánica muy bajos destacando la capacidad de los humedales de remover materia orgánica, los valores promedios reportados son 37,7 mgO<sub>2</sub>/L para el humedal 1 (lecho de grava) y 46,2 mgO<sub>2</sub>/L para el humedal 2 (lecho de arena).



DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	Entrada	Salida H1	Salida H2
<b>Promedio</b>	340	37,7	46,2
<b>Máx.</b>	490	48	60
<b>Mín.</b>	205	32	23

Tabla 12. Datos de concentraciones de DQO para humedales 1 y 2 en la primera etapa.

La figura 19 representa el comportamiento de la DQO con respecto al tiempo, consta de 6 registros, cada uno tomado semanalmente. En esta etapa se observa un comportamiento muy variable, con resultados muy óptimos ya que en todos los registros se observa una clara diferencia de concentración entre la entrada y las salidas, esta apreciación es notoria gracias a los tiempos de retención establecidos para ambos humedales, los cuales permiten una mayor eficiencia en cuanto a los resultados esperados. En la primera etapa se observa que el registro 4 presenta un decaimiento de la concentración en la entrada del sistema debido a la poca actividad en la universidad como consecuencia de la anomalía en las actividades académicas por parte de los estudiantes en esa semana. Posteriormente se observa un incremento leve, sin embargo con concentraciones un poco menores en comparación con los primeros datos obtenidos, esto se dio debido a que los estudiantes se encontraban en las últimas semanas de actividad académica, por lo tanto no se generaban cargas orgánicas muy altas debido a la finalización de dicho periodo semestral

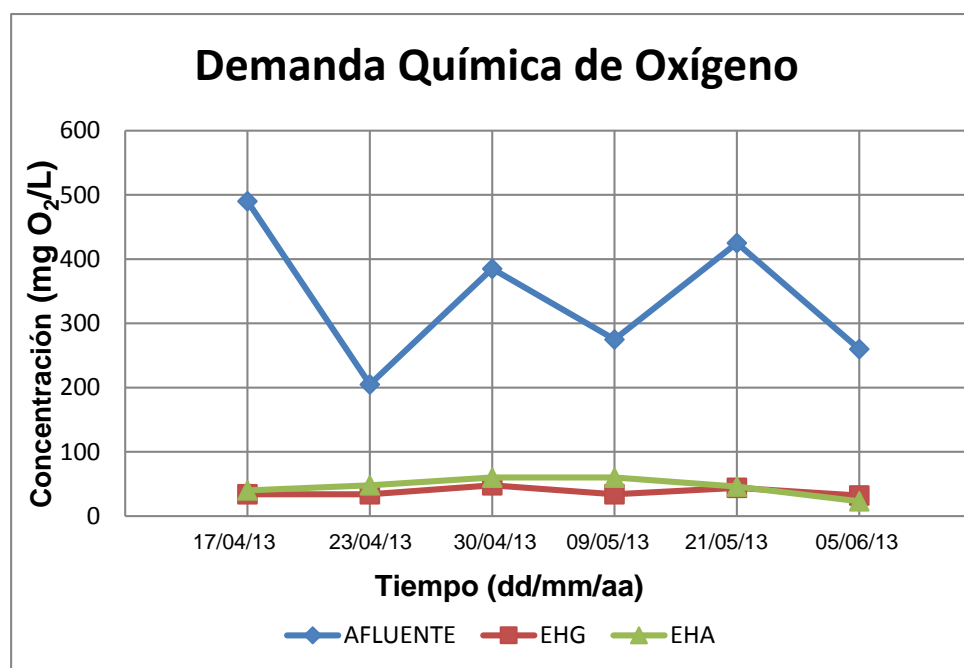


Figura 18. Comportamiento de las concentraciones de DQO a través del tiempo para la primera etapa.

## Segunda etapa:

Para la segunda etapa se observa un promedio de 267 mgO<sub>2</sub>/L, este promedio es menor a la primera, los promedios de los efluentes siguen conservando su tendencia, demostrando el buen desempeño de estos a la hora de remover materia orgánica.

DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	Entrada	Salida H.1	Salida H.2
<b>Promedio</b>	267	37,7	37,6
<b>Máx.</b>	330	50	55,5
<b>Mín.</b>	223	26	18

Tabla 13. Promedios de concentración de DQO para la segunda etapa.

La figura 20 representa el comportamiento de la materia orgánica químicamente degradable con respecto al tiempo. Para el inicio de esta etapa se obtuvieron concentraciones de materia orgánica bajas debido a la inactividad ya que los estudiantes se encontraban en vacaciones, después del tercer registro se observa un incremento estable como respuesta a la actividad generadas por parte de los estudiantes que se encontraban realizando intersemestrales y actividades académicas adicionales propuestas por la universidad.

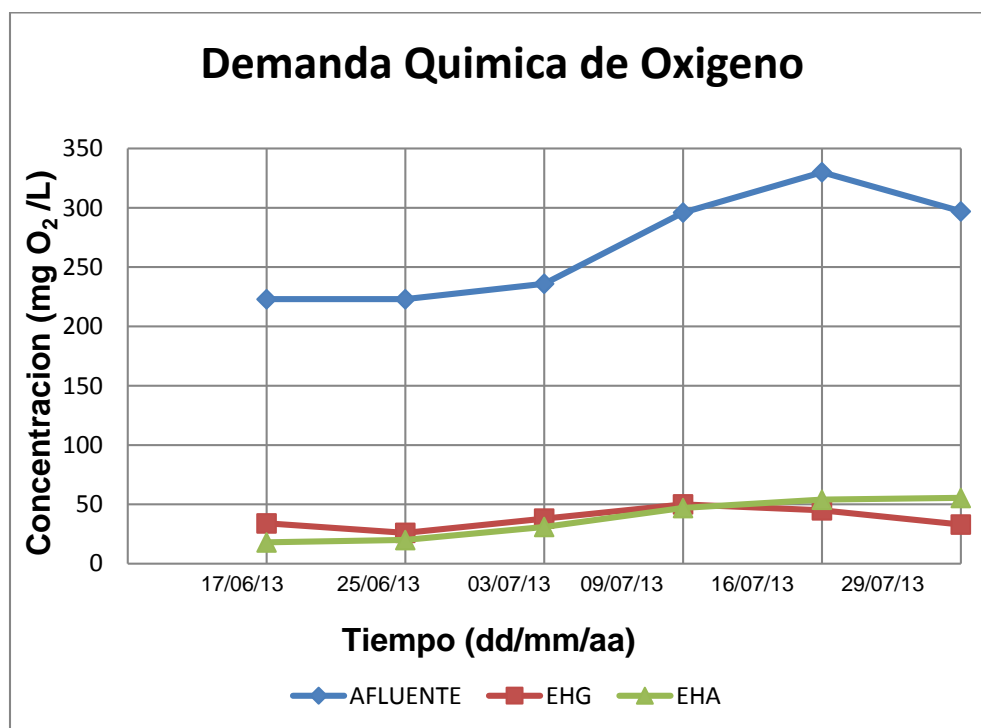


Figura 19. Comportamiento de las concentraciones de DQO a través del tiempo para la segunda etapa.

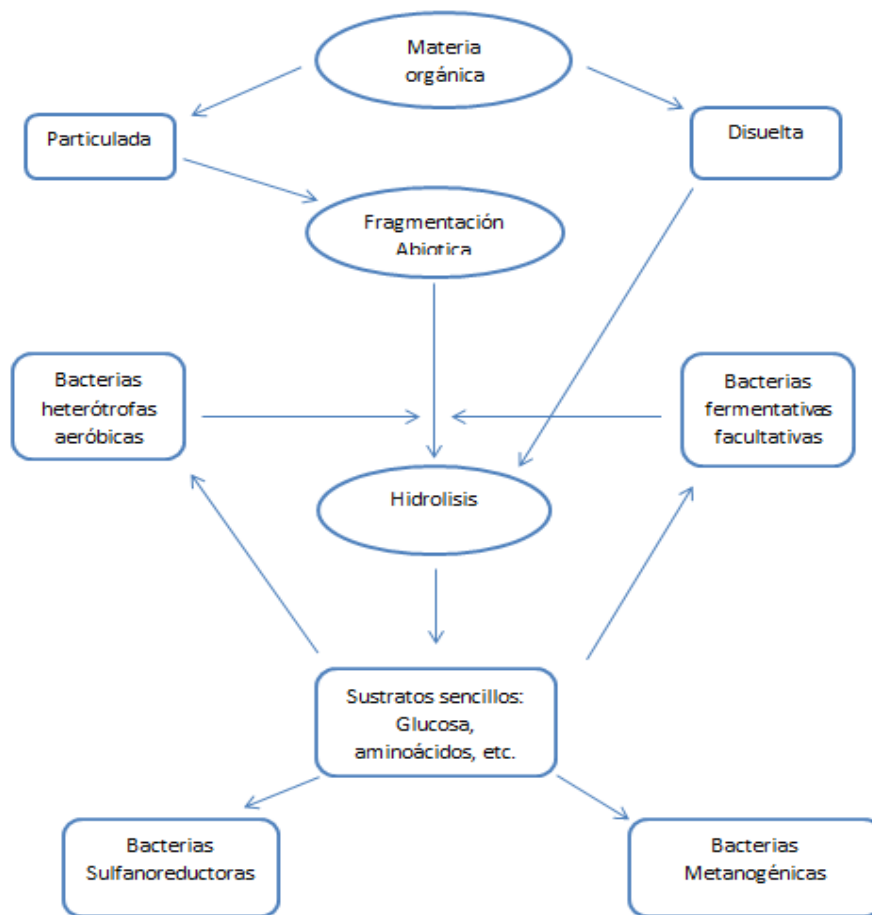
### **6.2.2 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>).**

En los humedales el crecimiento microbiano en forma suspendida (fase líquida) o adherida (raíces y sedimentos) es el responsable de la remoción de la materia orgánica disuelta o en estado coloidal. Se considera prácticamente despreciable la cantidad de materia orgánica que pueden las plantas tomar del suelo o del agua. La materia orgánica puede ser degradada bajo condiciones aerobias o anaerobias. El Oxígeno requerido para la degradación aerobia puede ser tomado directamente de la atmósfera por las plantas y trasladado a la zona de raíces o puede ser difundido directamente desde la atmósfera.

La materia orgánica particulada es retenida por filtración cerca de la entrada en sistemas horizontales. Esta fracción particulada por fragmentación abiótica, se convierte en partículas más pequeñas que pueden ser hidrolizadas por enzimas extracelulares. Las enzimas son excretadas por bacterias heterótrofas aeróbicas y fermentativas facultativas. El resultado de la hidrólisis es la formación de sustratos sencillos (Glucosa o aminoácidos) que pueden ser asimilados por las bacterias heterótrofas aeróbicas o fermentativas facultativas. Los ácidos a su vez pueden ser asimilados por bacterias sulfatoreductoras, metanogénicas y también, por supuesto, por las heterótrofas aeróbicas. Los sustratos sencillos presentes en el agua residual son asimilados directamente sin necesidad de hidrólisis previa. A continuación se muestra en la figura 21 una representación esquemática de los procesos implicados en la degradación de la materia orgánica en los humedales (García y corzo, 2008).

Por otra parte, se debe tener en cuenta que muchas sustancias disueltas se retienen por adsorción, bien en la propia materia orgánica o en el medio granular. Estas sustancias pueden simplemente quedar allí, o bien desplazarse y ser reabsorbidas, o ser degradadas por microorganismos. La degradación de la materia orgánica por vía aeróbica en los humedales de flujo horizontal sucede cerca de la superficie del agua (en los primeros 0,05 m de profundidad) y en las zonas cercanas a las raíces. El oxígeno liberado por las raíces no es suficiente para degradar completamente de forma aeróbica la materia orgánica de un agua residual de tipo medio (Bécares, 2004).

Estimaciones realizadas a través de balances de masa y emisiones de gases indican que la degradación aeróbica es una vía poco importante con respecto a vías anaeróbicas en sistemas horizontales. En humedales verticales no se dispone de datos sobre la importancia relativa de la respiración aeróbica. No obstante, el hecho de que en diferentes sistemas se haya encontrado concentraciones apreciables de oxígeno en toda la profundidad del lecho, sugiere que la degradación aeróbica es una vía bastante importante, si no es la vía más utilizada en la actualidad (García y Corzo, 2008).



**Figura 20.** Esquema simplificado de los procesos que intervienen en la degradación de la materia orgánica en los humedales. Fuente: (García y Corzo, 2008)

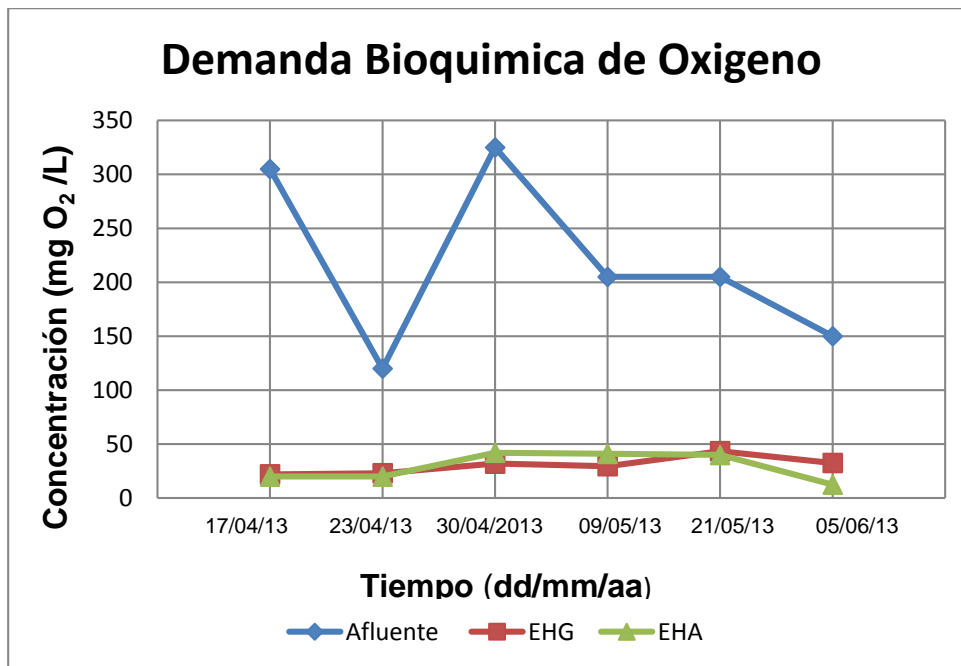
**Primera etapa:**

El análisis de DBO<sub>5</sub> presenta para la entrada un promedio de 218 mg O<sub>2</sub>/L y para los humedales 1 y 2 promedios de 30,4 mg O<sub>2</sub>/L y 29,25 mg O<sub>2</sub>/L respectivamente, la entrada presenta un mínimo de 120 mg O<sub>2</sub>/L valor reportado para la segunda semana de análisis, los humedales presentan valores mínimos similares, sin embargo los valores máximos presentan una leve diferencia.

DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	Entrada	Salida H1	Salida H2
<b>Promedio</b>	218	30,4	29,25
<b>Máx.</b>	325	32	42
<b>Mín.</b>	120	22	20

Tabla 14. Promedios de concentración de DBO<sub>5</sub> para la primera etapa.

En la figura 22 se puede apreciar el comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno a través del tiempo, se puede inferir que el valor más bajo reportado para la entrada se debe a que en la segunda y tercera semana de análisis la universidad tuvo interrupciones en el desarrollo normal de las actividades. Para esta etapa ambos humedales presentan bajas concentraciones en sus efluentes y se puede apreciar que se caracterizan por ser similares, sin embargo se resalta el desempeño del humedal de arena el cual presenta concentraciones muy bajas en su efluente a pesar de habersele suministrado un caudal mayor, finalmente se observa que el comportamiento de ambos humedales fue levemente cambiante ya que para las semanas 3 y 4 el humedal de grava presentó menores concentraciones, no obstante para las semanas 5 y 6 este humedal presentó mayores concentraciones en su efluente.



**Figura 21.** Comportamiento de las concentraciones de DBO<sub>5</sub> a través del tiempo para la primera etapa.

**Segunda etapa:**

A pesar de que para la segunda etapa se duplico el caudal de alimentación para los sistemas analizados, se reportan valores de concentración en la entrada más bajos, la entrada presenta promedio de concentración de 205 mg O<sub>2</sub>/L, las salidas presentan menores concentraciones promedios siendo el más destacado de 24,9 mg O<sub>2</sub>/L perteneciente al humedal con lecho de grava.

DBO <sub>5</sub>	Entrada (mg/L)	Salida H1 (mg/L)	Salida H2 (mg/L)
Promedio	205	24,9	27,4
Máx.	205	32	26,5
Mín.	180	19	12

Tabla 15. Promedios de concentraciones de DBO<sub>5</sub> para la segunda etapa.

La figura 23 representa el comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno a través del tiempo, para esta etapa la entrada presenta valores similares de materia orgánica ya que no hubo mucha actividad en la universidad debido a la finalización del calendario académico, se evidencia en esta etapa un comportamiento constante en cuanto a la concentración de materia orgánica en los efluentes de los humedales, sin embargo se mantiene la tendencia de una menor concentración reportada para el humedal 2 (lecho de arena).

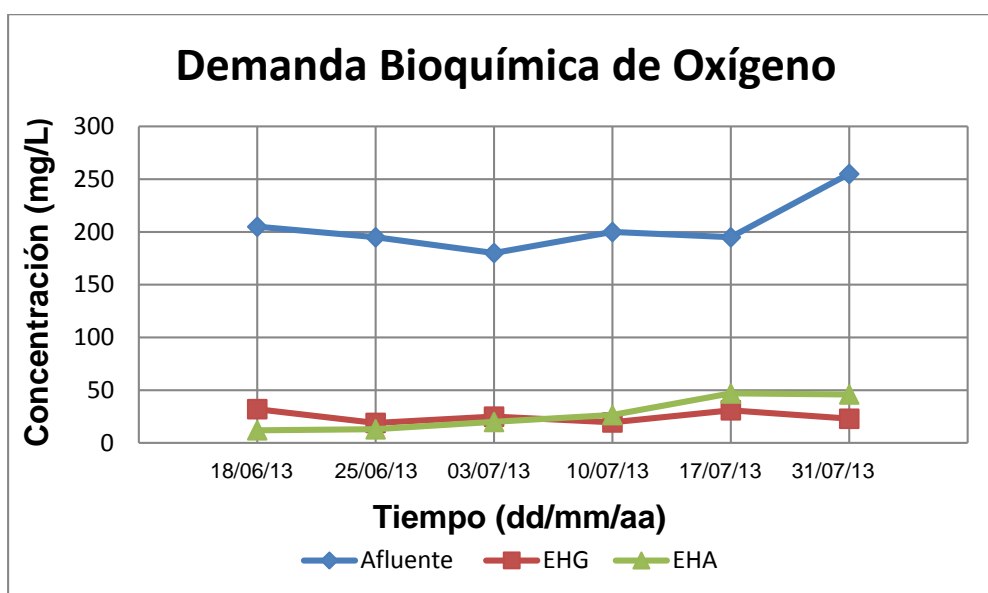


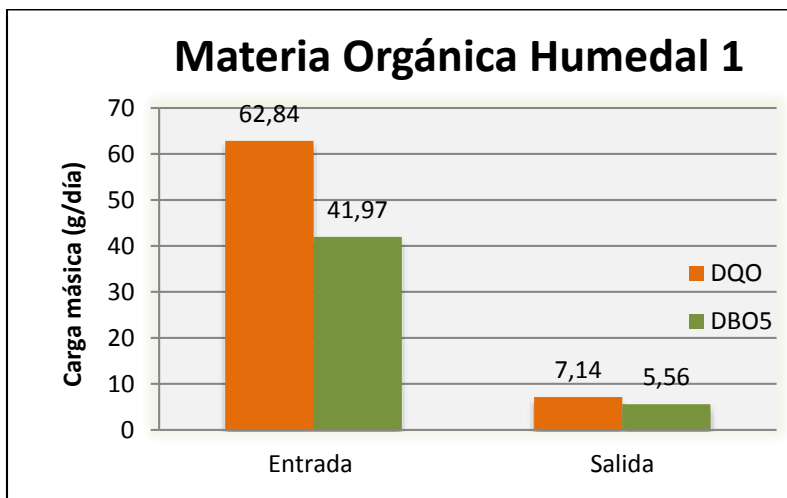
Figura 22. Comportamiento de las concentraciones de DBO<sub>5</sub> a través del tiempo para la segunda etapa.

### 6.2.3 Cargas Másicas de materia orgánica:

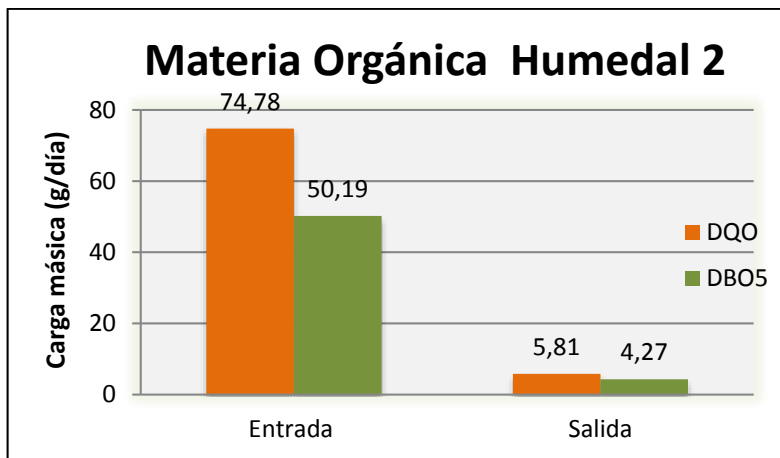
En las figuras 24, 25, 26 y 27 se ilustran las cargas másicas de DQO y DBO<sub>5</sub> tanto para la entrada como en la salida de ambos humedales en cada etapa de análisis. En la figura 25 se puede apreciar claramente cómo en la primera etapa se obtiene una mayor remoción en el humedal 2 (lecho de arena) ya que presentó en la salida un valor medio de carga másica más bajo, y teniendo en cuenta que le ingresa una mayor carga orgánica respecto al humedal 1(lecho de grava) es importante destacarlo. En

general se puede denotar como la salida del humedal 2 se caracteriza por tener cargas menores, reflejadas en concentraciones más bajas de materia orgánica con respecto al humedal 1, teniendo en cuenta que los caudales del efluente del humedal 2 también eran menores que los del humedal 1 por lo general.

**Primera etapa:**



**Figura 23.** Cargas másicas de entrada y salida para DQO y DBO<sub>5</sub> en el humedal 1 (lecho de grava) en la primera etapa.

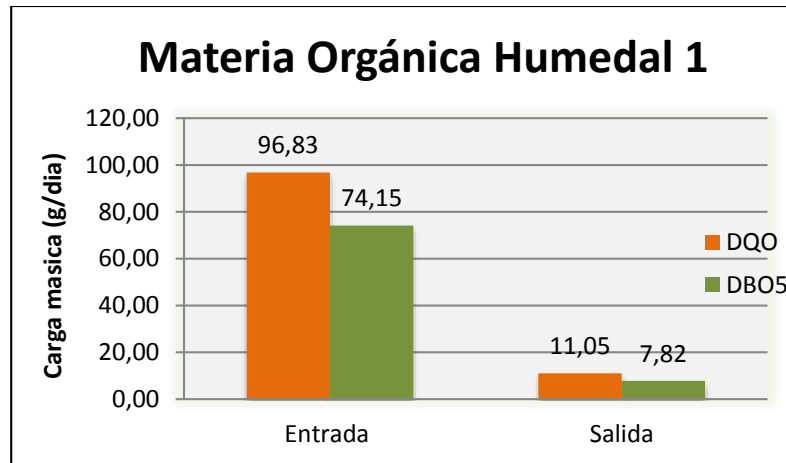


**Figura 24.** Cargas másicas de entrada y salida para DQO y DBO<sub>5</sub> en el humedal 2 (lecho de arena) en la primera etapa.

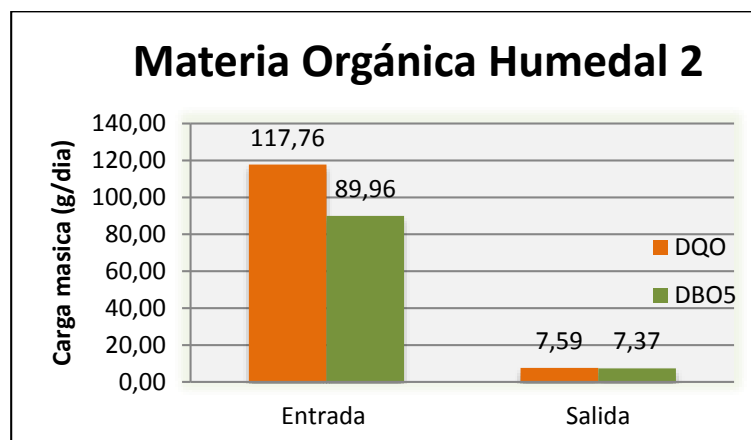
**Segunda etapa:**

La segunda etapa se caracteriza por presentar mayores cargas másicas de materia orgánica debido a que se realizó una configuración a los sistemas objeto de estudio, en donde se duplicó el caudal de entrada para ambos humedales. En esta etapa el humedal 1 presenta una tasa de remoción de 85,8 g/día para DQO y 66,3 g/día para DBO<sub>5</sub>, el humedal 2 presenta una tasa de remoción de 107,6 g/día de DQO y 82,6 g/día para DBO<sub>5</sub>, teniendo

en cuenta las remociones obtenidas es posible establecer que el humedal 2 mantuvo mayores remociones las cuales se ven reflejadas en altos porcentajes de remoción de materia orgánica, es decir presenta una mayor eficiencia en comparación del humedal 1.



**Figura 25.** Cargas másicas de entrada y salida para DQO y DBO<sub>5</sub> en el humedal 1 (lecho de grava) en la segunda etapa.



**Figura 26.** Cargas másicas de entrada y salida para DQO y DBO<sub>5</sub> en el humedal 2 (lecho de arena) en la segunda etapa.

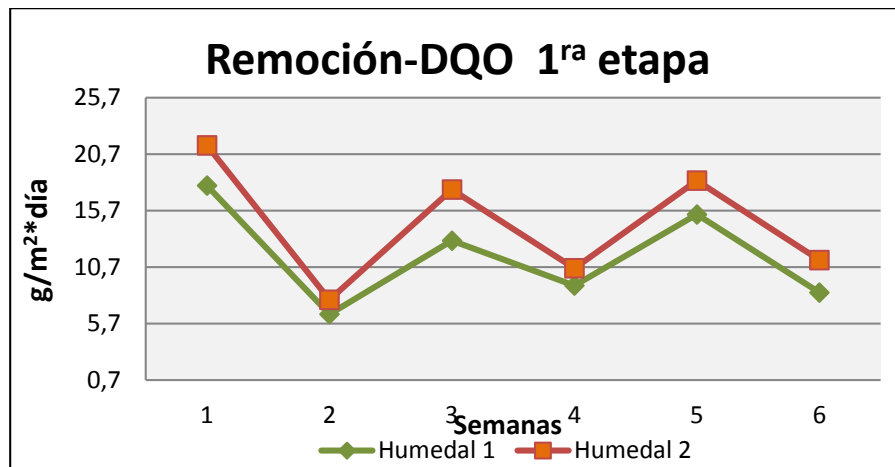
#### 6.2.4 Remociones de materia orgánica.

##### Primera Etapa.

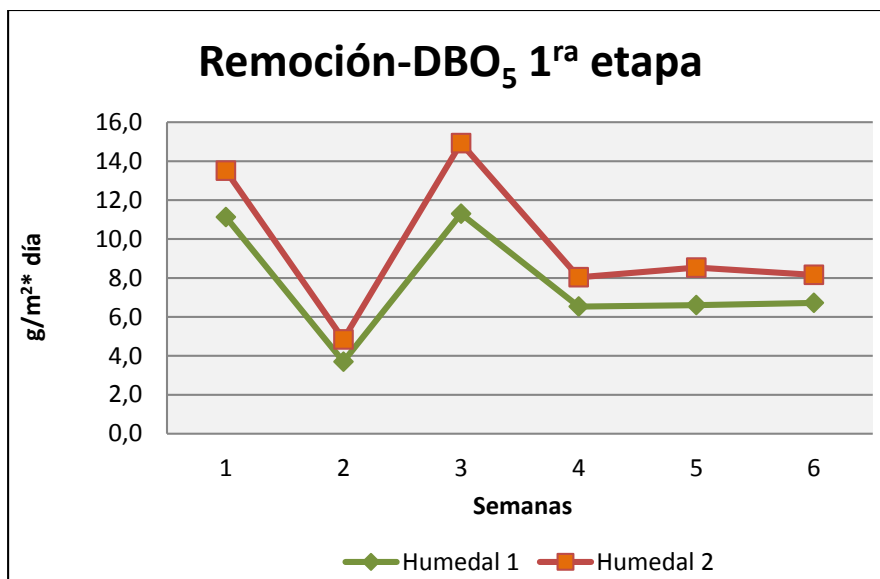
En las figuras 28 y 29 se puede apreciar el comportamiento de las cargas másicas removidas en cuanto a los dos parámetros relacionados con la materia orgánica. Teniendo en cuenta la estabilidad de los humedales en cuanto a porcentajes de remoción como se podrá apreciar más adelante, se puede decir que la variabilidad en cuanto a las cargas másicas de materia orgánica removidas, tanto para DQO como para DBO<sub>5</sub>, está dada por las cargas de entrada, y si también se tiene en cuenta que los caudales eran controlados; dicha variabilidad está relacionada directamente con la



variación de las concentraciones en el afluente. Esta situación se puede ejemplificar observando los tres primeros puntos en la gráfica de remoción para  $\text{DBO}_5$  (ver figura 29), en donde las variaciones que presentan estos puntos coinciden con las variaciones en las concentraciones del afluente para cada uno de los tres puntos respectivamente (ver figura 22). Cabe destacar que se evidencia en los humedales un comportamiento amortiguante, es decir, soportan los picos en las cargas de entrada manteniendo porcentajes de remoción similares. Teniendo en cuenta cifras específicas se encontró que para la primera etapa el humedal 1 (lecho de grava) presenta valores promedio de remoción de  $11,7 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$  para DQO y  $7,7 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$  para  $\text{DBO}_5$  mientras que el humedal 2 presenta una remoción de  $14,5 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$  para DQO y  $9,7 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$  para  $\text{DBO}_5$ . Por otro lado, se puede observar fácilmente en las gráficas que tanto para DQO como para  $\text{DBO}_5$ , el humedal 2 (lecho de arena) siempre presentó valores de remoción superiores a los del humedal 1 (lecho de grava); por lo tanto se puede concluir que aporta mejores resultados el humedal con lecho de Arena para esta primera etapa.

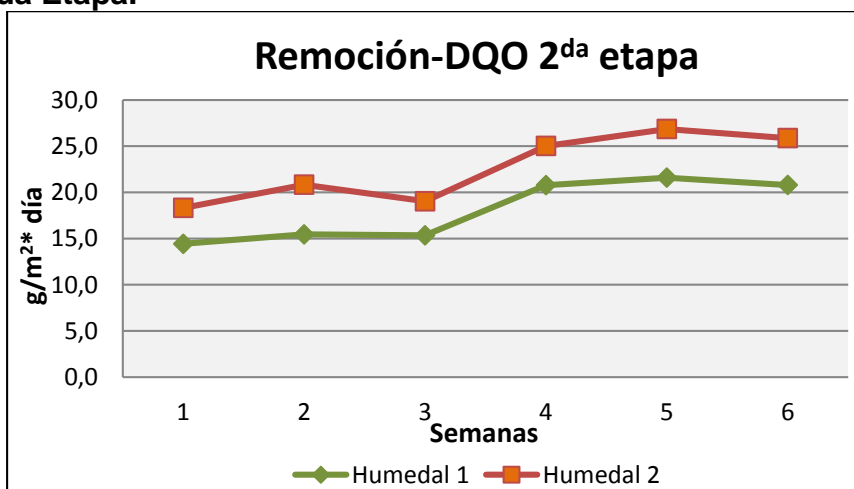


**Figura 27.** Comportamiento de la remoción de DQO durante la primera etapa.



**Figura 28.** Comportamiento de la remoción de DBO<sub>5</sub> durante la primera etapa.

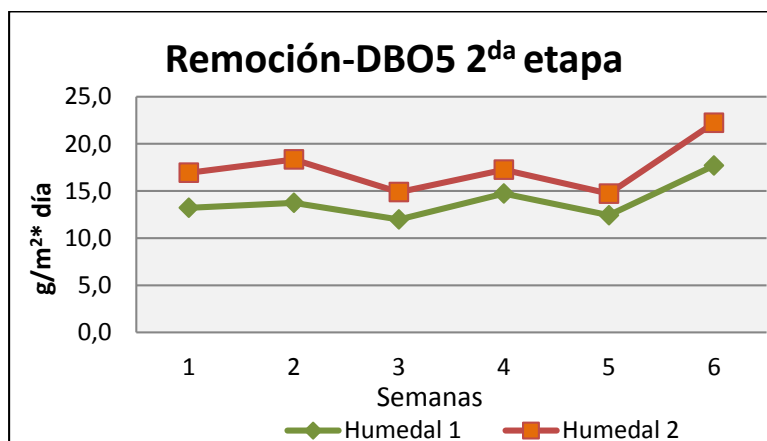
### Segunda Etapa.



**Figura 29.** Comportamiento de la remoción de DQO durante la segunda etapa.

En las figuras 30 y 31 se muestra el comportamiento de ambos humedales en relación con las remociones para DQO y DBO<sub>5</sub> encontradas para la segunda etapa de seguimiento. Lo primero que es importante evidenciar es que se nota una mayor estabilidad para los valores de remoción en general. Al igual que en la primera etapa, en todo el seguimiento de la segunda el humedal 2 (lecho de arena) presentó remociones superiores a las del humedal 1 (lecho de grava) tanto para DQO como para DBO<sub>5</sub>. Para este último se determinó un valor promedio de remoción de 18,1 g/m<sup>2</sup>\*día para DQO y 13,9 g/m<sup>2</sup>\*día para DBO<sub>5</sub> mientras que el humedal 2 tuvo 22,7 g/m<sup>2</sup>\*día para DQO 17,4 g/m<sup>2</sup>\*día DBO<sub>5</sub>. Con esto se puede destacar que

para la segunda etapa el humedal 2 obtuvo mejores resultados en cuanto a remoción de materia orgánica.



**Figura 30.** Comportamiento de la remoción de DBO<sub>5</sub> durante la segunda etapa

## 6.2.5 Eficiencias de materia orgánica

### 6.2.5.1 Eficiencia de remoción de DQO.

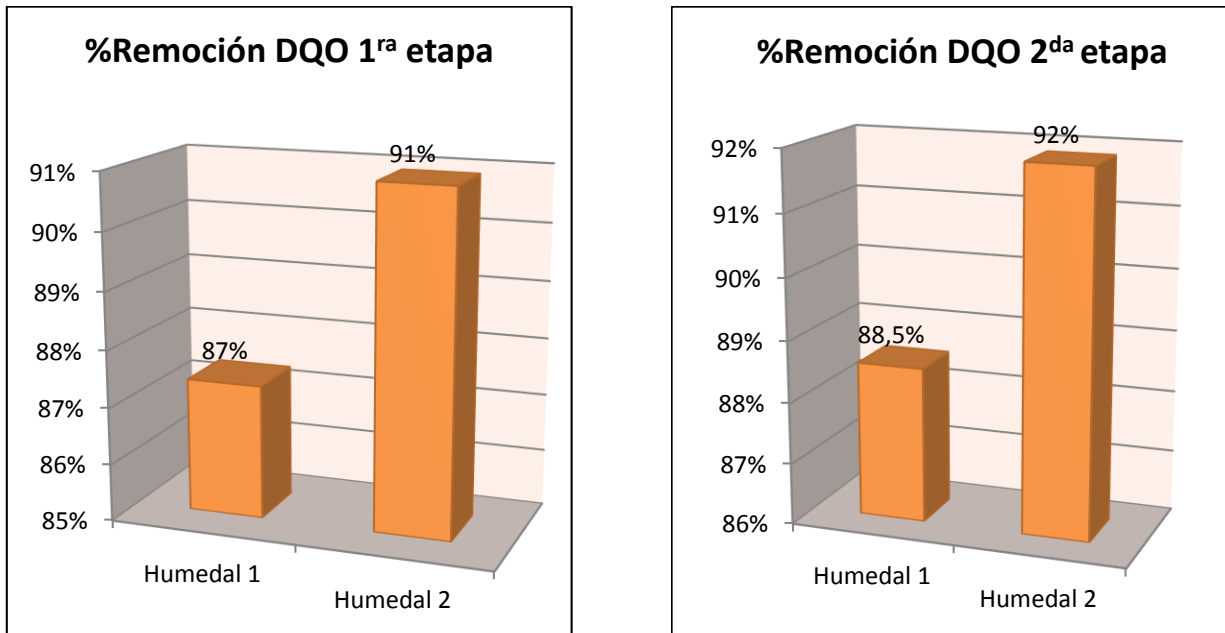
En la figura 32 se aprecian los valores medios de los porcentajes de remoción de DQO para ambos humedales en cada etapa de la investigación. Para el humedal 1 y el humedal 2 se obtienen porcentajes de remoción promedio de 87% y 91% respectivamente en la primera etapa, se observa que ambos humedales se caracterizan por presentar eficiencias de remoción muy significativas teniendo en cuenta que fueron utilizados como un tratamiento secundario y eran alimentados con agua residual doméstica cruda.

Además para tratamientos primarios el decreto 3930 de 2010, establece que las remociones de DQO deben de ser superiores al 80% para ser depuradas, lo que permite evidenciar que estos sistemas presentan buenos rendimientos debido a que presentan eficiencias de remoción por encima de lo estipulado en esta norma.

A pesar de que para la segunda etapa se obtuvieron mayores cargas para la entrada debido a la configuración de los sistemas, se logra evidenciar que ambos humedales siguen presentando altas remociones de DQO. Para la segunda etapa el humedal 1 presenta un valor promedio de remoción de 88,5% y para el humedal 2 de 91,9%, se puede deducir que a pesar de que se duplico el caudal para ambos sistemas las eficiencias de remoción no cambian de una manera muy significativa, obteniéndose valores muy similares, sin embargo un poco más altas pero no muy significativos para el humedal 2.

Los tiempos de retención es un aspecto muy importante a la hora de analizar la eficiencia de un determinado humedal, a mayor tiempo de

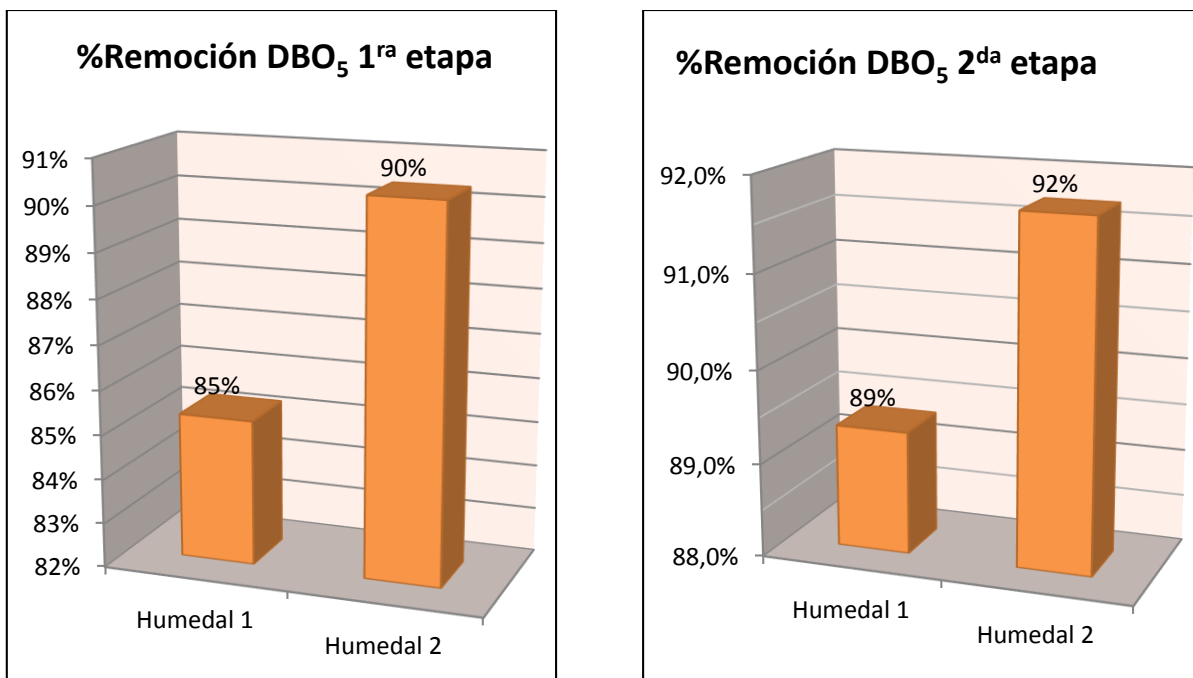
retención mayor absorción y asimilación por parte del humedal, teniendo en cuenta lo anterior es posible determinar que el humedal 2 reporta mayores eficiencias debido a que la arena presenta una mayor retención en comparación a la grava debido a la baja porosidad que presenta, lo que permite que se lleven a cabo procesos que dan lugar a la eliminación de contaminantes físicos, químicos y biológicos.



**Figura 31.** Porcentajes de remoción de DQO para ambas etapas.

#### 6.2.5.2 Eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub>:

En la figura 33 se ilustran los porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub> para ambos humedales en cada etapa de la investigación. Para la primera etapa se obtiene un porcentaje de remoción del 85% para el humedal 1 y 90% para el humedal 2, se destaca que el humedal 2 presenta una mayor eficiencia de remoción, además de que ambos cumplen con lo estipulado en la norma 3930 de 2010 ya que ambos presentan porcentajes de remoción mayores al 80% lo cual es estipulado por esta norma. Para la segunda etapa los porcentajes de remoción son un poco más altos, reportándose un porcentaje de remoción de 89,3% para el humedal 1 y 91,7% para el humedal 2, por lo tanto se nota que en esta etapa ambos humedales removieron mayores cantidades de materia orgánica biodegradable, además se aprecia de que ambos humedales presentan mayores eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub> que de DQO para esta etapa.



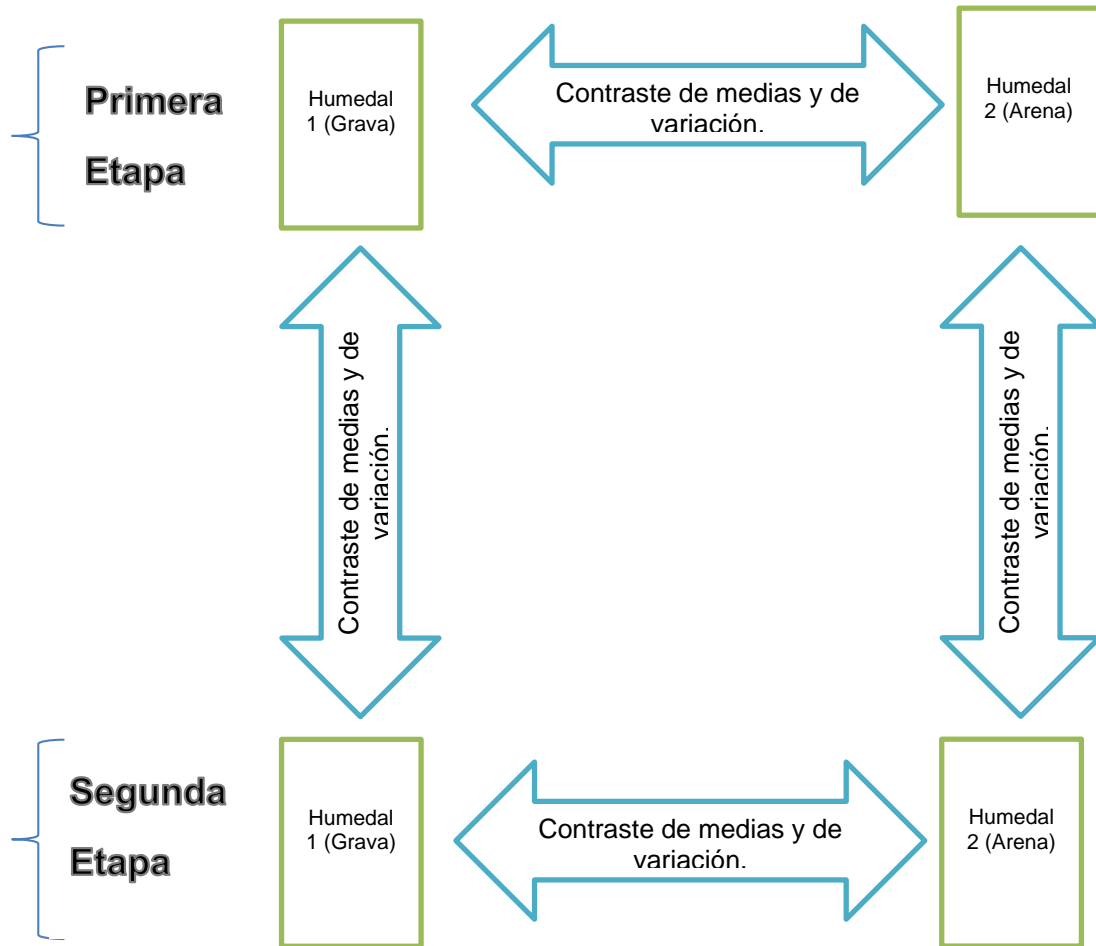
**Figura 32.** Porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub> para ambas etapas.

Si se tienen en cuenta los valores medios de porcentajes de remoción tanto para DQO y DBO<sub>5</sub> (Ver figuras 32 y 33) en la primera etapa, se puede observar que estos valores son cercanos, siendo los porcentajes DBO<sub>5</sub> un tanto menores, esta similitud posiblemente es debida a las características del agua residual doméstica objeto de análisis, la cual precisamente por ser de carácter doméstica tiene una proporción de materia orgánica biodegradable alta respecto a la químicamente degradable. Para la segunda etapa se evidenció un aumento en la proporción de la materia orgánica biodegradable respecto a la químicamente degradable en la entrada, razón por la cual muy posiblemente produjo que los porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub> aumentaran respecto a los de la primera etapa y también aumentaran respecto a los porcentajes de DQO para la etapa 2, siendo superior la eliminación de DBO<sub>5</sub> que la eliminación de DQO para el humedal 1, el cual tuvo valores de 88,5% para DQO y 89,3% para DBO<sub>5</sub>.

### 6.2.6 Análisis Inter-etapas:

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados, se realizaron dos pruebas estadísticas de contraste de hipótesis, una corresponde a la Prueba F de análisis de varianzas y la otra prueba corresponde a la t-student de análisis de medias, ambas se realizaron utilizando el programa Excel, con el fin de determinar si hubo o no diferencias significativas en cuanto al porcentaje de remoción, teniendo en cuenta también la significancia en la variación de este parámetro, para cada humedal entre etapas así como también entre humedales para cada una de las etapas.

Para un mejor entendimiento de lo mencionado anteriormente se presenta el siguiente esquema:



Se mencionan a continuación para DQO y DBO<sub>5</sub> en cada humedal el estadístico F y t determinado y su respectivo valor crítico con el cual se concluye.

Para establecer si hubo diferencias significativas en cuanto al porcentaje de remoción de DQO y DBO<sub>5</sub> entre la primera y segunda etapa para el humedal 1 se utilizaron los seis datos de seguimiento para cada parámetro respectivamente. En la tabla 16 se pueden ver los valores del estadístico F y t con su valor crítico correspondiente tanto para DQO como para DBO<sub>5</sub>. Para ambos parámetros el valor del estadístico F y t hallado es menor que su valor crítico por lo que se acepta la hipótesis nula en ambos casos, en la cual se afirma que ambos humedales no presentan porcentajes de remoción significativamente diferentes y la variabilidad de este en la primera y segunda etapa es similar, por lo tanto se concluye que el funcionamiento del humedal 1(lecho de grava) en cuanto a remoción de materia orgánica se mantuvo estable tras el aumento de la carga hidráulica.

<b>Humedal 1</b>				
	Estadístico F determinado	Valor crítico F correspondiente	Estadístico t determinado	Valor crítico t correspondiente
<b>DQO</b>	4,369	5,050	0,527	2,228
<b>DBO<sub>5</sub></b>	3,195	5,050	1,365	2,228

Tabla 16. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para DQO y DBO<sub>5</sub> del humedal 1.

Igualmente para el humedal 2 se muestran los valores para DQO y DBO<sub>5</sub> de los estadísticos F y t hallados, con su valor crítico correspondiente en la tabla 17. Para este humedal se observa que tanto el estadístico F como t encontrado es menor que su valor crítico correspondiente para ambos parámetros, lo que permite concluir que no existen diferencias significativas en los porcentajes de remoción de materia orgánica y adicionalmente se observa homogeneidad en la variación de este parámetro de evaluación durante el seguimiento en las dos etapas de estudio para el humedal 2 (lecho de arena).

<b>Humedal 2</b>				
	Estadístico F determinado	Valor crítico F correspondiente	Estadístico t determinado	Valor crítico t correspondiente
<b>DQO</b>	4,369	5,050	0,527	2,228
<b>DBO<sub>5</sub></b>	3,195	5,050	1,365	2,228

Tabla 17. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para DQO y DBO<sub>5</sub> del humedal 2.

Teniendo en cuenta que en la segunda etapa se suministró una mayor carga hidráulica respecto a la primera y que los porcentajes de remoción de materia orgánica se mantuvieron, se identifica en los sistemas estudiados una capacidad de amortiguamiento, en donde se evidencia que pese a las fluctuaciones en las cargas orgánicas de entrada los porcentajes de remoción se sostienen.

### 6.2.7 Análisis Inter-Humedales.

Para efectos de este trabajo se establecieron dos tipos de configuraciones por cada etapa de forma independiente con el fin de identificar cuál de los dos medios filtrantes, grava o arena, presenta mejores resultados en relación con la eficiencia de remoción de contaminantes. Las configuraciones tipo 1 y tipo 2 corresponden a la primera etapa de seguimiento, mientras que las configuraciones tipo 3 y 4 corresponden a la segunda etapa.

Para la primera etapa se tiene que la configuración tipo 1 corresponde al humedal con lecho de grava con un tiempo de retención de 6 días y la configuración tipo 2 corresponde al humedal con lecho de arena con un tiempo de retención de 4 días. En la tabla 18 se presentan los estadísticos F y t determinados para los parámetros DQO y DBO<sub>5</sub> para esta etapa.

Al analizar ambas configuraciones observando los valores estadísticos F y t con sus correspondientes valores críticos se determina que tanto la eficiencia de remoción ya sea para DQO o DBO<sub>5</sub> es similar en ambas configuraciones así como su variabilidad al compararlas entre sí en cada una de las etapas de seguimiento. En este punto es pertinente destacar que la configuración tipo 2, con un tiempo de retención menor al de la 1, alcanzó eficiencias similares; lo que permite establecer que el humedal con arena como medio filtrante logra mejores resultados que la grava.

<b>Primera Etapa</b>				
	Estadístico F determinado	Valor crítico F correspondiente	Estadístico t determinado	Valor crítico t correspondiente
<b>DQO</b>	1,664	5,050	1,081	2,228
<b>DBO<sub>5</sub></b>	1,360	5,050	1,489	2,228

**Tabla 18.** Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para DQO y DBO<sub>5</sub> en la primera etapa

<b>Segunda Etapa</b>				
	Estadístico F determinado	Valor crítico F correspondiente	Estadístico t determinado	Valor crítico t correspondiente
<b>DQO</b>	2,219	5,050	0,451	2,228
<b>DBO<sub>5</sub></b>	3,742	5,050	0,758	2,228

**Tabla 19.** Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para DQO y DBO<sub>5</sub> en la segunda etapa.

#### **6.2.6.1 Comparación con otros estudios:**

En general se encontraron porcentajes de remoción de materia orgánica coherentes con la literatura (García y Corzo, 2008). Ahora, para ambos humedales se encontraron porcentajes de remoción superiores para DQO y DBO<sub>5</sub> respecto al estudio realizado por (Marín y Correo, 2010) en donde obtuvieron valores medios de porcentajes de remoción de 84,31% para DQO Y 92,21% para DBO<sub>5</sub> para el humedal con lecho de arena y 64,35% en DQO y 72,88% en DBO<sub>5</sub> para el humedal con lecho de grava. En dicha investigación se trabajó con el efluente de la P.T.A.R de la Universidad por lo que presentaba un grado de tratamiento mayor previo al entrar en los sistemas objeto de estudio, lo que pudo ocasionar remociones menores a



diferencia con los resultados encontrados en este estudio e donde se trabajó con agua residual cruda.

En otro estudio realizado, analizaron humedales construidos de flujo Subsuperficial horizontal plantados con tres especies macrófitas diferentes (*Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* y *Phragmites sp*) se encontraron valores de porcentajes de remoción para DQO entre 93% y 97% y para DBO<sub>5</sub> entre 100% y 97%, estos valores son superiores a los encontrados en este estudio ya que en este trabajo se utilizó agua residual cruda mientras que en (Montoya *et al.*, 2010) se trabajó con agua residual sintética.

### **6.3 NITRÓGENO TOTAL:**

La remoción de nitrógeno en humedales artificiales es muy efectiva; aunque ocurre la asimilación por parte de las plantas, solo una pequeña fracción de nitrógeno total puede ser eliminada por esta vía. Investigaciones en Norteamérica demuestran que solamente entre el 10% y el 15 % del nitrógeno eliminado se retira de las plantas utilizando la poda de las plantas. La remoción de Nitrógeno en las plantas puede alcanzar valores de hasta 80% (Lara, 1999).

Puede medirse el Nitrógeno que entra a los humedales como Nitrógeno orgánico y Amoniacal (La combinación de estos dos se representa como Nitrógeno Total Kendal (NTK)), nitritos y nitratos.

En los sistemas de humedales, el potencial de remoción del Nitrógeno puede tomar varios años en desarrollarse, por lo menos se requiere dos o tres etapas del crecimiento de las plantas, sistemas de raíces, capa de residuos, y materiales del bentos, para alcanzar el equilibrio (Lara, 1999).

#### **6.3.1 Comportamiento Nitrógeno Amoniacal:**

##### **Primera etapa:**

El análisis de nitrógeno amoniacal presenta un promedio de 79,3 mg/L para la entrada, y valores de 52,7 mg/L y 30,7 mg/L para el humedal 1 y 2 respectivamente, los valores superiores para la entrada se deben a la forma inicial predominante del nitrógeno en su determinado ciclo, los valores de las salidas presentan bajos promedios de concentración siendo más significativo para el humedal 2.

NH <sub>3</sub> (mg N- NH <sub>3</sub> /L)	Entrada	Salida H.1	Salida H.2
<b>Promedio</b>	79,3	52,7	30,7
<b>Máx.</b>	100,8	63,3	61,6
<b>Mín.</b>	54,3	41,7	13,7

Tabla 20. Promedio de concentración de nitrógeno amoniacal la primera etapa.

En la figura 34 se observa el comportamiento del nitrógeno amoniacal a través del tiempo, se puede apreciar que en esta etapa se dan bajas concentraciones de nitrógeno amoniacal en las salidas para ambos humedales, la entrada se caracteriza por mayores concentraciones debido a que la forma inicial predominante de nitrógeno en aguas residuales es la forma amoniacal. La última semana presenta un descenso en la concentración en la entrada, esto se debe a que en esta semana, se realizaron exámenes finales, por lo tanto la actividad en la universidad fue más baja, lo que permitió que se redujera los contaminantes en el agua residual viéndose afectada las concentraciones para la entrada y manteniéndose constante los contenidos de los efluentes en ambos humedales por su tiempo de retención, ambos humedales se destacan por presentar una tendencia estable en sus efluentes siendo más destacable para el humedal 2 el cual siempre se mantuvo una concentración menor en comparación con el humedal 1.

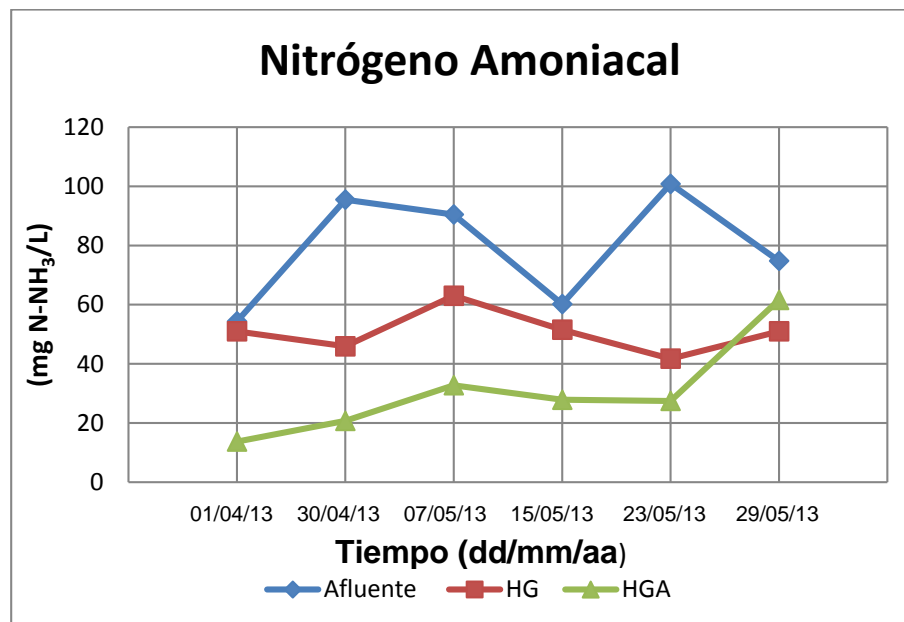


Figura 33. Comportamiento de las concentraciones de nitrógeno amoniacal a través del tiempo de funcionamiento de los sistemas durante la primera etapa.

### Segunda Etapa:

Esta etapa se caracteriza por menores concentraciones de Nitrógeno Amoniaco en la entrada, registrándose para la entrada un promedio de 56,8 mg/L siendo este valor más bajo al reportado en la primera etapa; para los humedales se tienen promedios de 49,58 mg/L y 32,32 mg/L para el humedal 1 y 2 respectivamente, ambos humedales presentan bajas concentraciones, siendo más significativas para el humedal 2.

NH <sub>3</sub> (mg N- NH <sub>3</sub> /L)	Entrada	Salida H.1	Salida H.2
Promedio	56,8	49,6	32,3
Máx.	68,9	58,2	52,6
Mín.	50,4	39,6	12,9

Tabla 21. Promedios de concentraciones de nitrógeno para la segunda etapa.

La figura 35 muestra el comportamiento del nitrógeno amoniacal con respecto al tiempo, de esta se destaca la concentración de la entrada la cual disminuyo considerablemente tomando como referencia la reportada en la primera etapa, esto es debido a los bajos contaminantes aportados por la universidad como consecuencia de la baja población asumida por la finalización del primer semestre académico, las salidas conservan una tendencia similar a la reportada para la primera etapa, sin embargo en la semana 6 el humedal 2 (lecho de arena) presento una mayor concentración que el humedal 1 (lecho de grava).

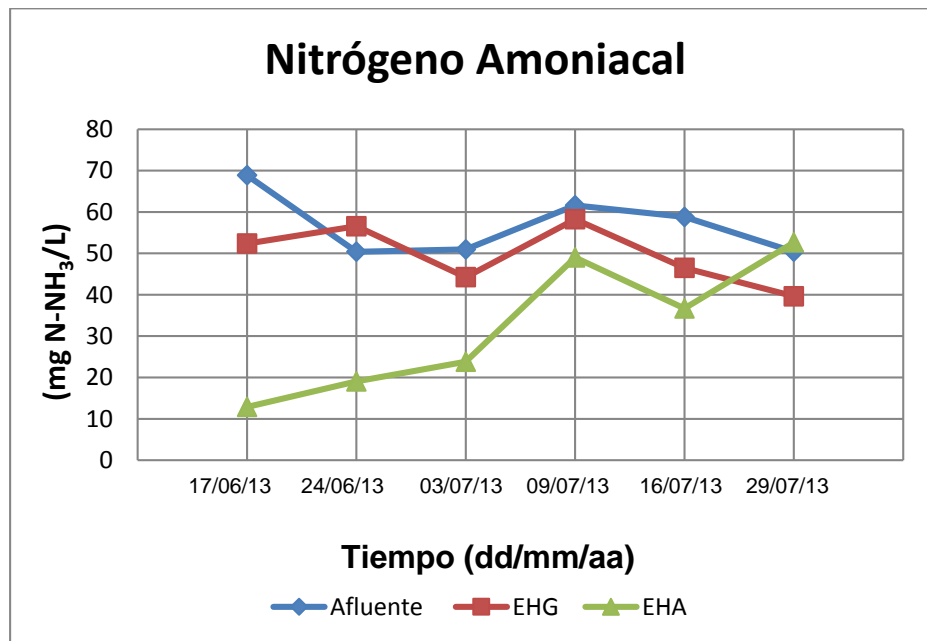


Figura 34. Comportamiento de las concentraciones de nitrógeno amoniacal a través del tiempo para la segunda etapa.

### 6.3.2 Comportamiento Nitritos:

Se cree que la mejor manera de remover el nitrógeno amoniacal en un humedal es la nitrificación biológica seguida por desnitrificación. La nitrificación ocurre cuando se tienen condiciones aerobias, se tiene la suficiente alcalinidad y la temperatura adecuada, y después de que la mayoría de la DBO<sub>5</sub> ha sido removida, para que los organismos nitrificantes puedan competir con los organismos heterótrofos por el oxígeno disponible. Investigaciones realizadas han demostrado que las condiciones limitantes para la nitrificación es la falta de oxígeno. Por lo general los procesos en el interior de humedal son anaerobios, ya que no existe suficiente oxígeno para la nitrificación y posterior desnitrificación, por lo que no existen disminuciones considerables de nitrógeno en todas sus formas en humedales de flujo subsuperficial; Sin embargo en algunos casos se han logrado obtener reducciones considerables, asociadas a un aporte de oxígeno por parte de las raíces de las plantas, pero solo se ha dado en sistemas de poca profundidad (0,3 m) (Lahora, 2001).

En los humedales estudiados la nitrificación ocurre por bacterias autótrofas aeróbicas que aprovechan el poder reductor del amonio transformándolo en nitrato. La nitrificación requiere de 4,6 mg de oxígeno por cada miligramo de amonio (expresado como nitrógeno). Se ha comprobado que en humedales horizontales la nitrificación no es muy considerable debido a que hay poca transferencia de oxígeno así como zonas aerobias (García y Corzo, 2008).

#### Primera Etapa:

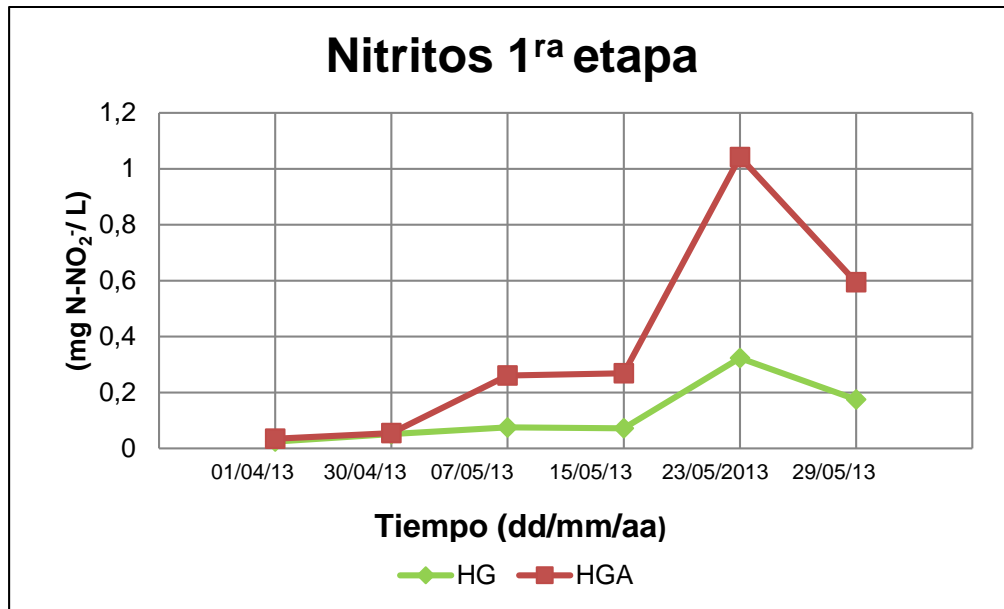
Los nitritos presentan un promedio de 0,1960mg/L y 0,3761mg/L para las salidas del humedal 1 y 2 respectivamente, para la entrada no se reportaron promedios de concentración, para ambos humedales se reportan sus máximos en la quinta semana, siendo de 0,3234mg/L para el humedal 1 y 1,0425 mg/L para el humedal 2.

<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (mg N- NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)</b>	<b>Salida H.1</b>	<b>Salida H.2</b>
<b>Promedio</b>	0,1203	0,3761
<b>Máx.</b>	0,3234	1,0425
<b>Mín.</b>	0,0246	0,0348

Tabla 22. Promedio de concentraciones de para la primera etapa.

En la figura 36 se observa el comportamiento de los nitritos con respecto al tiempo, para la entrada no se reportan datos de concentración debido a que en las todas las semanas de muestreo en ambas etapas no se reportó ningún algún valor ya que su concentración se encontraba por debajo del límite de detección del método (*ver metodología*), por lo tanto no se reportaron en ninguna de las etapas de análisis, este fenómeno se puede

deber a que el agua residual utilizada como alimentación para los humedales inicialmente pasaba por un tratamiento primario para finalmente reposar en un tanque de sedimentación el cual posiblemente se dieron procesos de nitrificación debido a la interacción del agua residual con en oxígeno atmosférico por la tanto los nitritos presentes pudieron convertir en nitratos, para los efluentes se puede inferir una buena tendencia en cuanto al comportamiento de las concentraciones, se observa que el humedal 1 presenta una concentración más baja de nitritos siendo 0,0246 mg/L la menor concentración reportada.



**Figura 35.** Comportamiento de las concentraciones de nitritos (N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) a través del tiempo de funcionamiento de los sistemas durante la primera etapa.

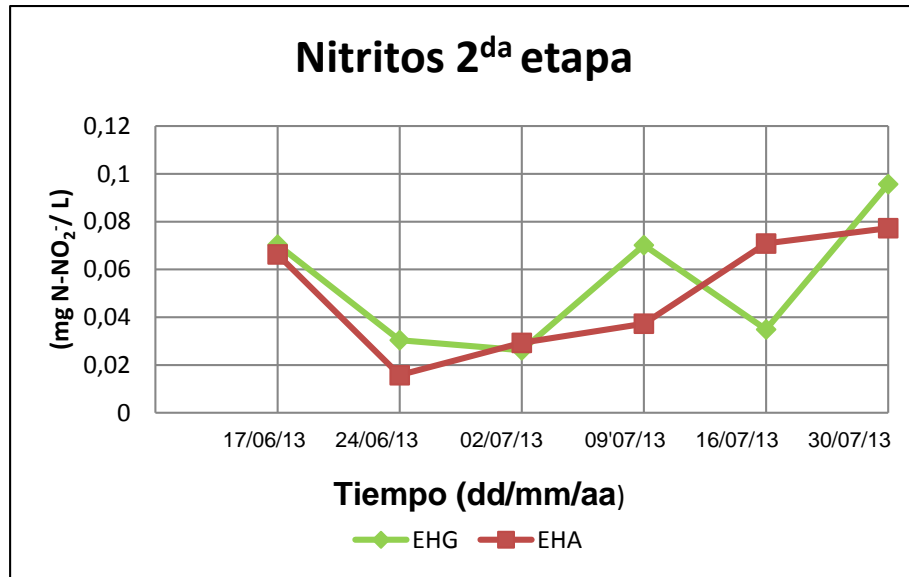
### Segunda etapa:

Los valores reportados para la segunda etapa son menores en comparación con la primera etapa, el humedal 1 presentan una concentración promedio de 0,0546mg/L y para el humedal 2 una concentración de 0,0495mg/L, este humedal presenta en la segunda semana el valor mínimo de concentración siendo de 0,0158 mg/L.

NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg N- NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Salida H.1	Salida H.2
<b>Promedio</b>	0,0546	0,0495
<b>Máx.</b>	0,0957	0,0773
<b>Mín.</b>	0,0262	0,0158

Tabla 23. Promedio de concentraciones de nitritos para la segunda etapa.

La figura 37 representa el comportamiento de los Nitritos para la segunda, se puede deducir que el comportamiento es más inestable ya que no se puede establecer una tendencia aproximada, sin embargo el humedal 2 presenta una menor concentración siendo esta no muy significativa. Para ambas etapas los resultados obtenidos entran en los rangos permisibles, en cuanto a la concentración de Nitritos en agua potable, siendo 1mg/L, esto se puede deber a que los nitritos se caracterizan por ser muy inestables en aguas residuales donde intervienen procesos aerobios, lo que permite que oxiden fácilmente a Nitratos.



**Figura 36.** Comportamiento de las concentraciones de nitritos (N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) a través del tiempo para la segunda etapa.

### 6.3.3 Comportamiento Nitratos:

El proceso de desnitrificación permite eliminar el nitrato formado previamente por la nitrificación y convertirlo en nitrógeno gaseoso. Esta reacción sólo ocurre en condiciones de anoxia y en presencia de materia orgánica, ya que es realizada por bacterias heterotróficas. Por esta razón los humedales verticales tienen dificultades para eliminar el nitrato formado y frecuentemente se combinan en serie seguidos de humedales horizontales. Las plantas pueden eliminar nitrógeno mediante la asimilación de amonio o nitrato. En los humedales generalmente utilizarán preferentemente amonio ya que es más abundante (García y Corzo, 2008).

#### Primera etapa:

Para la entrada se reporta un promedio de 2,2020 mg/L obteniéndose un máximo de 3,5924 mg/L para la quinta semana y un mínimo de 1,4723 mg/L para la cuarta semana, los efluentes presentan promedios de 1,9316mg/L y 2,7744mg/L para los humedales 1 y 2 respectivamente, el humedal 2 se caracteriza por presentar un promedio de salida mayor a la entrada, siendo

el valor mayor de 4,3595 mg/L registrado en la sexta semana, para el humedal 1 la concentración promedio en más baja en comparación con la entrada y el humedal 2.

$\text{NO}_3^-$ (mg N- $\text{NO}_3^-$ )	Entrada	Salida H.1	Salida H.2
<b>Promedio</b>	2.2020	1.9316	2.7744
<b>Máx.</b>	3.5924	2.6250	4.3595
<b>Mín.</b>	1.1896	0.9844	1.0517

Tabla 24. Promedios de concentración de nitratos para la primera etapa.

La figura 38 corresponde al comportamiento de los nitratos a través del tiempo. Para la primera etapa se observa un comportamiento muy inestable en la entrada debido a que algunos valores obtenidos son más bajos que los reportados para los efluentes, esto se debe posiblemente a transformaciones del nitrógeno, como es la oxidación del nitrógeno amoniacal así como también debido a los procesos de asimilación por parte de las plantas, para esta etapa el humedal 1 presenta menores concentraciones, siendo la concentración menor reportada de 1,4529 mg/L para la tercera semana de análisis.

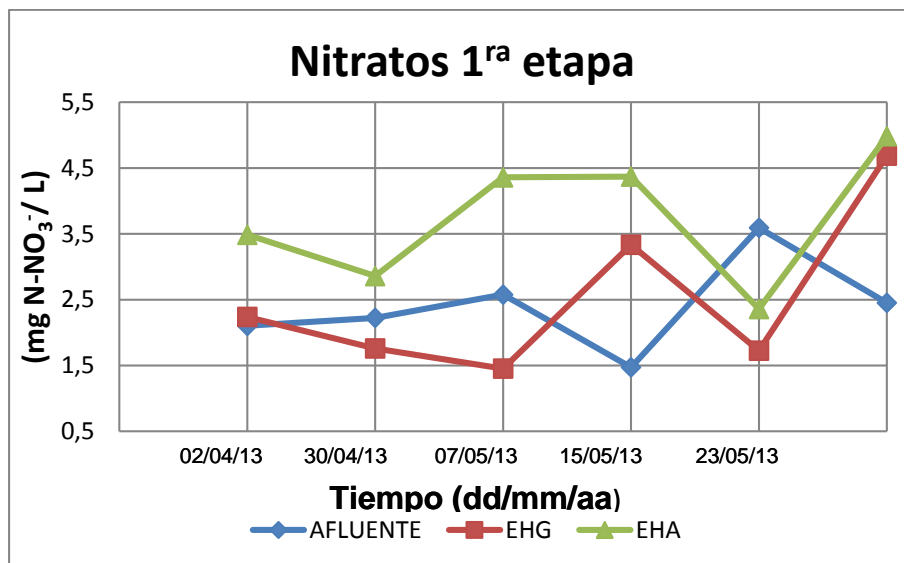


Figura 37. Comportamiento de las concentraciones de nitratos a través del tiempo para la primera etapa.

### Segunda etapa:

La entrada presenta un promedio de 2,5805, su promedio máximo reportado fue de 3,2924, perteneciente a la segunda semana, para los efluentes se tienen promedios de 2,3498 y 1,9963 para los humedales 1 y

2, se puede observar que el humedal 2 presenta menores promedios máximos y mínimos en comparación del humedal 1.

NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Entrada	Salida H.1	Salida H.2
<b>Promedio</b>	2.5805	2.3498	1.9963
<b>Máx.</b>	3.2924	2.9646	2.4653
<b>Mín.</b>	1.8913	1.9264	1.7101

Tabla 25. Promedio de concentraciones de nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) para la segunda etapa.

La figura 39 representa el comportamiento de los Nitratos a través del tiempo para la segunda etapa de investigación, se puede inferir una mejor tendencia de sus variables en comparación con la primera etapa, la entrada solo presenta una concentración menor que los efluentes en la tercera semana, ambos humedales presentan concentraciones similares sin embargo hay una leve tendencia que favorece el humedal 2 para el cual se reporta la menor concentración siendo esta de 1,7101 mg/L perteneciente a la 5 semana de análisis.

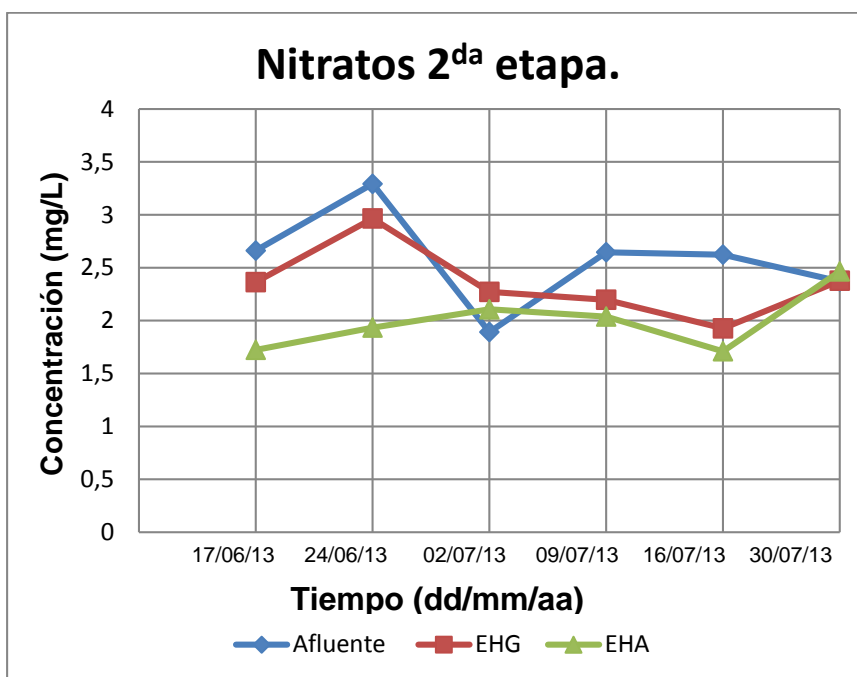


Figura 38. Comportamiento de las concentraciones de nitratos a través del tiempo para la segunda etapa.

### 6.3.4 Cargas Másicas.

En figura 40 se muestra el aporte específico promedio en carga másica de cada una de las especies del Nitrógeno al Nitrógeno Total, para ambas

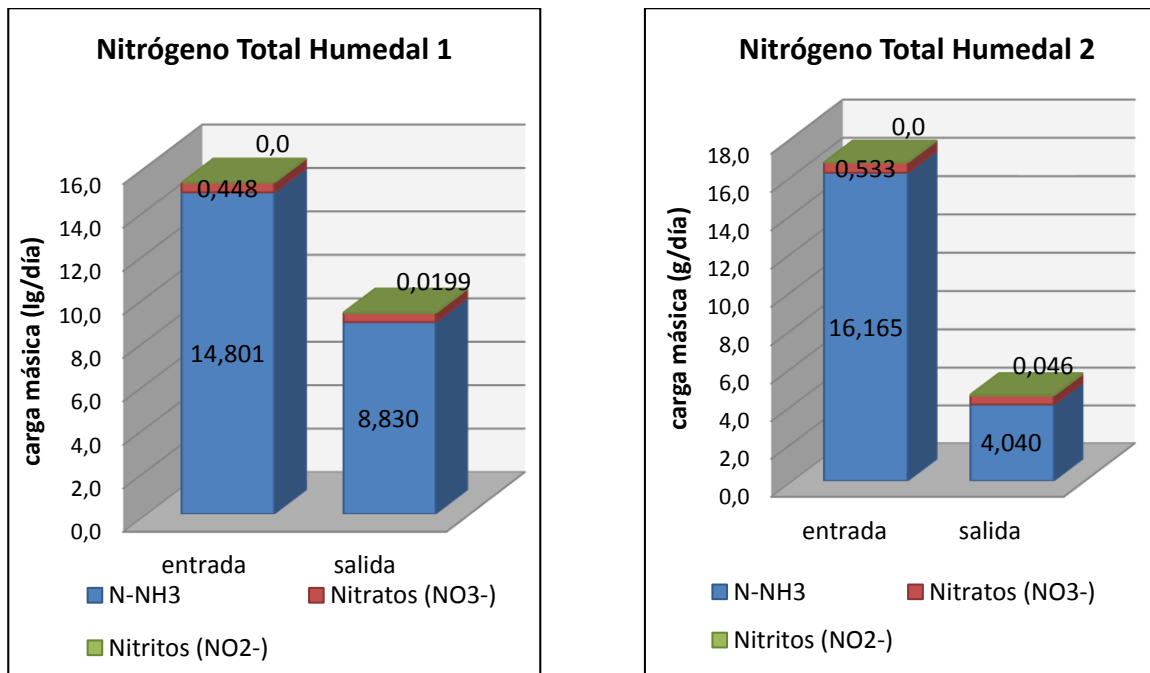


etapas de la investigación. Para ambas etapas no se reportan cargas másicas de Nitritos para la entrada debido a que en los análisis de laboratorio se encontró que esta especie estaba por debajo del límite de detección del método utilizado como ya se había mencionado (*ver metodología*).

En la primera etapa para el humedal 1 se reporta una carga másica de promedio de 14,801 g/día aportada por el Nitrógeno Amoniaco y 0,448 g/día aportada por los Nitratos, para un promedio total de entrada de 15,249 g/día, para la salida se reporta una carga másica promedio de 8,830 g/día para el nitrógeno amoniacal, 0,419 g/día para Nitratos y 0,0199 g/día para nitritos, para un promedio total de salida de 9,269 g/día.

Para la entrada del humedal 2 se reporta una carga másica promedio de 16,165 g/día aportada por el nitrógeno amoniacal, y 0,533 g/día aportada por los nitratos, para un promedio total de entrada de 16,70 g/día como nitrógeno total, para la salida se reporta una carga másica promedio de 4,04 g/día para nitrógeno amoniacal, 0,472 g/día para Nitratos y 0,46 g/día para nitritos, para un promedio total de salida de 4,51 g/día como nitrógeno total.

**Primera etapa:**

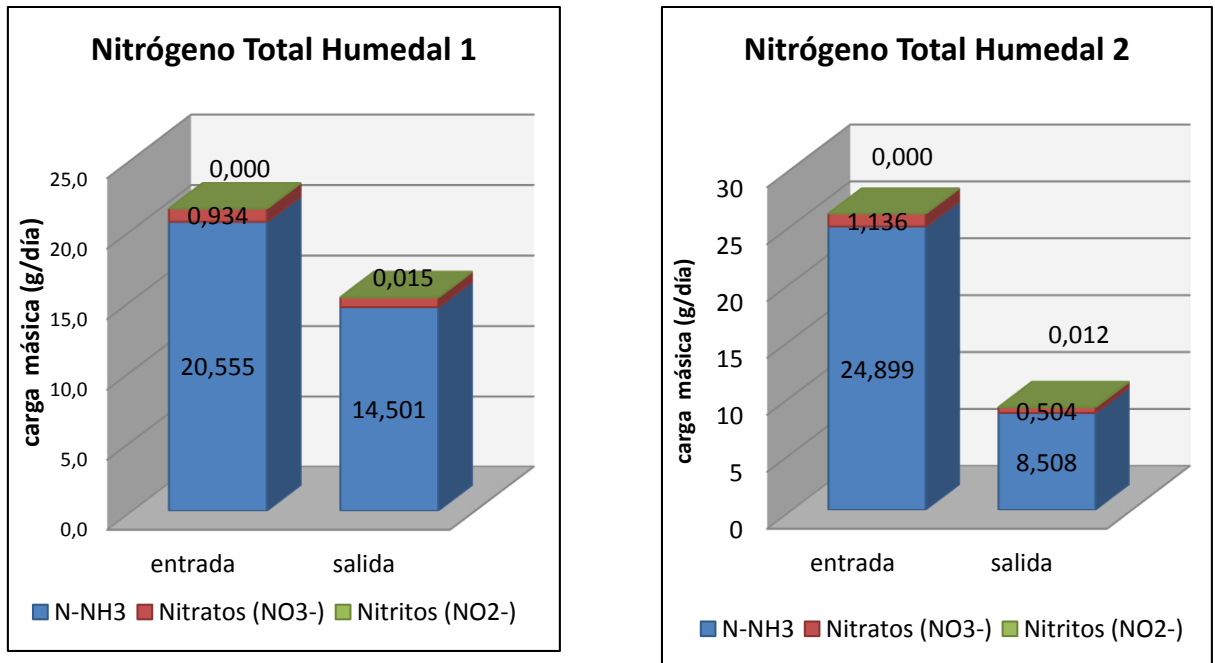


**Figura 39.** Cargas másicas promedio de entrada y salida para nitrógeno en la primera etapa.

**Segunda etapa:**

Para la segunda etapa se registra para la entrada del humedal 1 una carga másica promedio de 20,555 g/día aportada por el nitrógeno amoniacal y

0,934 g/día aportada por los nitratos, para un promedio total de entrada de 21,490 g/día como nitrógeno total, para la salida se reporta una carga másica promedio de 14,501 g/día para Nitrógeno Amoniacal, 0,690 g/día para Nitratos y 0,0154 g/día para Nitratos para un promedio total de salida de 15,206 g/día reportado como Nitrógeno Amoniacal, obteniéndose un promedio de remoción de 6,283 g/día; Para la entrada del humedal 2 se reporta una carga másica promedio de 24,899 g/día aportada por el Nitrógeno Amoniacal, y 1,136 g/día aportada por los Nitratos, para un promedio total de entrada de 26,03 g/día como Nitrógeno Total, para la salida se reporta una carga másica promedio de 8,508 g/día para Nitrógeno Amoniacal, 0,504 g/día para Nitratos y 0,012 g/día para Nitritos, para un promedio total de salida de 9,02 g/día como Nitrógeno Total, obteniéndose un promedio de remoción de Nitrógeno total de 17,011 g/día.



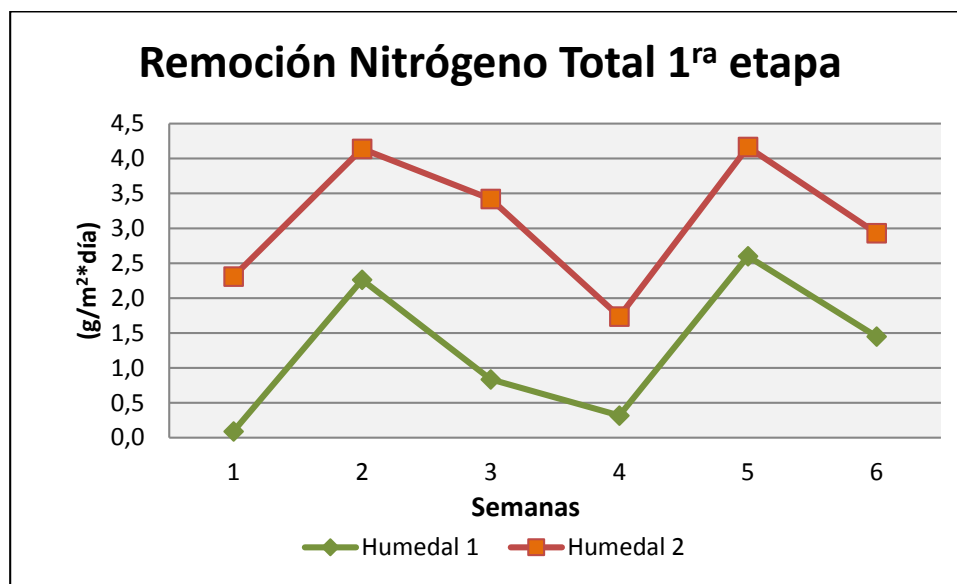
**Figura 40.** Cargas másicas promedio de entrada y salida para nitrógeno total en la segunda etapa.

### 6.3.5 Remociones de Nitrógeno Total:

Debido a los diferentes procesos de transformación que sufre el nitrógeno en sus distintas especies al interior del humedal y teniendo las condiciones anaerobias acompañada de microzonas aerobias como también la variación de parámetros como el oxígeno disuelto y pH que determinan la dirección de las transformaciones, el análisis de remoción y eficiencia de remoción será presentada en términos de Nitrógeno total.

#### Primera Etapa.

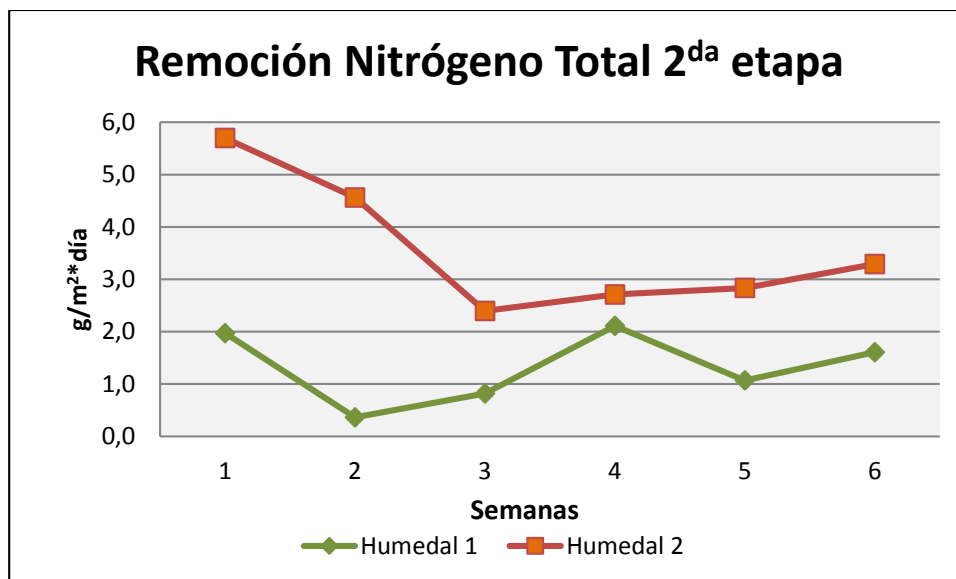
Se muestran a continuación los resultados obtenidos para los promedios de remoción de nitrógeno total para la primera etapa de la investigación, el nitrógeno total se reporta como la suma del nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos y también el comportamiento a lo largo de esta primera etapa. Para el humedal 1 (lecho de grava) se tiene un valor medio de remoción de  $1,259 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$  mientras que para el humedal 2 (lecho de arena) se obtuvo  $2,218 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$ . En cuanto al comportamiento de la remoción en este parámetro se puede apreciar en la figura 42, en donde se aprecia un comportamiento similar para ambos humedales, para la primera semana de muestreo se evidencian valores bajos posiblemente porque los humedales, microorganismos y en general la biota se encuentra en proceso de adaptación.



**Figura 41.** Comportamiento de la remoción de nitrógeno total durante la primera etapa

### Segunda etapa:

En figura 43 se muestra el comportamiento de la remoción de nitrógeno total a lo largo del seguimiento para la segunda etapa. Al igual que para materia orgánica el humedal 2 presenta mejores resultados en cuanto a remoción de nitrógeno total respecto al humedal 1, ya que siempre presentó valores por encima de los hallados para este último, como se evidencia en la gráfica siguiente. Como tal se hallaron promedios de remoción de nitrógeno total de  $1,32 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$  para el humedal 1 y de  $3,58 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$  para el humedal 2.

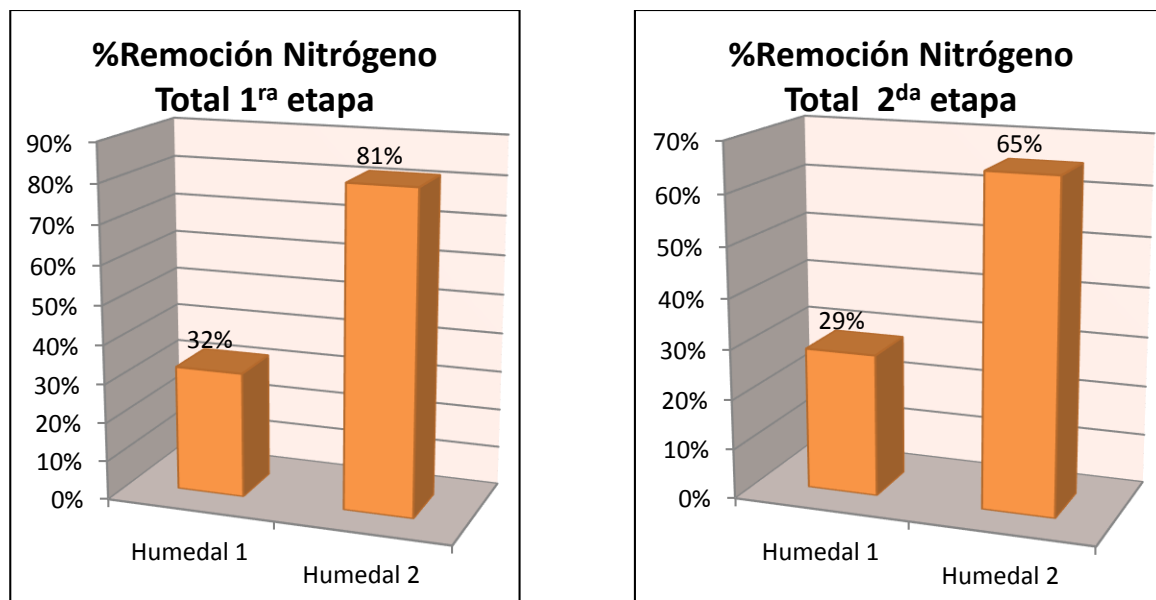


**Figura 42.** Comportamiento de la remoción de nitrógeno total durante la segunda etapa.

### 6.3.6 Eficiencias de remoción de Nitrógeno Total:

En la figura 44 se muestran los porcentajes de remoción de Nitrógeno Total para ambos humedales en las dos etapas de investigación, para la primera etapa se observa un porcentaje de remoción del 32% para el humedal 1 y 81% para el humedal 2, se aprecia claramente la diferencia en cuanto a las eficiencias de remoción, siendo más significativa para el humedal 2. Para la segunda etapa se observan porcentajes de remoción un poco más bajos debido a que en la remoción de las diferentes especies de nitrógeno están involucradas un número mayor de transformaciones, lo que implica de alguna manera más procesos internos en el humedal como tal y de esta forma intervienen más variables que influirán directamente en el comportamiento de la remoción de las distintas especies de nitrógeno; una de ellas es el tiempo de retención, el cual debido al aumento de la carga hidráulica disminuye necesariamente. Para el humedal 1 se reporta un porcentaje de remoción de 29% y para el humedal 2 de 65%, caracterizándose por presentar una mayor eficiencia de remoción en ambas etapas, sin embargo se destaca el buen rendimiento que presentan ambos humedales en cuanto a la remoción de Nitrógeno Amoniacal ya que sin importar de que el decreto 3931 de 2010 establezca porcentajes de remoción mínimos para un tratamiento primario, se concluye el gran potencial que presentan en cuanto a la remoción de Nitrógeno Total.

Finalmente se evidencia claramente que el humedal 2 (lecho de Arena) presenta una mayor remoción reflejada en una Mayor eficiencia de remoción de Nitrógeno Total.



**Figura 43.** Porcentajes de remoción de nitrógeno total en ambas etapas.

A pesar de que los porcentajes de remoción de nitrógeno total no presentan valores similares respecto a las remociones de materia orgánica, los porcentajes hallados están acordes con la literatura, en donde se habla de valores de porcentaje de remoción bajos (Vymazal, 2001). Sin embargo se evidencian resultados positivos en cuanto al comportamiento de remoción de este parámetro.

### 6.3.7 Análisis Inter-etapas.

Evaluar y analizar el efecto del aumento de la carga hidráulica en los humedales en términos de remoción para este parámetro es también importante por lo que al igual que para materia orgánica se realizó la prueba de contraste t-student y prueba de contraste F con las cuales se puede llegar concluir adecuadamente si hay o no una diferencia significativa en ambos humedales.

Se pretende entonces determinar si hubo o no diferencias significativas entre la primera y segunda etapa en cuanto a la remoción de nitrógeno total. En las tablas 24 y 25 se pueden observar los valores del estadístico t y F y su valores críticos correspondientes tanto para el humedal 1 como para el humedal 2 (*ver anexos*). Para ambos humedales el valor del estadístico t y F hallado es menor que su valor crítico correspondiente por lo que se acepta la hipótesis nula en ambos casos, es decir, no existen diferencias significativas en la remoción de nitrógeno total, además de no existir una variación considerable en las remociones entre la primera y segunda etapa para el humedal 1 (lecho de grava) ni para el humedal 2 (lecho de arena).

<b>Humedal 1</b>				
	Estadístico F determinado	Valor crítico F correspondiente	Estadístico t determinado	Valor crítico t
<b>Nitrógeno Total</b>	3,501	5,050	0,560	2,228

Tabla 26. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total del humedal 1.

<b>Humedal 2</b>				
	Estadístico F determinado	Valor crítico F correspondiente	Estadístico t determinado	Valor crítico t
<b>Nitrógeno Total</b>	3,270	5,050	1,502	2,228

Tabla 27. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total del humedal 2.

### **Análisis Inter-Humedales.**

De igual forma con respecto al análisis inter-humedales en cuanto a DBO<sub>5</sub> y DQO, se procedió de igual forma para el análisis de nitrógeno Total con el fin de identificar cuál de los dos medios filtrantes, grava o arena, presenta mejores resultados en relación con la eficiencia de remoción de nitrógeno total. Igualmente las configuraciones tipo 1 y tipo 2 corresponden a la primera etapa de seguimiento, mientras que las configuraciones tipo 3 y 4 corresponden a la segunda etapa.

Al analizar ambas configuraciones teniendo en cuenta principalmente los valores estadísticos F y t con sus correspondientes valores críticos se denota como para ambas etapas la prueba de contraste f presenta un valor estadístico menor al valor crítico por lo tanto se acepta que la variación en cuanto a la remoción de Nitrógeno total es similar, sin embargo para la prueba de contraste f se obtuvieron valores estadísticos mayores a los valores críticos por lo tanto se resalta de que a pesar de que ambos humedales no presentan variaciones considerables de remoción, presentan una diferencia significativa en cuanto a las remociones medias obtenidas.

<b>Primera Etapa</b>				
	Estadístico F determinado	Valor crítico F correspondiente	Estadístico t determinado	Valor crítico t
<b>Nitrógeno Total</b>	4,133	5,050	4,093	2,228

Tabla 28. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total en la primera etapa.

<b>Segunda Etapa</b>				
	Estadístico F determinado	Valor crítico F correspondiente	Estadístico t determinado	Valor crítico t
<b>Nitrógeno Total</b>	2,770	5,050	3,535	2,228

Tabla 29. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total en la segunda etapa.

#### **6.4. Comportamiento Sólidos Suspendidos Totales.**

Generalmente mucho sólidos quedan retenidos en el interior del humedal, debido a la combinación de muchos fenómenos de tipo físico que en su conjunto se denominan como filtración del medio granular. Entre estos fenómenos cabe destacar la sedimentación debida a la baja velocidad de circulación del agua, así como también del tamizado que sucede a nivel de los espacios intersticiales del medio granular (García y Corzo, 2008).

Los sólidos suspendidos, son de los parámetros físicos que presentan mayores remociones en humedales, estos son eliminados de una manera muy efectiva en los primeros 5 metros de distancia desde la entrada y consiguiendo por lo general valores inferiores a 20 mg/L. Una parte de estos sólidos están formados por materia orgánica, algas o microorganismos, que son degradados hasta productos gaseosos, debido a esto los procesos de colmatación en humedales suelen ser muy extensos (Lahora, 2001).

##### **Primera etapa:**

Los Sólidos Suspendidos Totales presentan para la entrada un promedio de 114,1, siendo el valor promedio máximo de 155 reportado para la primera semana y el promedio mínimo de 60,5 para la tercera semana, el humedal 1 presenta un promedio de 14,67 y el humedal 2 un promedio de 16,33, se puede destacar que ambos humedales presentan promedios máximos y mínimos muy similares.

SST (mg/L)	Entrada	Salida H.1	Salida H.2
<b>Promedio</b>	140,1	13,42	13,42
<b>Máx.</b>	235	27	21
<b>Mín.</b>	60,5	6,5	6,0

Tabla 30. Promedios de concentración de Sólidos Suspendidos Totales para la primera etapa.

La figura 45 representa el comportamiento de los sólidos suspendidos totales a través del tiempo, de esta se observa un decaimiento en la concentración de sólidos suspendidos totales en la entrada entre la segunda y tercera semana, esto se debió a la disminución en la carga contaminante ocurrida en este periodo de tiempo por la razón ya mencionadas con anterioridad, para los humedales se observa una disminución muy significativa en las últimas dos semanas de análisis, sin embargo se presenta una mayor eliminación de sólidos en el humedal 2, el cual reporta la menor concentración obtenida, siendo esta de 6,0 mg/L obtenida en la quinta semana de análisis.

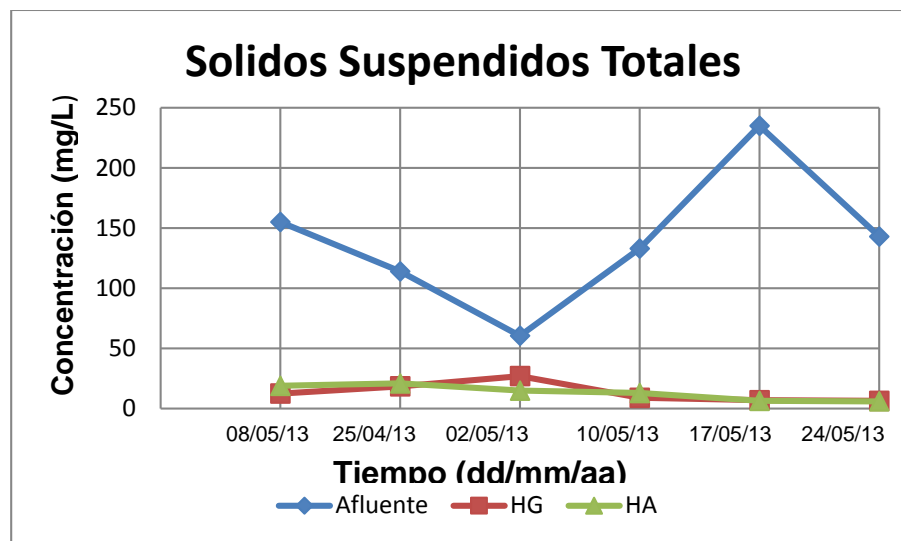


Figura 44. Comportamiento de las concentraciones de sólidos suspendidos totales a través del tiempo para la primera etapa.

### Segunda etapa:

La entrada presenta un promedio de 110,1 con un promedio máximo de 131 reportado en la cuarta semana y un promedio mínimo de 90,5 para la primera semana; Para los efluentes se reportan promedios de 7,04 y 9,08 para los humedales 1 y 2 respectivamente, de la siguiente tabla se puede notar que ambos humedales presentan promedios máximos y mínimos muy similares, siendo más bajos para el humedal 1.



SST	Entrada (mg/L)	Salida H.1 (mg/L)	Salida H.2 (mg/L)
Promedio	110.1	7.04	9.08
Máx.	131	11.75	14.25
Mín.	90.5	3.25	5,00

Tabla 31. Promedios de concentración de Sólidos Suspendidos Totales para segunda etapa.

La figura 46 representa el comportamiento de los Sólidos Suspendidos Totales a través del tiempo, de esta se puede inferir que los datos obtenidos para la segunda etapa son más bajos en comparación con la primera etapa esto se puede deber a que esta etapa los sistemas analizados se encontraban más adaptados a las condiciones de estudio, por lo tanto se pudo dar un mejor rendimiento en cuanto a la eliminación de contaminantes, en esta etapa el humedal 1 se caracteriza por presentar menores concentraciones, siendo la concentración menor reportada de 3,25 mg/L obtenida en la tercer semana de análisis, finalmente se puede resaltar que ambos humedales presentan una buena eliminación de sólidos evidenciada en las bajas concentraciones en sus efluentes.

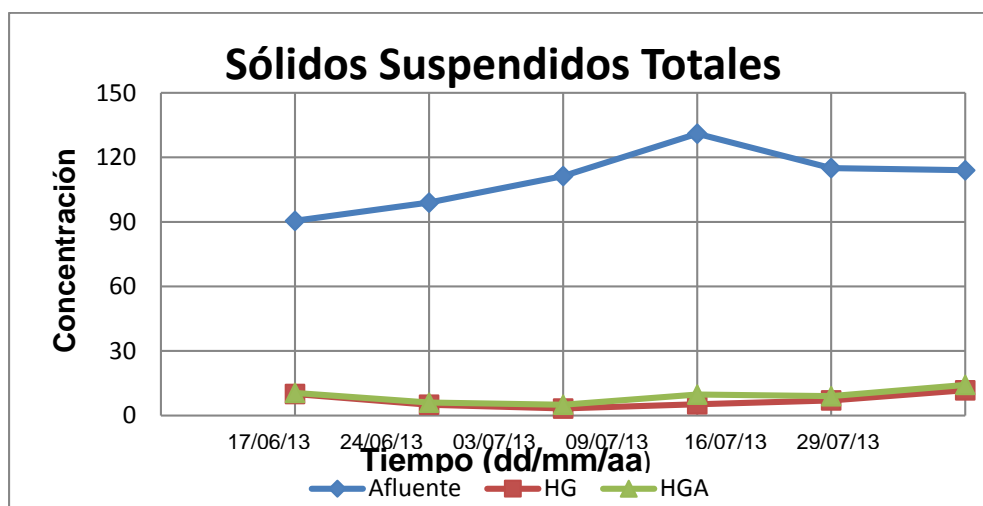


Figura 45. Comportamiento de las concentraciones de sólidos suspendidos totales a través del tiempo para la primera etapa.

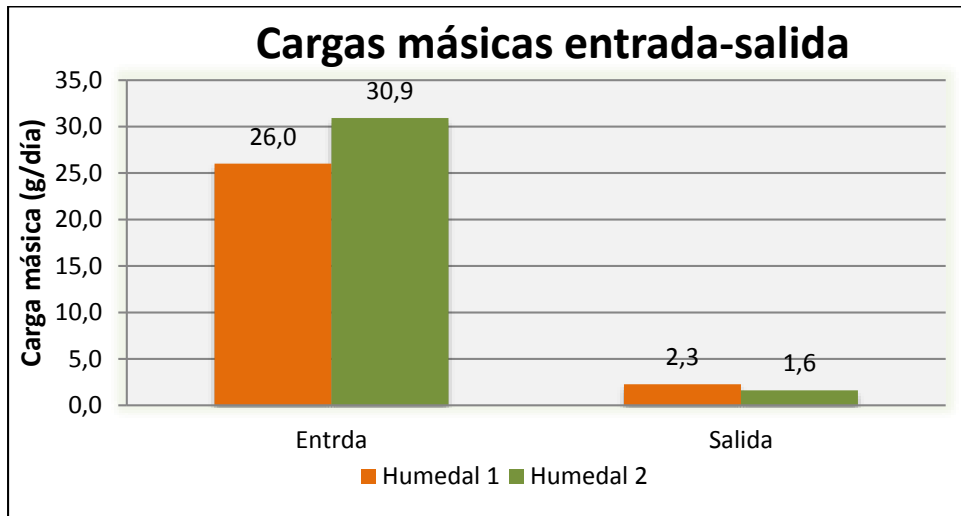
#### 6.4. 1 Cargas máxicas para Sólidos Suspendidos Totales.

En las Figuras 47 y 48 se muestran los promedios de las cargas máxicas tanto en la entrada como para la salida en ambos humedales para ambas etapas. Cabe destacar que a pesar de que la carga máxica de entrada promedio para el humedal 1 es menor en comparación con la del humedal 2, éste último evidencia un promedio de carga máxica de salida menor que la del humedal 1; siendo válida esta afirmación para ambas etapas, lo que

permite evidenciar también que el comportamiento en general para éste parámetro de ambos humedales no varió entre etapas.

### Primera Etapa.

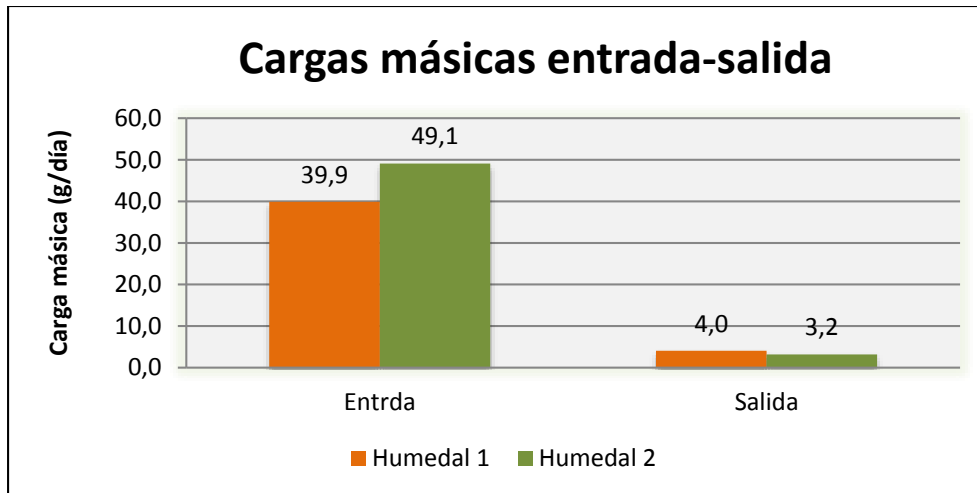
Para el humedal 1 (humedal con lecho de grava) se tiene una carga másica promedio de entrada de 26 g/día y de salida un valor promedio de 2,3 g/día, mientras que para el humedal 2 (humedal con lecho de arena) presenta un valor de carga másica promedio de 30,9 g/día para la entrada y de 1,6 g/día para la salida (Ver figura 47)



**Figura 46.** Cargas másicas de entrada y salida para sólidos suspendidos totales para la primera etapa.

### Segunda Etapa.

Para esta etapa se trabajó con cargas másicas más altas. Para el humedal 1 se tiene un valor promedio de 39,9 g/día para la entrada y su respectiva salida presenta un valor promedio de 4 g/día. Ahora, para el humedal 2 se tiene un valor de carga másica de entrada promedio de 49,1 g/día y 3,2 g/día para la salida.



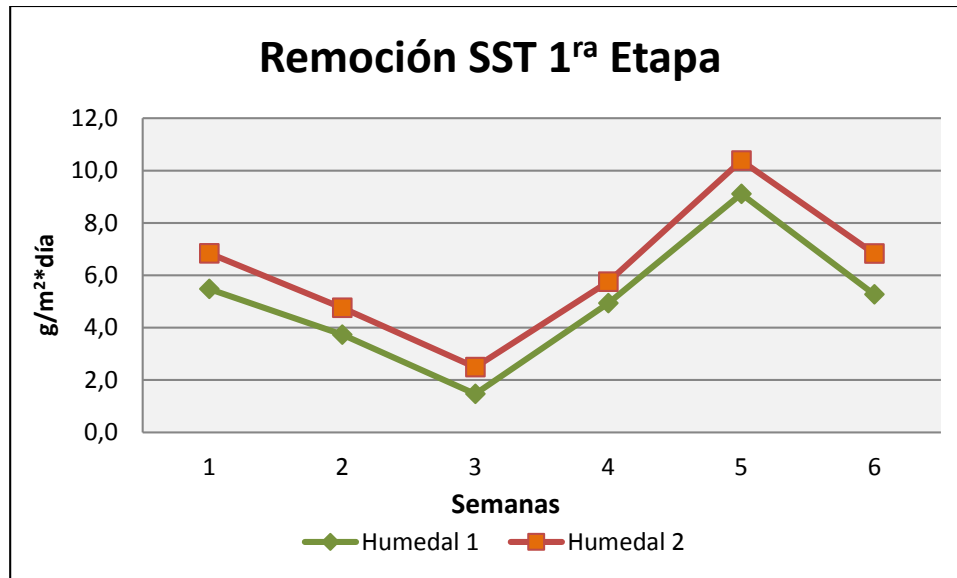
**Figura 47.** Cargas másicas de entrada y salida para sólidos suspendidos totales para la segunda etapa.

#### 6.4.2 Remociones de Sólidos Suspendidos Totales:

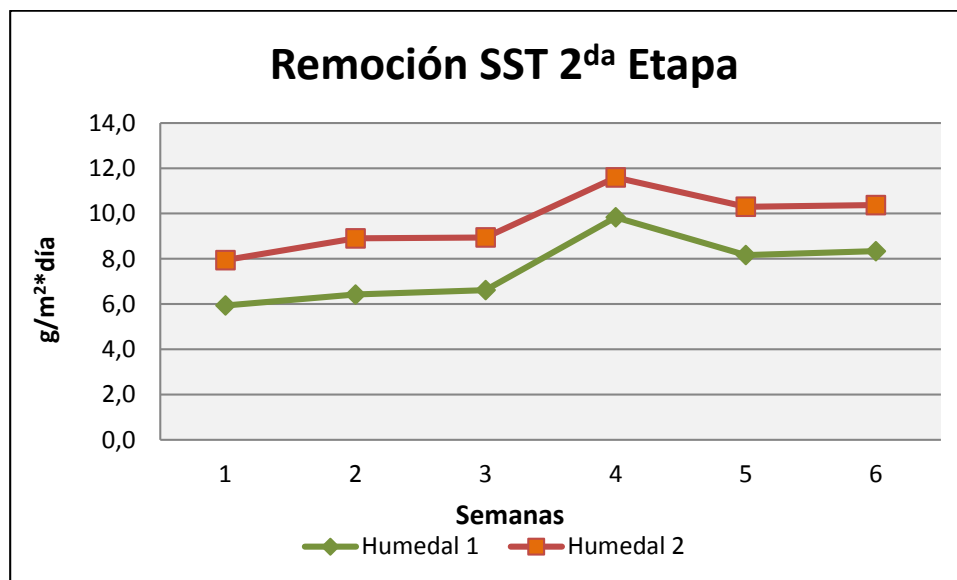
A continuación se muestra en la figura 49 el comportamiento de la remoción de sólidos suspendidos totales para ambos humedales en la primera etapa. Debido a la estabilidad y poca variación en los valores de las cargas másicas de salida para ambos humedales en relación a este parámetro, la variación en los valores de cargas netas removidas está dada por la variación en las concentraciones en el afluente. En general esta observación es válida para ambas etapas del estudio.

Con el aumento de carga hidráulica que se le aplicó a ambos humedales, las cargas másicas de entrada de sólidos suspendidos totales aumentaron evidentemente, ya que para el humedal 1 se registró un aumento promedio de 13,89 g/día y para el humedal 2 se registró un aumento promedio de 18,19 g/día, entre etapas; sin embargo las cargas másicas de salida para ambos humedales referentes a este parámetro mantuvieron valores menores a 9 g/día durante las dos etapas; por lo que las remociones en la segunda etapa son mayores que en la primera como se evidencia en las gráficas.

Los promedios de las remociones halladas para los humedales en estudio tanto en la primera como segunda etapa se mencionan a continuación. Para la primera etapa de seguimiento se hallaron valores de 5,0 g/m<sup>2</sup>\*día y 6,18 g/m<sup>2</sup>\*día para el humedal 1 y 2 respectivamente. Para la segunda etapa el humedal 1 presentó un valor promedio de 7,55 g/m<sup>2</sup>\*día y el humedal 2 presentó un valor promedio de 9,67 g/m<sup>2</sup>\*día.



**Figura 48.** Comportamiento de la remoción de sólidos suspendidos totales durante la primera



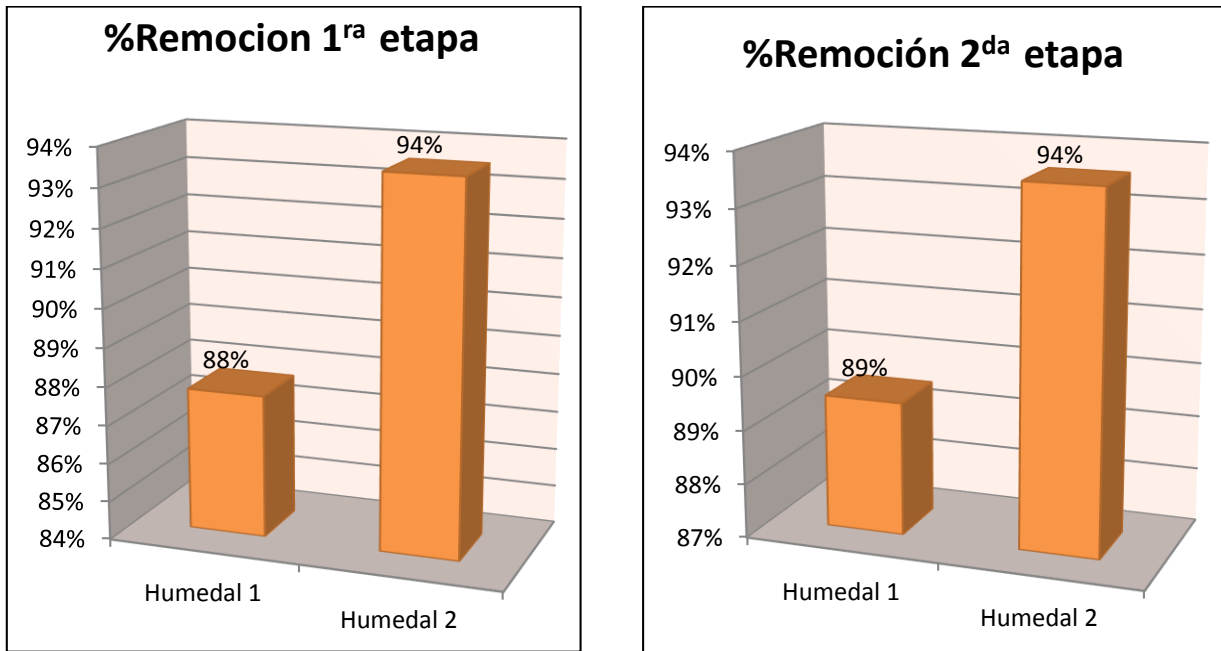
**Figura 49.** Comportamiento de la remoción de sólidos suspendidos totales durante la segunda etapa.

#### 6.4.3 Eficiencia de remoción de Sólidos Suspendidos Totales:

En la figura 51 se muestran los promedios de porcentaje de remoción para cada humedal y en cada una de las etapas para este parámetro de seguimiento. Se puede ver gran similitud entre los promedios de los porcentajes de remoción que presentó cada humedal en las dos etapas, ya que el porcentaje para el humedal 1 sólo varió en un 1% en la etapa 2 respecto a la etapa 1, y el humedal 2 presentó el mismo valor promedio de

remoción en las dos etapas. Teniendo en cuenta los valores mostrados, el humedal 2 (con lecho de arena) se destaca por tener un porcentaje remoción alto y mayor que el del otro humedal estudiado (lecho de grava).

Entonces es importante resaltar este comportamiento, ya que si tenemos en cuenta los resultados arrojados por la prueba t-student realizada y lo que se mencionó en el apartado inmediatamente anterior (Ver remociones) se puede hablar de un comportamiento amortiguador en ambos sistemas, que a pesar del aumento de carga hidráulica proporcionado en la etapa 2, los porcentajes de remoción no presentaron una diferencia estadísticamente significativa.



**Figura 50.** Porcentajes de remoción de sólidos suspendidos totales en ambas etapas.

#### 6.4.4 Análisis Inter-etapas.

Así como para los otros parámetros para SST se buscó establecer si hubo diferencias significativas entre etapas en la remoción, para lo cual se utilizaron las mismas herramientas estadísticas y el programa Excel. En las tablas 31 y 30 se muestra para cada humedal el estadístico F y t determinado y su respectivo valor crítico con el cual se concluye. En este caso se observa que las varianzas en las eficiencias remoción de sólidos para ambos humedales al contrastarlos de forma individual entre etapas no son significativamente diferentes, es decir varían de forma homogénea y de igual forma presentan eficiencias similares en ambas etapas, lo que quiere decir que a pesar de haber aumentado la carga hidráulica mantuvieron estables las eficiencias de remoción y dicho aumento no indujo fluctuaciones en los sistemas.

Humedal 1				
	Estadístico F determinado	Valor crítico F correspondiente	Estadístico t determinado	Valor crítico t
<b>S.S.T.</b>	3,112	5,050	0,297	2,228

Tabla 32. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total del humedal 1.

Humedal 2				
	Estadístico F determinado	Valor crítico F correspondiente	Estadístico t determinado	Valor crítico t
<b>S.S.T..</b>	1,090	5,050	0,00098	2,228

Tabla 33. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para sólidos suspendidos totales del humedal 2.

### Análisis Inter-Humedales.

De forma similar a los parámetros ya analizados, para sólidos suspendidos totales se pretende identificar en este apartado cuál de los medios filtrantes involucrados presenta mejores resultados. Retomando el arreglo establecido, donde las configuraciones tipo 1 y tipo 2 corresponden a la primera etapa de seguimiento y las configuraciones tipo 3 y 4 corresponden a la segunda etapa, se tiene lo siguiente.

Se tiene entonces que la configuración tipo 1 corresponde al humedal con lecho de grava con un tiempo de retención de 6 días y la configuración tipo 2 corresponde al humedal con lecho de arena con un tiempo de retención de 4 días. En las tablas 32 y 33 se presentan los estadísticos F y t determinados para S.S.T. Al observar los valores de los estadísticos F y t para ambas configuraciones se evidencia la varianza en las eficiencias de remoción presentadas por la configuración tipo 1 son significativamente diferentes a la de la configuración 2, en donde se habla que esta última presentó valores de eficiencia de remoción más homogéneos, menos fluctuantes. Sin embargo en cuanto a la comparación de medias se determina mediante la prueba t que no son significativamente diferentes. Lo anterior quiere decir que para la primera etapa las configuraciones 1 y 2 presentan eficiencias de remoción similares pero la primera presenta más fluctuación en relación al parámetro de evaluación.

Teniendo en cuenta que para ambas etapas el arreglo de configuraciones comparadas, Tipo1-Tipo2 y Tipo3-Tipo4 presentaron eficiencias de remoción similares, se identifica que el humedal con arena como medio filtrante, configuraciones Tipo 2 y Tipo 4, presenta mejores resultados respecto al humedal con lecho de grava ya que alcanzó resultados similares a este último teniendo un tiempo de retención menor.

<b>Primera Etapa</b>				
	Estadístico F determinado	Valor crítico F correspondiente	Estadístico t determinado	Valor crítico t
<b>S.S.T.</b>	8,096	5,050	1,077	2,447

Tabla 34. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total del humedal 1.

<b>Segunda Etapa</b>				
	Estadístico F determinado	Valor crítico F correspondiente	Estadístico t determinado	Valor crítico t
<b>S.S.T.</b>	2,838	5,050	1,213	2,228

Tabla 35. Valores del estadístico F y t para pruebas de contraste de hipótesis para nitrógeno total del humedal 1.

## 7. CONCLUSIONES

---

Se evaluó el efecto del aumento de la carga hidráulica sobre la eficiencia de remoción de contaminantes de tipo orgánico en aguas residuales domésticas en ambos humedales de flujo subsuperficial horizontal y sembrados con *Guadua angustifolia* Kunth.

Se evaluaron parámetros de calidad en aguas residuales domésticas tales como: Temperatura, pH, Oxígeno Disuelto, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Biológica de Oxígeno, Nitrógeno Amoniacal, Nitrito, Nitratos y Sólidos Suspendidos Totales; permitiendo establecer cargas contaminantes tanto de entrada como de salida de los sistemas objeto de estudio y así realizar su posterior evaluación.

Para la primera etapa de estudio se encontraron eficiencias de remoción de materia orgánica en términos de DQO de 87% y 91% y para la segunda de 88,5 y 91,9 %, para los humedales de grava y arena respectivamente. Para la DBO<sub>5</sub> se encontraron valores de 85% y 90% para la primera etapa y para la segunda de 89,3% y 91,7% para los humedales de grava y arena respectivamente. En relación a materia orgánica y con base en las pruebas estadísticas efectuadas se concluye que no hay un efecto negativo en el comportamiento de eficiencia de remoción de los sistemas objeto de estudio al aumentar la carga hidráulica, y que por el contrario estas se mantuvieron.

Respecto a la remoción de nitrógeno total, se encontraron para la primera etapa porcentajes de remoción de 32%, y 81% para el humedal de grava y arena respectivamente. En la segunda etapa se encontraron eficiencias menores, siendo un 29% para el humedal de grava y 65% para el humedal de arena. De esta manera y de acuerdo a las pruebas estadísticas de contraste se concluye que en la remoción de nitrógeno total no se encontraron diferencias significativas entre etapas tras al aumentar la carga hidráulica.

Ambos humedales se caracterizan por ser muy eficientes en cuanto a la remoción de SST, ya que se obtuvieron eficiencias de remoción de 88% y



94% para la primera etapa y 89% y 94 % para la segunda etapa, para los humedales de grava y arena respectivamente. De acuerdo a las pruebas estadísticas realizadas se encontró que no hubo diferencias significativas en las eficiencias de remoción tras el aumento de la carga hidráulica, lo que quiere decir que no se produjo un efecto negativo al aumentar la carga hidráulica.

Se evidencia que la arena como medio filtrante presenta un mejor rendimiento que la grava en cuanto a eliminación de contaminantes en aguas residuales domésticas, ya que presentó porcentajes de remoción similares a las de la grava pero con tiempos de retención menores, para todos los parámetros en ambas etapas de estudio

Ambos humedales presentaron una destacable estabilidad en concentraciones y cargas de contaminantes en los efluentes, ya que a pesar de que en la segunda etapa se aumentará la carga hidráulica tuvieron la capacidad de amortiguar dicho aumento, y por el contrario removieron mayor cantidad, a excepción del nitrógeno total.

Los humedales construidos cuentan con un gran potencial como métodos alternativos de tratamiento en países como Colombia, además de ser una tecnología viable para la depuración de aguas residuales, especialmente si éstas aguas son de origen doméstico, debido a su fácil adquisición, siendo menos costosos que un sistema de tratamiento convencional, también mejoran las características organolépticas como son el olor y color de las aguas residuales tratadas y tienen la capacidad de cumplir con las normativas de tratamiento.

A la hora de implementar los humedales artificiales como método de depuración es muy importante tener en cuenta aspectos como la instalación, operación y mantenimiento de estos, así como también el terreno y la zona climática pertenecientes al determinado lugar donde se quieran incorporar.

## 8. RECOMENDACIONES

---

Es necesario implementar un medio de control sin sembrar, con el fin de establecer el papel que juegan las plantas en cuanto a posibles remociones de contaminantes.

Se recomienda implementar sistemas de bombeo que permitan buenas condiciones de disposición del agua residual hacia los humedales, con el fin de tener un mejor control de la carga hidráulica a suministrar.

Se recomienda realizar un seguimiento al tiempo de retención con el que operarán los humedales, ya que de este factor dependerá en gran parte el buen funcionamiento de los humedales.

Se recomienda realizar investigaciones previas, con el fin de obtener mejor información en cuanto a las características de la región donde se ubicaran los sistemas de humedales, todo esto con el fin de realizar una mejor selección de la vegetación a utilizar en dichos sistemas.

Realizar estudios sobre mecanismos que permiten mejorar la conductividad hidráulica al interior de los sistemas sin que se presenten disminuciones en las eficiencias de los mismos, esto especialmente para medios filtrantes de baja porosidad.

Para la determinación de parámetros como el pH, oxígeno disuelto y potencial redox, es importante utilizar equipos portátiles que permitan medir de manera directa estos parámetros sin necesidad de transportar la muestra, de esta manera los resultados obtenidos serán más exactos y significativos.

Antes de implementar los humedales artificiales es importante llevar a cabo investigaciones tendientes a adecuar los modelos de diseño a las condiciones locales, así como analizar sus comportamientos con respecto a factores ambientales los cuales pueden llegar a variar las eficiencias de remoción de estos.

Se recomienda realizar un seguimiento al tiempo de retención con el que operarán los humedales, ya que de este factor dependerá en gran parte el buen funcionamiento de los humedales.

Se recomienda realizar un estudio que permita establecer las cargas hidráulicas críticas o límite, para tiempos de retención específicos, para las cuales las eficiencias de remoción presenten una variación significativa con efecto negativo.

## 9. BIBLIOGRAFÍA.

---

- Aguirre, P. Mecanismos de eliminación de la material orgánica y de los nutrientes en humedales construidos de flujo subsuperficial. Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos. Pp. 17-29. Edic. CPET. Barcelona.
- Bastian, R.K. y Hammer, D.A.; The use of constructed wetlands for wastewater treatment and recycling, in Moshiri, G.A., ed; Constructed wetlands for water quality Improvement: Lewis publishers, Chelsea, MI.1993.
- Bécares, E. Función de la vegetación y procesos de diseño de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal y flujo superficial”. En: *Nuevos Criterios para el diseño y operación de humedales construidos*. García, J., Morató, J. y Bayona, J.M Editores, CPET-Centro de publicaciones del Campus Nord, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, pág. 51-62. 2004
- Bernal, D.P., Cardona, D.A., Galvis, A., Peña, M.R. Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. En: Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Cali: Universidad del Valle. Octubre, 2003. P: 19-27.
- Cakmak, B.; Apaydin, H. Revisión. avances en la gestión de aguas residuales en Turquía, mediante tratamientos naturales o humedales artificiales. En: Revista de Investigación Agraria. Marzo, 2010. P: 188-201.
- Caro, C.A., García, A., Montoya, C. H, Guzman, S. Actualización del diagnóstico ambiental Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira. 2009. Disponible en línea:

<http://media.utp.edu.co/institutoambiental2011/archivos/documentosestrategicos-de-gestion-ambiental-en-el-campus-utp/diagnosticoactual.pdf>

- Collazos, C J. Tratamiento de aguas residuales domesticas e industriales. En: Catedra Internacional de Ingeniería (2: 06-07, 2008). Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingenierías.
- Corpocaldas- Cámara de comercio de Manizales. Microcluster de la guadua. Manizales, Caldas. 2002.
- Crites, R. y Tchobanoglous, g. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Derechos reservados. Copyright © 2000, por Mc Graw- Hill Interamericana. S. A. Santa fe de Bogotá. Pág. 776. Colombia.
- Delgadillo, O.; Camacho, A.; Pérez, L.F.; Andrade, M. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la gestión y uso del agua. Universidad Mayor de San Simón. Facultad de Agronomía. Cochabamba, Bolivia. 2010.
- Estrada G., I.Y. 2010. Monografía sobre humedales construidos de flujo Subsuperficial (HFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales. Monografía (Tecnóloga Química). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Escuela de Química, 2010.
- García, J.; Corzo, A. Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo Subsuperficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. España. Noviembre 2008.
- García, J.; Morató, J.; Bayona, J. Depuración con sistemas naturales: Humedales construidos. Barcelona, España (2005): Universidad Politécnica de Cataluña.
- Guangzhi, Sun; Tanveer Saeed. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. En: Journal of Environmental Management. Septiembre 2012, No 112, p: 429-488.
- Kadlec, R. H.; Knight, R. L. Treatment wetlands. Boca Raton Florida: Lewis Publishers. 1996. p. 893. (Treatment wetlands, 1996)
- Kadlec, R.H. Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. En: Ecological Engineering 35 (2009). P: 159–174.

- Lahora, A. Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). 2001. Gestión de aguas del levante almeriense. P: 99-112.
- Lara, J. A.; Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Instituto Catalán de Tecnologías. Universidad Politécnica de Cataluña. Master en Ingeniería y Gestión Ambiental. Barcelona, Mayo del 1999.
- Marín Montoya, J.P., Correa Ramírez, J.C. Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales construidos utilizando la *Guadua angustifolia Kunth*. Trabajo de Grado (Tecnólogo Químico). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología Escuela de Química, 2010.
- Mena Sanz, J., Rodríguez, L., Villaseñor, J., Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: ventajas de los sistemas híbridos. En congreso nacional del medio ambiente. Cumbre del desarrollo sostenible. Madrid. 2008.
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Plan nacional de manejo de aguas residuales municipales de Colombia (Versión Final). Bogota D.C. 2004: Junio. Disponible en:  
[http://portalterritorial.gov.co/apc-aa/files/7515a587f637c2c66d45f01f9c4f315c/PLAN\\_NACIONAL\\_DE\\_MANEJO\\_DE\\_AGUAS\\_RESIDUALES MUNICIPALES EN COLOMBIA.pdf](http://portalterritorial.gov.co/apc-aa/files/7515a587f637c2c66d45f01f9c4f315c/PLAN_NACIONAL_DE_MANEJO_DE_AGUAS_RESIDUALES MUNICIPALES EN COLOMBIA.pdf)
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Centro Internacional de la Agricultura Orgánica. Tarea Ambiental 31, maravillas vegetales. el bambú – guadua (*guadua angustifolia*). Pág. 16. 1999.
- Ministerio de Agricultura y desarrollo rural. Observatorio agrocadenas Colombia. Documento de trabajo N° 65. La cadena de la Guadua en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica. 2005
- Monográficos agua en Centroamérica. Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Alianza por el agua. 2008
- Montoya, J. I., Ceballos, L., Casas, J.C., Morato, J. estudio comparativo de la remoción de materia organica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies macrófitas. En: EIA, número 14, Diciembre, 2010.

- Ocrospoma, M.M. Experiencias de tratamiento de drenaje ácido de mina mediante el sistema de humedales en pasivos mineros. Monografía profesional para optar al título de Ingeniera Ambiental. Universidad nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Facultad de ciencias del ambiente. 2011.
- Romero Rojas, J.A. Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. Tercera edición. Editorial, 2004.
- Silva R., A.S.; Zamora Z., H.D. Humedales Artificiales. Monografía (Ingeniero Químico). Manizales: Universidad Nacional de Colombia. de Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Química. 2005.
- Stottmeister, U., Wiessner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kastner, M., Bederski, O., Mueller, R.A., Moormann, H. 2003. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment, Biotechnol. Adv. 22: 93-117.
- U.S. Environmental protection agency. Constructed treatment wetlands. EPA843-F-03-013. Office of Water. August 2004.
- U.S. Environmental protection agency. Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment a technology assessment. S.C. Reed, ed., EPA/832/R-93/008. US EPA Office of Water. Washington. (1993).
- Valencia, M., Durando S., Pinillos, J.F., Mejía, A., Gallardo, C. Revista Cubana de plantas medicinales. Extracción de fracciones con actividad antioxidante en hojas de *Guadua angustifolia* Kunth. Facultad de Química Farmacéutica, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2011.
- Vymaza, J. Constructed wetlands for wastewater treatment. En: Water, número 2, p. 530-549 Agosto, 2010.
- Wildeman, T. Wetland design for mining operations: Bitech publications, Richmond, B.C. 1993
- Wissing, F.; Hoffman, K. Humedales Artificiales – una manera natural de tratar el agua residual. 2002. Documento consultado en base de datos DecRen Water Consult. Consultado el 16 de Febrero 2012: <http://www.dwc-water.com/technologies/constructed-wetlands/index.html>.

## 10. ANEXOS.

---

Anexo 1. Datos recopilados.

### PRIMERA ETAPA.

Temperatura				
Día	Fecha	Afluyente (°C)	EHG (°C)	EHA (°C)
Lunes	01/04/2013	23	21	22
Martes	02/04/2013	23	21	21
Miércoles	03/04/2013	23	21	22
Jueves	04/04/2013	22	21	21
Viernes	05/04/2013	22	21	21
Lunes	08/04/2013	22	22	22
Martes	09/04/2013	23	23	23
Miércoles	10/04/2013	24	21	21
Jueves	11/04/2013	25	23	23
Viernes	12/04/2013	24	23	23
Lunes	15/04/2013	24	24	24
Martes	16/04/2013	25	22	22
Miércoles	17/04/2013	23	22	22
Jueves	18/04/2013	21	21	21
Viernes	19/04/2013	22	22	22
Lunes	22/04/2013	24	23	23
Martes	23/04/2013	24	23	23

Miércoles	24/04/2013	23	22	22
Jueves	25/04/2013	21	21	21
Viernes	26/04/2013	23	23	23
Lunes	29/04/2013	23	21	21
Martes	30/04/2013	20	20	20
Miércoles	01/05/2013	23	23	23
Jueves	02/05/2013	21	20	20
Viernes	03/05/2013	23	23	23
Lunes	06/05/2013	23	21	21

pH				
Día	Fecha	Afluente	EHG	EHA
Lunes	01/04/2013	8,25	7,44	7,28
Martes	02/04/2013	8,20	7,47	7,21
Miércoles	03/04/2013	7,32	7,44	7,38
Jueves	04/04/2013	7,40	7,44	7,30
Viernes	05/04/2013	7,43	7,49	7,28
Lunes	08/04/2013	7,42	7,46	7,28
Martes	09/04/2013	7,47	7,44	7,30
Miércoles	10/04/2013	7,40	7,46	7,29
Jueves	11/04/2013	7,90	7,36	7,51
Viernes	12/04/2013	8,24	7,67	7,23
Lunes	15/04/2013	8,32	7,48	7,28
Martes	16/04/2013	7,08	7,32	6,94
Miércoles	17/04/2013	7,37	7,36	7,17
Jueves	18/04/2013	7,55	7,33	7,08
Viernes	19/04/2013	7,62	7,33	7,11
Lunes	22/04/2013	7,71	7,33	7,09
Martes	23/04/2013	7,82	7,27	7,17
Miércoles	24/04/2013	7,88	7,31	7,18
Jueves	25/04/2013	7,84	7,36	7,22
Viernes	26/04/2013	7,78	7,28	7,17
Lunes	29/04/2013	7,78	7,34	7,33
Martes	30/04/2013	7,93	7,28	7,30
Miércoles	01/05/2013	8,55	7,26	7,25



Jueves	02/05/2013	8,36	7,43	7,32
Viernes	03/05/2013	8,11	7,37	7,27
Lunes	06/05/2013	8,16	7,40	7,22
Martes	07/05/2013	8,31	7,53	7,27
Miércoles	08/05/2013	8,24	7,44	7,24

<b>Oxígeno Disuelto (mg O<sub>2</sub>/L)</b>				
		<b>Afluente</b>	<b>EHG</b>	<b>EHA</b>
Lunes	01/04/2013	0,17	3,79	4,66
Martes	02/04/2013	0,27	4,63	4,96
Miércoles	03/04/2013	0,435	4,64	5,59
Jueves	04/04/2013	0,435	4,7	5,58
Viernes	05/04/2013	0,43	4,54	5,3
Lunes	08/04/2013	0,565	4,42	4,11
Martes	09/04/2013	0,355	4,87	4,46
Miércoles	10/04/2013	0,25	5,11	4,85
Jueves	11/04/2013	0,36	5,13	5,07
Viernes	12/04/2013	0,265	3,83	4,32
Lunes	15/04/2013	0,225	3,51	4,3
Martes	16/04/2013	0,395	4,91	4,3
Miércoles	17/04/2013	0,31	5,53	5,5
Jueves	18/04/2013	0,34	5,28	5,37
Viernes	19/04/2013	0,285	5,13	5,31
Lunes	22/04/2013	0,245	4,93	5,1
Martes	23/04/2013	0,31	4,58	5,43
Miércoles	24/04/2013	0,275	4,83	5,45
Jueves	25/04/2013	0,32	4,55	5,38
Viernes	26/04/2013	0,52	4,03	5,33
Lunes	29/04/2013	0,405	5,45	5,59
Martes	30/04/2013	0,34	5,35	5,56
Miércoles	01/05/2013	0,2	5,33	5,65
Jueves	02/05/2013	0,28	5,3	5,78
Viernes	03/05/2013	0,5	5,51	6,11
Lunes	06/05/2013	0,18	5,35	6,35
Martes	07/05/2013	0,255	5,39	5,96

<b>Nitritos (mg N- NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)</b>		
<b>Fecha</b>	<b>EHG</b>	<b>EHA</b>
01/04/2013	0,0246	0,0348

30/04/2013	0,0512	0,0549
07/05/2013	0,0752	0,2610
15/05/2013	0,0722	0,2690

23/05/2013	0,3234	1,0426		30/04/2013	2,2236	1,7596	2,8588
29/05/2013	0,1752	0,5947		07/05/2013	2,5773	1,4529	4,3595
				15/05/2013	1,4723	3,3343	4,3697
				23/05/2013	3,5924	1,7250	2,359
				29/05/2013	2,4524	4,688	4,9823
<b>Nitratos (mg N- NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>							
<b>Fecha</b>	<b>Afluente</b>	<b>EHG</b>	<b>EHA</b>				
01/04/2013	2,103	2,2379	3,486				

<b>Nitrógeno Amoniacal (mg N- NH<sub>3</sub>/L)</b>			
<b>Fecha</b>	<b>Afluente</b>	<b>EHG</b>	<b>EHA</b>
01/04/2013	54,32	50,96	13,72
30/04/2013	95,48	45,92	20,72
07/05/2013	90,44	63	32,76
15/05/2013	60,2	51,52	27,86
23/05/2013	100,8	41,72	27,44
29/05/2013	74,76	50,96	61,6

<b>DQO (mg O<sub>2</sub>/L)</b>			
<b>Fecha</b>	<b>Afluente</b>	<b>EHG</b>	<b>EHA</b>
17/04/2013	490	34	40
23/04/2013	205	34	48
30/04/2013	385	48	60
09/05/2013	275	34	60
21/05/2013	425	44	46
05/06/2013	260	32	23

<b>DBO<sub>5</sub> (mg O<sub>2</sub>/L)</b>			
<b>Fecha</b>	<b>Afluente</b>	<b>EHG</b>	<b>EHA</b>
17/04/2013	305	22	20
23/04/2013	120	23	20
30/04/2013	325	32	42
09/05/2013	205	29,5	41
21/05/2013	205	43,5	40
05/06/2013	150	32,5	12,5

<b>SST (mg/L)</b>			
<b>Fecha</b>	<b>Afluente</b>	<b>EHG</b>	<b>EHA</b>
18/04/2013	155	12,5	19,0
25/04/2013	114	18,5	21,0
02/05/2013	60,5	27	15,0
10/05/2013	133	9,0	13,0
17/05/2013	235	7,0	6,5
24/05/2013	143	6,5	6,0

## SEGUNDA ETAPA.

<b>Temperatura</b>				
<b>Día</b>	<b>Fecha</b>	<b>Afluente (°C)</b>	<b>EHG (°C)</b>	<b>EHA (°C)</b>

Lunes	17/06/2013	22	21	21
Martes	18/06/2013	23	21	21
Miércoles	19/06/2013	23	21	22
Jueves	20/06/2013	22	22	22
Viernes	21/06/2013	23	23	23
Lunes	24/06/2013	22	21	21
Martes	25/06/2013	23	21	21
Miércoles	26/06/2013	22	21	21
Jueves	27/06/2013	21	20	20
Viernes	28/06/2013	23	21	21
Lunes	01/07/2013	22	21	21
Martes	02/07/2013	23	22	22
Miércoles	03/07/2013	22	21	21
Jueves	04/07/2013	23	21	21
Viernes	05/07/2013	23	22	22
Lunes	08/07/2013	23	21	21
Martes	09/07/2013	23	21	21
Miércoles	10/07/2013	23	22	22
Jueves	11/07/2013	24	22	21
Viernes	12/07/2013	22	21	21
Lunes	15/07/2013	23	21	21
Martes	16/07/2013	24	21	21
Miércoles	17/07/2013	23	21	21
Jueves	18/07/2013	23	21	21
Viernes	19/07/2013	23	22	22
Lunes	29/07/2013	23	21	21
Martes	30/07/2013	22	21	21
Miércoles	31/07/2013	22	20	20

<b>pH</b>				
		<b>Afluente</b>	<b>EHG</b>	<b>EHA</b>
Lunes	17/06/2013	7,35	7,28	7,12
Martes	18/06/2013	7,77	7,41	7,06
Miércoles	19/06/2013	7,67	7,42	7,06
Jueves	20/06/2013	7,65	7,39	7,11
Viernes	21/06/2013	7,4	7,37	7,08
Lunes	24/06/2013	7,9	7,47	7,05
Martes	25/06/2013	8,14	7,59	7,03
Miércoles	26/06/2013	8,05	7,52	7,07

Jueves	27/06/2013	7,98	7,38	7,2
Viernes	28/06/2013	7,63	7,45	7,05
Lunes	01/07/2013	7,94	7,47	7,06
Martes	02/07/2013	7,61	7,48	7,15
Miércoles	03/07/2013	7,52	7,63	7,17
Jueves	04/07/2013	8	7,54	7,31
Viernes	05/07/2013	7,08	7,44	7,17
Lunes	08/07/2013	7,92	7,42	7,15
Martes	09/07/2013	7,75	7,26	6,63
Miércoles	10/07/2013	7,74	7,38	6,92
Jueves	11/07/2013	7,73	7,41	7,04
Viernes	12/07/2013	7,44	7,3	7,84
Lunes	15/07/2013	7,75	7,49	7,09
Martes	16/07/2013	8,06	7,5	6,76
Miércoles	17/07/2013	7,58	7,38	6,85
Jueves	18/07/2013	7,66	7,41	7,1
Viernes	19/07/2013	7,62	7,38	7,24
Lunes	29/07/2013	7,65	7,33	7,19
Martes	30/07/2013	7,61	7,37	7,17
Miércoles	31/07/2013	7,67	7,37	7,18
Jueves	01/08/2013	7,69	7,41	7,1

<b>Oxígeno Disuelto (mg O<sub>2</sub>/L)</b>				
		<b>Afluente</b>	<b>EHG</b>	<b>EHA</b>
Lunes	17/06/2013	0,91	4,60	5,68
Martes	18/06/2013	0,66	5,25	5,74
Miércoles	19/06/2013	0,61	5,31	5,68
Jueves	20/06/2013	0,60	5,23	5,13
Viernes	21/06/2013	0,63	5,13	5,07
Lunes	24/06/2013	0,50	5,32	5,31
Martes	25/06/2013	1,78	5,33	5,88
Miércoles	26/06/2013	1,32	5,38	5,38
Jueves	27/06/2013	1,41	5,43	5,10
Viernes	28/06/2013	1,04	6,06	6,38
Lunes	01/07/2013	0,27	4,34	4,17
Martes	02/07/2013	0,36	4,40	4,88
Miércoles	03/07/2013	1,64	5,00	5,35
Jueves	04/07/2013	1,34	5,43	5,23
Viernes	05/07/2013	0,39	4,96	5,14

Lunes	08/07/2013	0,31	4,90	4,20
Martes	09/07/2013	0,91	4,60	4,96
Miércoles	10/07/2013	0,64	4,70	5,47
Jueves	11/07/2013	0,37	5,89	6,01
Viernes	12/07/2013	0,40	5,22	4,52
Lunes	15/07/2013	0,24	4,02	4,16
Martes	16/07/2013	0,93	5,69	5,76
Miércoles	17/07/2013	0,31	5,11	4,56
Jueves	18/07/2013	0,42	4,80	4,32
Viernes	19/07/2013	0,77	5,06	5,61
Lunes	29/07/2013	1,03	5,29	5,57
Martes	30/07/2013	0,97	5,24	5,42
Miércoles	31/07/2013	0,77	5,28	5,55
Jueves	01/08/2013	1,00	5,26	5,40

Nitritos (mg N- NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )		
Fecha	EHG	EHA
17/06/2013	0,0704	0,0663
24/06/2013	0,0304	0,0158
02/07/2013	0,0262	0,0293
09/07/2013	0,0702	0,0373
16/07/2013	0,0349	0,0709
30/07/2013	0,0957	0,0773

Nitratos (mg N- NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )			
Fecha	Afluente	EHG	EHA
17/06/2013	2,6612	2,3636	1,7233
24/06/2013	3,2924	2,9646	1,9339
02/07/2013	1,8913	2,2716	2,107
09/07/2013	2,6458	2,1964	2,038
16/07/2013	2,623	1,9264	1,7101
30/07/2013	2,3695	2,3762	2,4653

Nitrógeno Amoniacal (mg N- NH <sub>3</sub> /L)			
Fecha	Afluente	EHG	EHA
17/06/2013	68,9	52,4	12,9
24/06/2013	50,4	56,6	19,0
02/07/2013	51,0	44,2	23,8
09/07/2013	61,6	58,2	49,0
16/07/2013	58,8	46,5	36,7
30/07/2013	50,4	39,6	52,6

DQO (mg O <sub>2</sub> /L)			
Fecha	Afluente	EHG	EHA
17/06/2013	223	34	18
25/06/2013	223	26	20
03/07/2013	236	38	31
09/07/2013	296	50	47

16/07/2013	330	45	54
29/07/2013	297	33	55,5

DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)			
Fecha	Afluente	EHG	EHA
17/06/2013	205	32	12

25/06/2013	195	19	13	16/07/2013	195	31	47
03/07/2013	180	25	20	29/07/2013	255	23	46
09/07/2013	200	19,5	26,5				

<b>SST (mg/L)</b>			
<b>Fecha</b>	<b>Afluente</b>	<b>EHG</b>	<b>EHA</b>
18/06/2013	90,5	10	10,5
25/06/2013	99	5	6
03/07/2013	111,3	3,25	5
10/07/2013	131	5,25	9,75
17/07/2013	115	7	9
01/08/2013	114	11,75	14,25

Anexo 2 Tablas de contraste t-student y prueba Fisher.

**HUMEDAL 1 (GRAVA).**

Prueba F para varianzas de dos muestras. (DQO)		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,873490851	0,885323052
Varianza	0,002458532	0,000562765
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	<b>4,369</b>	
P(F<=f) una cola	0,065715095	
Valor crítico para F (una cola)	<b>5,050329058</b>	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales. (DQO)		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,873490851	0,885323052
Varianza	0,002458532	0,000562765
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,001510649	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	<b>-0,527283796</b>	
P(T<=t) una cola	0,304747302	
Valor crítico de t (una cola)	1,812461123	
P(T<=t) dos colas	0,609494604	
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,228138852</b>	

Prueba F para varianzas de dos muestras DBO <sub>5</sub>		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,852825661	0,893163389
Varianza	0,003989789	0,001248688
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	<b>3,19518599</b>	
P(F<=f) una cola	0,114060771	
Valor crítico para F (una cola)	<b>5,050329058</b>	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales DBO <sub>5</sub>		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,852825661	0,893163389
Varianza	0,003989789	0,001248688
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,002619238	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	<b>-1,36516312</b>	
P(T<=t) una cola	0,10106244	
Valor crítico de t (una cola)	1,812461123	
P(T<=t) dos colas	0,202124881	
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,228138852</b>	

Prueba F para varianzas de dos muestras (Nitrógeno Total).		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,349031912	0,285182804
Varianza	0,060652835	0,017324556
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	<b>3,500974804</b>	
P(F<=f) una cola	0,097650283	
Valor crítico para F (una cola)	<b>5,050329058</b>	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales (Nitrógeno Total).		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,349031912	0,285182804
Varianza	0,060652835	0,017324556
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,038988695	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	<b>0,560074898</b>	
P(T<=t) una cola	0,293877231	
Valor crítico de t (una cola)	1,812461123	
P(T<=t) dos colas	0,587754461	
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,228138852</b>	



Prueba F para varianzas de dos muestras SST.		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,877243643	0,894770683
Varianza	0,015784349	0,005071584
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	<b>3,112311338</b>	
P(F<=f) una cola	0,11915975	
Valor crítico para F (una cola)	<b>5,050329058</b>	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,877243643	0,894770683
Varianza	0,015784349	0,005071584
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,010427967	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	<b>-0,297282533</b>	
P(T<=t) una cola	0,386167295	
Valor crítico de t (una cola)	1,812461123	
P(T<=t) dos colas	0,772334591	
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,228138852</b>	

## HUMEDAL 2 (ARENA).

Prueba F para varianzas de dos muestras DQO.		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,909196931	0,893163389
Varianza	0,004092223	0,001248688
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	<b>3,277218886</b>	
P(F<=f) una cola	0,109305492	
Valor crítico para F (una cola)	<b>5,050329058</b>	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales DQO.		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,909196931	0,893163389
Varianza	0,004092223	0,001248688
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,002670455	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	<b>0,53739973</b>	
P(T<=t) una cola	0,301371895	
Valor crítico de t (una cola)	1,812461123	
P(T<=t) dos colas	0,602743791	
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,228138852</b>	

Prueba F para varianzas de dos muestras DBO <sub>5</sub>		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,903417519	0,916977362
Varianza	0,002932471	0,004672461
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	<b>1,593353159</b>	
P(F<=f) una cola	0,310833614	
Valor crítico para F (una cola)	<b>5,050329058</b>	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales DBO <sub>5</sub>		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,903417519	0,916977362
Varianza	0,002932471	0,004672461
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,003802466	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	<b>-0,38087513</b>	
P(T<=t) una cola	0,355631103	
Valor crítico de t (una cola)	1,812461123	
P(T<=t) dos colas	0,711262206	
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,228138852</b>	

Prueba F para varianzas de dos muestras (Nitrógeno Total).		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,807619551	0,654062174
Varianza	0,014674623	0,047987702
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	<b>3,270114756</b>	
P(F<=f) una cola	0,109706358	
Valor crítico para F (una cola)	<b>5,050329058</b>	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales (Nitrógeno Total).		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,807619551	0,654062174
Varianza	0,014674623	0,047987702
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,031331163	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	<b>1,50259887</b>	
P(T<=t) una cola	0,08192303	
Valor crítico de t (una cola)	1,812461123	
P(T<=t) dos colas	0,16384606	
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,228138852</b>	

Prueba F para varianzas de dos muestras SST.		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,935816809	0,935792191
Varianza	0,001949615	0,001787247
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	<b>1,090848006</b>	
P(F<=f) una cola	0,463153032	
Valor crítico para F (una cola)	<b>5,050329058</b>	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales SST.		
	<i>Primera Etapa</i>	<i>Segunda Etapa</i>
Media	0,935816809	0,935792191
Varianza	0,001949615	0,001787247
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,001868431	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	<b>0,000986452</b>	
P(T<=t) una cola	0,499616163	
Valor crítico de t (una cola)	1,812461123	
P(T<=t) dos colas	0,999232326	
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,228138852</b>	

### Primera Etapa.

Prueba F para varianzas de dos muestras DQO		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,87349085	0,90919693
Varianza	0,00245853	0,00409222
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	1,66449827	
P(F<=f) una cola	0,29483262	
Valor crítico para F (una cola)	5,05032906	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales DQO		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,87349085	0,909196931
Varianza	0,00245853	0,004092223
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,00327538	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	-1,0806178	
P(T<=t) una cola	0,15261946	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	

P(T<=t) dos colas	0,30523892	
Valor crítico de t (dos colas)	2,22813885	

Prueba F para varianzas de dos muestras. DBO <sub>5</sub>		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,85282566	0,90341752
Varianza	0,00398979	0,00293247
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	1,36055561	
P(F<=f) una cola	0,37185578	
Valor crítico para F (una cola)	5,05032906	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales DBO <sub>5</sub>		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,85282566	0,903417519
Varianza	0,00398979	0,002932471
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,00346113	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	-1,4894719	
P(T<=t) una cola	0,08360496	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	
P(T<=t) dos colas	0,16720992	
Valor crítico de t (dos colas)	2,22813885	

Prueba F para varianzas de dos muestras. Nitrógeno Total		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,34903191	0,80761955
Varianza	0,06065283	0,01467462
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	4,13317831	
P(F<=f) una cola	0,07274441	
Valor crítico para F (una cola)	5,05032906	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales Nitrógeno Total		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,34903191	0,807619551
Varianza	0,06065283	0,014674623
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,03766373	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	4,09280745	
P(T<=t) una cola	0,0010847	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	
P(T<=t) dos colas	0,00216941	
Valor crítico de t (dos colas)	2,22813885	

Prueba F para varianzas de dos muestras SST		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,87724364	0,93581681
Varianza	0,01578435	0,00194962
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	8,0961351	
P(F<=f) una cola	0,01926131	
Valor crítico para F (una cola)	5,05032906	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales. SST		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,87724364	0,935816809
Varianza	0,01578435	0,001949615
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,00886698	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	-1,0773862	
P(T<=t) una cola	0,15330562	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	

P(T<=t) dos colas	0,30661124	
Valor crítico de t (dos colas)	2,22813885	

## Segunda Etapa.

Prueba F para varianzas de dos muestras. DQO		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,88532305	0,893163389
Varianza	0,00056276	0,001248688
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	<b>2,2188438</b>	
P(F<=f) una cola	0,20112263	
Valor crítico para F (una cola)	<b>5,05032906</b>	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales. DQO		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,88532305	0,89316339
Varianza	0,00056276	0,00124869
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,00090573	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	<b>0,45122888</b>	
P(T<=t) una cola	0,33072594	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	
P(T<=t) dos colas	0,66145188	
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,22813885</b>	

Prueba F para varianzas de dos muestras. DBO <sub>5</sub>		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,89316339	0,916977362
Varianza	0,00124869	0,004672461
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5

F	<b>3,74189753</b>	
P(F<=f) una cola	0,08693886	
Valor crítico para F (una cola)	<b>5,05032906</b>	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales. DBO <sub>5</sub>		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,89316339	0,91697736
Varianza	0,00124869	0,00467246
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,00296057	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	<b>0,75806159</b>	
P(T<=t) una cola	0,23295178	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	
P(T<=t) dos colas	0,46590357	
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,22813885</b>	

Prueba F para varianzas de dos muestras. Nitrógeno Total		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,2851828	0,654062174
Varianza	0,01732456	0,047987702
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	<b>2,7699239</b>	
P(F<=f) una cola	0,14391486	
Valor crítico para F (una cola)	<b>5,05032906</b>	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales.



Nitrógeno Total		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,2851828	0,65406217
Varianza	0,01732456	0,0479877
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,03265613	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	<b>-3,53559606</b>	
P(T<=t) una cola	0,00269811	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	
P(T<=t) dos colas	0,00539622	
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,22813885</b>	

Prueba F para varianzas de dos muestras. SST		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,89477068	0,935792191
Varianza	0,00507158	0,001787247
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	<b>2,83765082</b>	
P(F<=f) una cola	0,13849111	
Valor crítico para F (una cola)	<b>5,05032906</b>	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales. SST		
	<i>Humedal 1</i>	<i>Humedal 2</i>
Media	0,89477068	0,93579219
Varianza	0,00507158	0,00178725
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	0,00342942	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	<b>1,21328317</b>	
P(T<=t) una cola	0,1264508	

Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	
$P(T \leq t)$ dos colas	0,2529016	
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,22813885</b>	

**Anexo 3. Registro de fotografía.**



**Humedales al inicio del estudio. Fecha de captura 28/01/2013**

**(Humedal de grava a la izquierda y humedal de arena a la derecha)**



**Fecha de captura 25/02/2013**





**Fecha de captura 01/04/2013**



**Fecha de captura 22/05/2013**





**Fecha de captura 04/06/2013**



**Fecha de captura 23/07/2013**



**Tratamiento preliminar (tanque de sedimentos).**



**Efluentes.**





**Espectrofotómetro Pharma spec  
UV-1700**



**Destilador de Nitrógeno Pro-Nitro  
II.**