

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**“REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA, INFLUENCIADA  
POR LA MACROFITA *SCIRPUS CALIFORNICUS*, EN  
HUMEDALES ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO SANITARIO**

**ELABORADO POR:**

**YON CECILIO CABRERA**

**ASESOR:**

**ING. OTTO BRUNO ROSASCO GERKES**

**Lima, Perú  
2016**

## **DEDICATORIA**

A mi querida familia por todo el apoyo brindado de manera constante en todas las etapas de mi vida, y en especial a mi amada madre, Glicería Cabrera Huerto, por todo el amor recibido.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ing. Otto Bruno Rosasco Gerkes, por el asesoramiento y apoyo desinteresado con su vasta experiencia y sabiduría, durante todas las etapas de la investigación.

A la MSc. Rosa Elena Yaya Beas, por haberme dado la oportunidad de conocer el maravilloso mundo de la investigación.

A todo el equipo del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR-FIA-UNI), por brindarme todas las facilidades y el apoyo necesario para el desarrollo de la investigación.

A mis compañeros y amigos que han apoyado de manera directa o indirecta en el desarrollo de la presente investigación, a todos ellos, que sin duda son muchos un agradecimiento especial.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR-FIA-UNI), ubicado en la ciudad de Lima – Perú. El objetivo principal de la investigación fue determinar la remoción adicional de materia orgánica influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** (Totorá), en humedales artificiales. Para lo cual se implementó dos unidades experimentales; la primera unidad fue un humedal artificial de flujo subsuperficial plantada con la macrófita ***Scirpus Californicus*** y la segunda, un sistema de control (Cama de sólidos), similar a la anterior con la diferencia que no tenía la vegetación. La investigación se desarrolló en dos etapas sin perder el sentido del objetivo de la investigación; en la primera se utilizó grava de 5.0 cm de diámetro como medio granular del humedal; y en la segunda se utilizó grava de 2.5 cm de diámetro como medio granular.

En la primera etapa se tuvo un periodo de arranque de seis meses, que se determinó en función del crecimiento de la macrófita. La medición de parámetros de evaluación se llevó a cabo durante cinco meses y se realizó para el efluente de un reactor UASB, donde se tuvo en promedio 86.5 mg/L y 199.3 mg/L de DBO<sub>5</sub> y DQO respectivamente y se determinaron las eficiencias para; 9, 12 y 16 horas de tiempo de retención hidráulico.

En la primera etapa la remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus***, en términos de DBO<sub>5</sub> fue del 21.5% y 14.8 % para 9 y 12 horas de tiempo de retención respectivamente; por el contrario para 16 horas de tiempo de retención, la influencia de la macrófita fue negativa debido a que en la cama de sólidos se obtiene un 17.2% adicional en remoción de DBO<sub>5</sub>.

En la primera etapa la remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus***, en términos de DQO fue del 9.0%, 13.5 y 16.4 % para 9, 12 y 16 horas de tiempo de retención respectivamente.

En la segunda etapa se tuvo un periodo de arranque de siete meses, que se determinó en función del crecimiento de la macrófita. La medición de parámetros de evaluación se llevó a cabo durante tres meses y se realizó para el efluente de un reactor UASB, donde se tuvo en promedio 61.18 mg/L y 205.25 mg/L de DBO<sub>5</sub> y DQO respectivamente y se determinaron las eficiencias para; 10, 12 y 14 horas de tiempo de retención hidráulico.

En la segunda etapa la remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus***, en términos de DBO<sub>5</sub> fue del 10.5 %, 12.6 % y 15.8 % para 10, 12 y 14 horas de tiempo de retención respectivamente.

En la segunda etapa la remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus***, en términos de DQO fue del 5.6 %, 19.3 % y 9.0 % para 10, 12 y 14 horas de tiempo de retención respectivamente.

## CONTENIDO

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
RESUMEN.....	IV
CONTENIDO.....	VI
INDICE DE TABLAS.....	VIII
INDICE DE FIGURAS .....	IX
GLOSARIO.....	XIII
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
II.1. JUSTIFICACION .....	3
II.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
II.3. PROBLEMA CIENTÍFICO.....	5
II.4. HIPOTESIS .....	5
II.5. VARIABLES .....	5
II.5.1. VARIABLES INDEPENDIENTES .....	5
II.5.2. VARIABLES DEPENDIENTES .....	5
II.5.3. VARIABLES INTERVINIENTES .....	6
II.6. OBJETIVOS .....	6
II.6.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
II.6.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	6
III. MARCO LEGAL.....	7
III.1. NORMATIVA NACIONAL .....	7
IV. ANTECEDENTES .....	7
V. MARCO TEÓRICO .....	10
V.1. HUMEDALES ARTIFICIALES.....	10
V.2. CLASIFICACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES .....	10
V.2.1. HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUPERFICIAL .....	10
V.2.2. HUMEDALES ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES .....	11
V.2.2.1. HUMEDALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL.....	11

## VII

V.2.2.2.	COMPONENTES DE HUMEDALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL .....	11
V.2.2.2.1.	ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA.....	12
V.2.2.2.2.	IMPERMEABILIZACIÓN .....	12
V.2.2.2.3.	MEDIO GRANULAR .....	12
V.2.2.2.4.	VEGETACIÓN .....	13
V.2.2.3.	MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES .....	15
V.2.2.4.	FUNCIONES DE LAS MACRÓFITAS EN LOS MECANISMOS DE REMOCIÓN.....	16
V.2.2.5.	LA TOTORA.....	16
V.2.2.5.1.	MORFOLOGIA DE LA TOTORA.....	17
VI.	METODOLOGIA.....	18
VI.1.	UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	18
VI.2.	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA .....	18
VI.3.	PERIODOS Y METAS DE LA INVESTIGACIÓN .....	21
VI.4.	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA USADA EN LABORATORIO	24
VI.4.1.	MEDICIÓN DE LA DBO <sub>5</sub> .....	24
VI.4.2.	MEDICIÓN DE LA DQO.....	26
VI.4.3.	MEDICIÓN DE pH Y TEMPERATURA.....	27
VI.4.4.	MEDICIÓN DE LA TURBIEDAD.....	28
VII.	MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPOS.....	29
VII.1.	MATERIALES .....	29
VII.2.	REACTIVOS .....	29
VII.3.	EQUIPOS .....	29
VIII.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	30
VIII.1.	DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD DEL MEDIO GRANULAR .....	30
VIII.2.	ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN Y EVAPORACIÓN ...	31
VIII.3.	CALCULO DE TIEMPOS DE RETENCIÓN HIDRAULICO AL FINAL DE CADA ETAPA .....	32
VIII.4.	VARIACIÓN DEL pH .....	33
VIII.5.	VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA.....	35

## VIII

VIII.6.	VARIACIÓN DE LA TURBIEDAD.....	37
VIII.7.	VARIACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO <sub>5</sub> )..	40
VIII.8.	REMOCIÓN DE LA DBO <sub>5</sub> INFLUENCIADA POR LA MACRÓFITA .....	43
VIII.9.	VARIACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).....	45
VIII.10.	REMOCIÓN DE LA DQO INFLUENCIADA POR LA MACRÓFITA ...	48
VIII.11.	VARIACIÓN DE DBO <sub>5</sub> Y DQO EN EL AFLUENTE EN CADA ETAPA 50	
VIII.12.	VARIACIÓN DE OXIGENO DISUELTO (OD) .....	52
VIII.13.	DESARROLLO DE LA MACRÓFITA (Scirpus Californicus) .....	53
IX.	CONCLUSIONES.....	55
X.	RECOMENDACIONES .....	58
XI.	FUENTES DE INFORMACIÓN.....	58
	ANEXO N° 01: PANEL FOTOGRÁFICO.....	XV
	ANEXO N° 02: MICROORGANISMOS OBSERVADOS EN LA CAPA BIOLÓGICA.....	XX

### INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Procesos de remoción de contaminantes en humedales artificiales de flujo subsuperficial.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2: Tiempos de retención hidráulico y caudales de operación en cada etapa. ....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3: Caracterización del agua residual a tratar en los sistemas a evaluar....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4: Porosidad inicial del medio granular en conjunto (Combinación de grava y confitillo). ....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 5: Porosidad del medio granular al final de las mediciones realizadas en la primera etapa.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 6: Porosidad del medio granular al final de las mediciones realizadas en la segunda etapa. ....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 7: Evapotranspiración en el humedal y la evaporación en la cama de sólidos para cada tiempo de retención (E: Afluente; H1: Efluente Humedal; H2: Efluente Cama de sólidos).....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 8: Cálculo de los tiempos de retención hidráulico al final de cada etapa (H1: Humedal; H2: Cama de sólidos). ....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 9: pH promedio en cada etapa y para los tiempos de retención hidráulico evaluados (E: Afluente; H1: Efluente Humedal; H2: Efluente Cama de sólidos). ....</i>	<i>33</i>

<i>Tabla 10: Temperatura promedio en cada etapa y para tiempos de retención hidráulico evaluados (E: Afluente; H1: Efluente Humedal; H2: Efluente Cama de sólidos).....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 11: Turbiedad y remoción promedio en cada etapa y para los tiempos de retención hidráulico evaluado (E: Afluente; H1: Efluente Humedal; H2: Efluente Cama de sólidos). .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 12: DBO<sub>5</sub> promedio en cada etapa y para cada tiempo de retención hidráulico. ....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 13: Remoción de DBO<sub>5</sub> influenciada por la macrófita en cada etapa y para cada tiempo de retención hidráulico evaluado. ....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 14: DQO promedio en cada etapa y para los tiempos de retención hidráulico evaluado. ....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 15: Remoción de DQO influenciada por la macrófita en cada etapa y para cada tiempo de retención hidráulico evaluado. ....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 16: Resumen general de eficiencias en remoción de materia orgánica en las dos etapas y en las condiciones evaluadas. ....</i>	<i>54</i>

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ubicación del lugar donde se desarrolló la investigación (CITRAR-FIA-UNI) .....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2. Esquema del sistema experimental de la investigación.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3. Vista en planta de la conformación del medio granular de la unidad experimental.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4. Corte A-A; de la conformación del medio granular en la unidad experimental.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5 Corte B-B de la conformación del medio granular en la unidad experimental.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 6 Crecimiento de la macrófita en el periodo de arranque de la primera etapa .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 7 Crecimiento de la macrófita en el periodo de arranque de la segunda etapa .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 8 Preparación de las diluciones.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 9 Medición del oxígeno remanente mediante el método de winkler.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 10 Digestión de los viales inoculados con las muestras. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 11 Colorímetro DR/850 marca HACH, utilizado para la medición de la DQO. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 12 Medidor portátil HQ11d de la marca HACH, para pH y Temperatura. ....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13 Medición de la turbiedad con el turbidímetro 2100Q de la marca HACH.....</i>	<i>28</i>

<i>Figura 14 Variación del pH en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).</i>	34
<i>Figura 15 Variación del pH en la segunda etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).</i>	35
<i>Figura 16 Variación de la Temperatura en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente Humedal; H2: Efluente Cama de sólidos).</i>	36
<i>Figura 17 Variación de la Temperatura en la segunda etapa (E: Afluente; H1: Efluente Humedal; H2: Efluente Cama de sólidos).</i>	37
<i>Figura 18 Variación de Turbiedad en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).</i>	38
<i>Figura 19 Remoción de la Turbiedad en la primera etapa (H1: Humedal; H2: Cama de sólidos).</i>	39
<i>Figura 20 Variación de Turbiedad en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).</i>	39
<i>Figura 21 Remoción de Turbiedad en la segunda etapa (H1: Humedal; H2: Cama de sólidos).</i>	40
<i>Figura 22 Variación de Turbiedad en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).</i>	41
<i>Figura 23 Remoción de la DBO<sub>5</sub> en la primera etapa (H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).</i>	42
<i>Figura 24 Variación de DBO<sub>5</sub> en la segunda etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).</i>	42
<i>Figura 25 Remoción de la DBO<sub>5</sub> en la segunda etapa (H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).</i>	43
<i>Figura 26 Remoción de DBO<sub>5</sub> influenciada por la macrófita en la primera etapa y para cada tiempo de retención hidráulico.</i>	44
<i>Figura 27 Remoción de DBO<sub>5</sub> influenciada por la macrófita en la segunda etapa y para cada tiempo de retención hidráulico.</i>	45
<i>Figura 28 Variación de DQO en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).</i>	46
<i>Figura 29 Remoción de la DQO en la primera etapa (H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).</i>	47
<i>Figura 30 Variación de la DQO en la segunda etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).</i>	47
<i>Figura 31 Remoción de la DQO en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).</i>	48
<i>Figura 32 Remoción de DQO influenciada por la macrófita en la primera etapa y para cada tiempo de retención hidráulico.</i>	49
<i>Figura 33 Remoción de DQO influenciada por la macrófita en la segunda etapa y para cada tiempo de retención hidráulico.</i>	50
<i>Figura 34 Variación de DBO<sub>5</sub> en el afluente de las unidades experimentales (E1: Afluente en la primera etapa; E2: Afluente en la segunda etapa).</i>	51

*Figura 35 Variación de DQO en el afluente de las unidades experimentales (E1: Afluente en la primera etapa; E2: Afluente en la segunda etapa)..... 51*

*Figura 36 Variación de OD en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente de Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos). ..... 52*

*Figura 37 Variación de OD en la segunda etapa (E: Afluente; H1: Efluente de Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos). ..... 53*

*Figura 38 Crecimiento de la macrófita Scirpus Californicus (Totorá) ..... 53*

*Figura 39 Selección de la grava y la macrófita..... XV*

*Figura 40 Instalación del sistema experimental en la primera etapa..... XV*

*Figura 41 Instalación del sistema experimental en la segunda etapa ..... XV*

*Figura 42 Sistema de distribución del afluente en las unidades experimentalesXVI*

*Figura 43 Bombeo del afluente hasta el tanque de almacenamiento..... XVI*

*Figura 44 El arranque se llevó a cabo en función del crecimiento de las macrófitas..... XVI*

*Figura 45 Obtención de muestras para el análisis respectivo ..... XVII*

*Figura 46 Medición de pH y turbiedad..... XVII*

*Figura 47 Medición de oxígeno disuelto..... XVII*

*Figura 48 Inoculación de la muestra y titulación para medición de DBO<sub>5</sub>..... XVIII*

*Figura 49 Digestión y lectura de DQO..... XVIII*

*Figura 50 Observación de la capa biológica desarrollada en las unidades..... XVIII*

*Figura 51 Muestreo de la capa biológica para observación en microscopio..... XIX*

*Figura 52 Desinstalación de las unidades experimentales ..... XIX*

*Figura 53. Nemátodo de agua dulce o vida libre ..... XX*

*Figura 54 Artrópodo (insecto que se introdujo en la muestra) podría ser una hormiga..... XX*

*Figura 55. Paramecium sp..... XX*

*Figura 56. No identificado ..... XX*

*Figura 57. Tejido vegetal..... XXI*

*Figura 58. No identificado ..... XXI*

*Figura 59. Tejido vegetal..... XXI*

*Figura 60. Tejido vegetal..... XXI*

*Figura 61. Tejido vegetal..... XXI*

*Figura 62. Tejido vegetal..... XXI*

*Figura 63. No identificado ..... XXI*

*Figura 64. Nemátodo de vida libre ..... XXI*

*Figura 65. Nemátodo de vida libre ..... XXI*

*Figura 66. No identificado ..... XXI*

*Figura 67. Nemátodo de vida libre ..... XXI*

*Figura 68. Parte de un insecto..... XXI*

*Figura 69. Parte de un insecto..... XXI*

*Figura 70. Parte de una cucaracha ..... XXI*

*Figura 72. No identificado ..... XXI*

<i>Figura 71. Parte de un insecto</i> .....	XXI
<i>Figura 74. Tejido vegetal</i> .....	XXI
<i>Figura 73. Parte de un insecto</i> .....	XXI
<i>Figura 76. Espora de alga</i> .....	XXI
<i>Figura 75. No identificado</i> .....	XXI
<i>Figura 77. Tejido vegetal</i> .....	XXI
<i>Figura 78. No identificado</i> .....	XXI
<i>Figura 79. Tejido vegetal</i> .....	XXI
<i>Figura 80. Tejido vegetal</i> .....	XXI

## **GLOSARIO**

TRH: Tiempo de retención hidráulico.

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales.

GIZ: Agencia Alemana de Cooperación Técnica.

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reactor anaerobio para tratamiento de aguas residuales).

OPS: Organización Panamericana de la Salud.

DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno (Materia orgánica biodegradable).

DQO: Demanda química de oxígeno (Materia orgánica oxidable).

OD: Oxígeno disuelto.

AFLUENTE: Agua residual que ingresa a un proceso de tratamiento.

EFLUENTE: Agua residual que sale de un proceso de tratamiento.

MACRÓFITA: Planta acuática emergente usada en humedales artificiales.

MEDIO GRANULAR: Material inerte (Suelo, arena, grava, roca) utilizado como lecho filtrante en humedales artificiales.

GRAVA: Canto rodado utilizado en humedales artificiales como sustrato.

CONFITILLO: Agregado que se obtiene por trituración de rocas, generalmente de 1/4" a 1/8" de tamaño y es utilizado como relleno en humedales artificiales.

CAMA DE SÓLIDOS: Lecho formado con grava y confitillo.

POROSIDAD: Volumen de espacios vacíos en un lecho.

## I. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales en el Perú, no se ha desarrollado a la misma velocidad que el crecimiento macroeconómico de los últimos años, tal es así que la cobertura de tratamiento de aguas residuales en el país sólo alcanza el 48% (LAS EPS Y SU DESARROLLO 2013; SUNASS 2014), cifra que se incrementó considerablemente en los últimos años básicamente por la entrada en operación de la PTAR Taboada ubicada en Lima. Y del inventario tecnológico realizado por SUNASS en el 2007, se cuenta con 132 lagunas, cinco filtros percoladores, tres lodos activados, un reactor UASB y dos tanques imhoff a cargo de las empresas prestadoras de servicios de saneamiento (EPS), de los cuales 16 no operan, 116 se encuentran sin mantenimiento y 55 funcionan sobrecargados hidráulicamente. Las cifras mencionadas anteriormente representan principalmente la situación del tratamiento de las aguas residuales en zonas urbanas, por lo que es lógico suponer que la situación se agrava en zonas rurales.

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) y la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GIZ), en el 2007 han determinado que más del 50% de los recursos hídricos superficiales, representan un riesgo significativo en el uso de agua, por lo que es necesaria la búsqueda de tecnologías adecuadas para el tratamiento de las aguas residuales, que se ajusten a las diversas condiciones del país principalmente en zonas rurales donde el estado ha intervenido muy poco.

Los humedales artificiales son sistemas naturales de tratamiento de las aguas residuales con bajo costo de operación y mantenimiento; históricamente fueron utilizados como lugares de descarga, recién en 1952 en Alemania, el Dr. Seidel realiza la primera investigación sobre la posibilidad de tratar aguas residuales (Seidel, 1965); y en la década de los 90 se da un mayor aumento en la construcción de estos tipos de sistemas para el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales.

Los humedales artificiales en la actualidad están muy difundidos a nivel mundial, especialmente en Europa, sin embargo en el Perú se conoce muy poco de esta tecnología de tratamiento, tal es así que en la normativa nacional no se

menciona como una alternativa de tratamiento. De la documentación de experiencias existentes del tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales, realizado por Rosa Miglio T. (2007), por encargo de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), se verifica que la mayoría opera con flujo subsuperficial y han sido diseñados con criterios diferentes, se utilizan varias especies de plantaciones y también existe variabilidad en el material que se usa como medio granular; además estas experiencias han sido impulsados principalmente por Universidades, ONGs, instituciones públicas y privadas de manera aislada como proyectos pequeños.

Las plantas acuáticas, llamadas también macrófitas, son parte esencial del tratamiento en los humedales artificiales, además de tener un valor estético alto. En la presente investigación se determina la remoción de materia orgánica influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** (totora), y se evaluará en condiciones diferentes de medio granular y tiempos de retención hidráulica.

El desarrollo de la investigación se realizó para condiciones locales o similares a la ciudad de Lima.

## II. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

### II.1. JUSTIFICACION

Se desarrolla la presente investigación, con la finalidad de determinar la remoción de materia orgánica influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** en humedales artificiales subsuperficiales en condiciones locales, evaluado bajo condiciones diferentes, las cuales son; tamaño del medio granular y tiempos de retención hidráulico. Es pertinente realizar este estudio, debido a que los resultados nos servirán para tener conocimiento de la importancia de las macrófitas en la remoción de materia orgánica adicional que se da por influencia de la macrófita. La información obtenida nos servirá como base para futuros trabajos de investigación, donde el objetivo sea buscar una macrófita que se acople mejor a condiciones propias de nuestro país, dependiendo, si la influencia de las macrófitas es significativa de acuerdo a la necesidad de eficiencia requerida en sistemas de tratamiento donde se puedan implementar esta tecnología de tratamiento. Si bien es cierto que existen estudios similares realizados en otros países, es preciso indicar que los resultados son relativos, debido a que las condiciones geográficas y climáticas donde se realizaron los estudios son diferentes, como por ejemplo en Colombia se menciona que cualquier tipo de macrofita tiene una influencia similar sin poder decir cuál de ellas es mejor y también que las macrófitas no tienen mayor importancia en la remoción de materia orgánica; sin embargo en México se le atribuye un 14.3 % de influencia en remoción de materia orgánica en términos de  $DQO_{\text{soluble}}$  a la macrófita ***Phragmites australis***; por la diversidad de resultados que se conoce de acuerdo a las condiciones donde se realizaron los estudios, se hace necesario realizar el estudio en condiciones locales para conocer la influencia en la remoción adicional de materia orgánica que tiene la macrófita ***Scirpus Californicus***.

### II.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tratamiento de aguas residuales en el Perú tiene un bajo desarrollo cualitativa y cuantitativamente, la cual se muestra en el diagnóstico realizado por la SUNASS en el 2007, donde se encontró que el 11.2 % de plantas de tratamiento no operan, el 81.1 % están sin mantenimiento y el 38.5 % operan

sobrecargados hidráulicamente; sin embargo el 66 % del volumen de aguas residuales que pasa por una planta de tratamiento es reutilizada en riego.

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) y la Cooperación Alemana (GIZ) en el 2007, determinaron que más del 50% de los recursos hídricos superficiales representan un riesgo significativo en el uso de agua. Por lo cual es necesario la búsqueda y estudio de nuevas alternativas de tratamiento para conservar los cuerpos de agua, que muchas veces reciben aguas residuales sin tratamiento.

En el marco descrito anteriormente los humedales artificiales son sistemas naturales de tratamiento, de bajo costo de operación y mantenimiento, debido a las diversas ventajas que tienen estos sistemas están muy difundidos a nivel mundial. Podrían contabilizarse más de 650 humedales naturales y artificiales en Norte América y más de 5000 humedales artificiales de flujo superficial en Europa para el tratamiento de aguas residuales (Vymazal et al., 1998). Sin embargo en el Perú se conoce muy poco sobre estos sistemas de tratamiento, lo cual es incomprensible debido a que son sistemas, de bajo costo y amigable con el ambiente, que bien podrían implementarse en zonas rurales y pueblos jóvenes de país.

La vegetación que se implanta en los humedales artificiales tiene como principales objetivos, la utilización de nutrientes presentes en las aguas residuales que se desea tratar y la regulación del régimen hídrico (Mariano Seoáñez Calvo, 1999); además de manera general se conoce que las plantas en los humedales artificiales incrementan la eficiencia en remoción de distintos parámetros, pero se desconoce una estimación cuantitativa de eficiencia que aportan en el tratamiento de las aguas residuales domésticas en condiciones locales. Por lo cual existe un vacío científico de estudios para conocer las eficiencias que añaden las macrófitas en los humedales artificiales subsuperficiales evaluado bajo condiciones diferentes de tamaño de medio granular, y tiempos de retención hidráulico.

### II.3. PROBLEMA CIENTÍFICO

¿Cuál será la eficiencia en remoción de materia orgánica influenciada por la macrófita *Scirpus Californicus* en humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal, evaluado en dos condiciones de medio granular con variación del tiempo de retención hidráulico?

### II.4. HIPOTESIS

La eficiencia de remoción adicional de materia orgánica en humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal influenciado por la macrófita *Scirpus Californicus*, será mayor al 10% en términos de DBO<sub>5</sub> y DQO, en todas las condiciones de evaluación.

### II.5. VARIABLES

#### II.5.1. VARIABLES INDEPENDIENTES

- La macrófita *Scirpus Californicus* (Totorá).
- Concentración de materia orgánica del agua residual a tratar.
  - En ambas etapas se evaluó con efluentes de un reactor UASB.
- Características del medio granular utilizado en el humedal artificial.
  - En la primera etapa se utilizó grava de 5.0 cm de diámetro y confitillo, que tenían en conjunto una porosidad de 34.73 %.
  - En la segunda etapa se utilizó grava de 2.5 cm de diámetro y confitillo, que tenían en conjunto una porosidad de 32.91 %.
- Tiempos de retención hidráulica.
  - En la primera etapa se trabajó con tiempos de retención hidráulico de 9, 12 y 16 horas.
  - En la segunda etapa se trabajó con tiempos de retención hidráulico de 10, 12 y 14 horas.

#### II.5.2. VARIABLES DEPENDIENTES

- Remoción de materia orgánica en términos de DBO<sub>5</sub> y DQO.

### II.5.3. VARIABLES INTERVINIENTES

- Temperatura del ambiente.
- pH.

## II.6. OBJETIVOS

### II.6.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar la remoción de materia orgánica influenciada por las macrófitas *Scirpus Californicus*, en un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

### II.6.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar la remoción de DBO<sub>5</sub> alimentando el sistema con efluentes de un reactor UASB, evaluado para tiempos de retención hidráulico de; 9, 12 y 16 horas; instalado con grava de 5.0 cm de diámetro promedio como medio granula del humedal.
- Determinar la remoción de DQO alimentando el sistema con efluentes de un reactor UASB, evaluado para tiempos de retención hidráulico de; 9, 12 y 16 horas; instalado con grava de 5.0 cm de diámetro promedio como medio granula del humedal.
- Determinar la remoción de DBO<sub>5</sub> alimentando el sistema con efluentes de un reactor UASB, evaluado para tiempos de retención hidráulico de 10, 12 y 14 horas; instalado con grava de 2.5 cm de diámetro promedio como medio granular del humedal.
- Determinar la remoción de DQO alimentando el sistema con efluentes de un reactor UASB, evaluado para tiempos de retención hidráulico de 10, 12 y 14 horas; instalado con grava de 2.5 cm de diámetro promedio como medio granular del humedal.

### III. MARCO LEGAL

#### III.1. NORMATIVA NACIONAL

- Norma OS-090. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.
- Resolución Ministerial N° 273-2013-MVCS- Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales.
- DS N° 003-2010-MINAM. Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de PTAR (Publicado el 27 de Marzo de 2010)
- DS N° 023-2009-MINAM. Aprueban las disposiciones para implementación de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua (Publicado el 19 de Diciembre de 2009)
- Ley de Recursos Hídricos-Ley N° 28338 (Publicado el 31 de Marzo de 2009)
- Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos DS N° 001-2010-AG (Publicado el 24 de Marzo 2010)

### IV. ANTECEDENTES

En México, Guido Zárate A. y Durán de Bazúa C. en el 2008, estudiaron la remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio, para evaluar el efecto de la fotosíntesis de una macrófita en sus primeras etapas de crecimiento sobre la eficiencia de remoción de contaminantes medidos como  $DQO_{soluble}$  y la variación de la conductividad eléctrica (CE), a diferentes profundidades en reactores biológicos a escala de laboratorio, plantandos con brote de *Phragmites australis*. Para lo cual se construyeron dos reactores de 25 litros, con un volumen de trabajo de 12.5 L empleando recipientes de plástico (uno con un brote de la planta de 1.5 cm de altura, RA1 y el segundo, como control, RA2, sin planta), empacados con escoria volcánica (tezontle).

Los reactores fueron iluminados durante 16 horas por día empleando lámparas de tubos fluorescentes con características similares a la luz natural. Se utilizó agua residual sintética preparada diariamente disolviendo sacarosa,  $(NH_4)_2SO_4$  y  $Na_3PO_4$  con una  $DQO_{soluble}$  experimental promedio de 450 mg/L. El tiempo de

residencia hidráulica (TRH) en los dos reactores fue de 1.8 días. Se tomaron muestras de agua residual a la salida de cada reactor y a las profundidades de 2, 10 y 30 cm respecto al nivel del agua de los reactores para poder observar el perfil de remoción de la  $DQO_{\text{soluble}}$ .

Los resultados obtenidos al alcanzar la etapa estable, cuando la macrófita tenía aproximadamente 50 cm de altura, indican que el reactor (RA1) mostró los más altos valores de remoción de  $DQO_{\text{soluble}}$  54% con respecto al reactor control (RA2) sin planta 38.1 %. El análisis de los resultados indica que estas diferencias fueron estadísticamente significativas ( $P < 0.05$ ), con una diferencia de 14.3 % atribuible a la presencia de la macrófita. Los valores de  $DQO_{\text{soluble}}$  disminuyen a medida que la profundidad es mayor siendo mayor la remoción a la profundidad de 10 cm para el reactor con planta resaltando la importancia de la zona radicular de la planta en la eficiencia de remoción.

En Colombia, García Palacio Jenny Adriana en el 2010, estudió el efecto del uso de plantas y configuración de sistemas de humedales construidos en la remoción de organismos patógenos, materia orgánica y nitrógeno para el tratamiento de aguas residuales domesticas en condiciones tropicales, en donde se evaluaron diferentes combinaciones: Humedal de flujo Horizontal - Humedal de flujo Horizontal (H-H); Humedal de flujo Vertical - Humedal de flujo Vertical (V-V); Humedal de flujo Vertical - Humedal de flujo Horizontal (V-H), cada configuración tenía un sistema con plantas y otra sin plantas. Los humedales subsuperficiales de flujo horizontal fueron acondicionados de fibra de vidrio de 0.30 m de ancho, 0.80 m de largo y 0.80 m de altura y los humedales subsuperficiales de flujo vertical, acondicionados en cilindros de plástico de 0.55 m de diámetro. Cada unidad estuvo conformado por grava de 1.0 cm de diámetro efectivo y una porosidad de 0.5 como medio de soporte y Papiro (*Cyperus sp.*), como vegetación emergente, plantadas con una densidad inicial de 20 plántulas por metro cuadrado. La evaluación se realizó durante un año y los sistemas se operaron con un caudal de 24 L/d.

Los resultados obtenidos muestran que la combinación de un humedal vertical seguido de un humedal horizontal tuvo mejores rendimientos, obteniéndose una remoción de Coliformes Totales (3 unidades log), E. Coli (4 unidades log) y

Huevos de Helmintos (90%), y la remoción de materia orgánica expresada como DBO<sub>5</sub> y DQO fueron superiores al 85% en todas las unidades, sin embargo no se presentaron significativas diferencias entre ellas. El análisis estadístico demuestra que la vegetación juega un papel importante en las remociones de E. Coli y Nutrientes, pero no tienen un efecto importante en la remoción de materia orgánica para el caso estudiado.

En Colombia, J. Montoya et al. en el 2010, estudiaron la remoción materia orgánica utilizando agua residual sintética, en términos de demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial, a escala piloto, sembrados con tres diferentes macrófitas: *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* y *Phragmites* sp. Para lo cual se construyó seis humedales a escala piloto en fibra de vidrio, de 1.0 m de largo, 0.6 m de alto y 0.6 m de ancho cada uno; se instaló con grava de 3,2-6,4 mm, de 48 % de porosidad, gravedad específica 2.5, hasta 0,3 m de altura, una lámina de agua de 0,25 m de alto, 6 macrófitas por metro cuadrado. Las mediciones se realizaron a lo largo de seis meses operando con un tiempo de retención hidráulico de 7 días y la temperatura media del afluente de (23,73±2,02) °C y en las salidas se tuvo un rango de, 24,62 y 25,68 °C. De los resultados se obtuvieron que las eficiencias de remoción medias de DQO fueron de 97,31 % y 95,94 % para *Canna limbata*; 94,49 % y 93,50 % para *Heliconia psittacorum*; 97,39 % y 97,13 % para *Phragmites* sp, y las eficiencias de remoción en DBO<sub>5</sub> fueron del 100 % y 99,36 % para *Canna limbata*; 99,09 % y 97,49 % para *Heliconia psittacorum*; 100 % y 99,45 % para *Phragmites* sp; lo cual los llevó a concluir que los humedales construidos de flujo subsuperficial plantados con cualquiera de las plantas usadas, podían remover eficientemente la materia orgánica de las aguas residuales domésticas; sin embargo no se determinó cuál de ellas remueve mejor.

## **V. MARCO TEÓRICO**

### **V.1. HUMEDALES ARTIFICIALES**

Los Humedales Artificiales han sido definidos como “sistemas de ingeniería, diseñados y contruidos para utilizar las funciones naturales de los humedales, de la vegetación, los suelos y de sus poblaciones microbianas para el tratamiento de contaminantes en aguas residuales.

El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente.

### **V.2. CLASIFICACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES**

Los humedales basados en macrófitas enraizadas emergentes pueden ser de dos tipos, de acuerdo a la circulación del agua que se emplee:

- Humedales de flujo superficial, si el agua circula en forma superficial por entre los tallos de las macrófitas
- Humedales de flujo subsuperficial, si el agua circula por debajo de la superficie del estrato del humedal.

#### **V.2.1. HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUPERFICIAL**

Los sistemas de flujo superficial 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 de estabilización. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (no más de 0,6 m) y tienen plantas.

En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etcétera. Pueden constituirse, en lugares turísticos y en sitios de estudio de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen.

## **V.2.2. HUMEDALES ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES**

Los sistemas de flujo subsuperficial, se caracterizan por que la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas.

El agua ingresa en forma permanente y es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. Están diseñados para mantener el nivel de agua totalmente por debajo de la superficie del lecho filtrante, esto evita problemas con la proliferación de insectos. Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos en función de la forma de aplicación de agua al sistema:

- Humedales subsuperficiales de flujo horizontal
- Humedales subsuperficiales de flujo vertical.

### **V.2.2.1. HUMEDALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL**

Son los sistemas más utilizados en Europa y tienen su origen en la investigación de Seidel (1967) y Kickuth (1977). El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*).

En este tipo de sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. La profundidad del agua es de entre 0,3 y 0,9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua se encuentra entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie) y con cargas de alrededor de 8 g DBO/m<sup>2</sup>×día.

### **V.2.2.2. COMPONENTES DE HUMEDALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL**

Los humedales horizontales están compuestos por los siguientes elementos:

- Estructuras de entrada.
- Impermeabilización del fondo y laterales.
- Medio granular.
- Vegetación.
- Estructuras de salida regulables.

#### **V.2.2.2.1. ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA**

Los humedales son sistemas que requieren una buena repartición y recogida de las aguas para alcanzar los rendimientos estimados, es por ello que las estructuras de entrada y salida deben estar muy bien diseñadas y construidas.

El agua residual procedente de los tratamientos previos se hace llegar hasta una arqueta donde el caudal se divide equitativamente y mediante diversas tuberías se vierte al lecho. Alternativamente se puede hacer llegar el agua hasta un canal con vertedero que la distribuye de forma homogénea en todo el ancho del sistema.

La recogida del agua efluente se realiza con una tubería perforada asentada sobre el fondo del humedal. Esta tubería se conecta con otra en forma de “L” invertida y cuya altura es regulable. Dicha estructura permite modificar el nivel de agua y a su vez drenar el humedal durante operaciones de mantenimiento.

#### **V.2.2.2.2. IMPERMEABILIZACIÓN**

Es necesario disponer de una barrera impermeable para confinar al sistema y prevenir la contaminación de las aguas subterráneas. Dependiendo de las condiciones locales puede ser suficiente una adecuada compactación del terreno. En otros casos será necesario realizar aportaciones de arcilla o utilizar láminas sintéticas.

#### **V.2.2.2.3. MEDIO GRANULAR**

En las zonas de entrada y salida se colocan piedras que permiten diferenciar estas zonas de lo que es el medio granular principal. El conjunto medio

granular/biopelícula/plantas debe ser considerado como el principal constituyente de los humedales.

En el medio granular ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismos patógenos. El medio granular debe ser limpio (exento de finos), homogéneo, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo.

Además, debe permitir un buen desarrollo de las plantas y de la biopelícula. Diámetros medios de alrededor de 5-8 mm ofrecen muy buenos resultados.

Una característica muy importante del medio granular es su conductividad hidráulica, ya que de esta propiedad depende la cantidad de flujo de agua que puede circular a través de él. Durante el diseño debe tenerse en cuenta que la conductividad hidráulica disminuirá con el paso del tiempo.

#### **V.2.2.2.4. VEGETACIÓN**

Las especies utilizadas son macrófitos emergentes típicos de las zonas húmedas como el carrizo (*Phragmites*), la espadaña (*Typha*) o los juncos (*Scirpus*). En Europa la planta más utilizada es el carrizo, con densidades de plantación de 3 ejemplares por metro cuadrado.

Todas estas plantas presentan adaptaciones especiales para vivir en ambientes permanentemente anegados. Sus tejidos internos disponen de espacios vacíos que permiten el flujo de gases desde las partes aéreas hasta las subterráneas. Sus rizomas tienen una gran capacidad colonizadora.

Los efectos de la vegetación sobre el funcionamiento de los humedales son las siguientes:

- Las raíces y rizomas proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula: La biopelícula crece adherida a las partes subterráneas de las plantas y sobre el medio granular. Alrededor de las

raíces se crean microambientes aeróbicos donde tienen lugar procesos microbianos que usan el oxígeno, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación.

- Amortiguamiento de las variaciones ambientales: Cuando las plantas están desarrolladas reducen la intensidad de la luz incidente sobre el medio granular evitándose así grandes gradientes de temperatura en profundidad que pueden afectar el proceso de depuración. En climas fríos la vegetación protege de la congelación.
- Las plantas asimilan nutrientes: Su contribución a la eliminación de nutrientes es modesta cuando se tratan aguas residuales urbanas de tipo medio (eliminan entre un 10% del N y un 20% del P). En aguas residuales diluidas su contribución es mayor (más del 50%).

La selección de la vegetación que se va a usar en un sistema de humedales debe tener en cuenta las características de la región donde se realiza el proyecto, así como las siguientes recomendaciones:

1. Las especies deben ser colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.
2. Deben ser especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir la máxima asimilación de nutrientes.
3. La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la biopelícula.
4. Deben disponer de un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación.
5. Se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado.
6. Debe tratarse de especies con una elevada productividad.
7. Las especies deben tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales.
8. Se deben utilizar especies propias de la flora local.

### V.2.2.3. MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES

La eliminación de los contaminantes se lleva a cabo a través de una compleja variedad de procesos biológicos, físicos y químicos, entre los que se incluyen transformaciones bacterianas, adsorción, precipitación, absorción y sedimentación. La planta elimina contaminantes asimilándolos directamente de sus tejidos y, además sus rizomas proporcionan superficies para el crecimiento bacteriano y permiten la filtración de los sólidos. La transferencia de oxígeno hacia la zona radicular por parte de estas plantas acuáticas es un requisito para que la eliminación microbiana de algunos contaminantes se realice con eficacia.

En relación con el sustrato, permite el crecimiento de biopelícula sobre la superficie de grava o arena en los que las reacciones bioquímicas que se producen a nivel de las raíces, así como el rápido crecimiento y proliferación de los mismos, permiten un tratamiento muy efectivo del agua residual.

Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), sólidos suspendidos (SS), y nitrógeno, así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos. La eliminación de fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo. Los mecanismos básicos de tratamiento son el tamizado, sedimentación, precipitación química, adsorción y degradación microbiológica de la  $DBO_5$  y del nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación.

*Tabla 1: Procesos de remoción de contaminantes en humedales artificiales de flujo subsuperficial.*

CONTAMINANTE	PROCESO
<b>Materia orgánica (MO)</b> <b>(Medida como <math>DBO_5</math> y DQO)</b>	Las partículas de MO son eliminados por la sedimentación y filtración, luego convertidas a $DBO$ soluble. La MO soluble es fijada y adsorbida por el biofilm y degradada por las bacterias adheridas en éste.
<b>Sólidos suspendidos totales (SST)</b>	Sedimentación y filtración Descomposición durante los largos tiempos de retención por bacterias especializadas presentes en lecho.
<b>Nitrógeno</b>	Nitrificación / Desnitrificación por el biofilm. Absorción de las plantas (influencia limitada).

<b>Fósforo</b>	Retención en el lecho (adsorción). Precipitación con aluminio, hierro y calcio. Absorción de las plantas (influencia limitada).
<b>Patógenos</b>	Sedimentación y filtración Absorción por el biofilm. Depredación por protozoarios Eliminación de bacterias por condiciones ambientales desfavorables (pH y temperatura).
<b>Metales pesados</b>	Precipitación y adsorción. Absorción de las plantas (influencia limitada).
<b>Contaminantes orgánicos</b>	Adsorción por el biofilm y el lecho. Descomposición debido a lo largo del tiempo de retención y a las bacterias especializadas del lecho (no calculable)

*FUENTE: Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, GIZ  
Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN*

#### **V.2.2.4. FUNCIONES DE LAS MACRÓFITAS EN LOS MECANISMOS DE REMOCIÓN**

Las macrófitas están adaptadas a crecer bajo condiciones de suelos saturados por el agua, debido a que tienen desarrollado un sistema de grandes espacios aéreos internos. Estos sistemas internos les permiten la provisión de aire bajo condiciones de suelo saturado con agua desde la atmósfera hacia las raíces y rizomas.

Las macrófitas poseen varias propiedades que hacen de ellas un importante componente de los humedales construidos, entre estas principales propiedades tenemos los siguientes:

- El sistema de raíces mantiene la conductividad hidráulica del sustrato.
- Las plantas facilitan el crecimiento de las colonias de bacterias y otros microorganismos que forman un biofilm adherido a la superficie de las raíces y a las partículas del sustrato.
- Las plantas tienen la capacidad de transportar oxígeno a la zona de raíces lo que permite que estas plantas sobrevivan en condiciones de inundadas.

#### **V.2.2.5. LA TOTORA**

Es una planta que crece, tanto de manera silvestre como cultivada, en lagunas, zonas pantanosas, huachiques y balsares de la costa y sierra del Perú, desde el

nivel del mar hasta los 4,000 m de altitud. La especie *Scirpus californicus* es una de las macrófitas más conocidas y difundidas, y forma parte de la amplia gama de plantas fitodepuradoras empleadas en los sistemas no convencionales de depuración de aguas residuales.

#### **V.2.2.5.1. MORFOLOGIA DE LA TOTORA**

La macrófita *Scirpus californicus* (Totora) tiene las siguientes características:

**TAMAÑO:** La totora es una planta acuática perenne, de escaso porte y fasciculada, que puede llegar a medir hasta 4 m de altura.

**TALLO:** Posee un tallo erecto, liso, flexible, liviano, rollizo, triangular, similar al césped y sin tuberosidades en la base.

**HOJAS:** Las hojas de la totora forman una vaina que rodea al tallo en la base. Están distribuidas en dos sectores: las hojas de la parte inferior de la planta presentan vainas foliares carentes de láminas, mientras que las superiores las desarrollan ocasionalmente.

**INFLORESCENCIA:** La parte alta de la planta presenta una inflorescencia ramificada que por un lado es arqueada, debido al desarrollo de brácteas rígidas, y por otro es erecta en la prolongación del tallo. Las espigüelas son hermafroditas, abundantes, ovoides u oblongas. Presenta una cubierta floral espiralada, decidua, ovada, redonda en la parte posterior, con una nervadura media fuerte y una lateral inconspicua u obsoleta.

**FLORES:** Las pequeñas flores de la totora son hermafroditas, es decir, reúnen en sí ambos sexos, y la envoltura floral está compuesta por dos a seis escamas.

**FRUTOS:** Esta planta produce frutos secos biconvexos o aplanados convexos, lisos o transversalmente rugosos, con un pericarpio no soldado a ellos. El fruto contiene una sola semilla de forma similar a la lenteja.

## VI. METODOLOGIA

### VI.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se realizó en El Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR FIA UNI), ubicado en la parte norte del campus universitario, sector "T", de la Universidad Nacional de Ingeniería, la cual pertenece a la jurisdicción del distrito de Rímac - Lima.



Figura 1. Ubicación del lugar donde se desarrolló la investigación (CITRAR-FIA-UNI)

### VI.2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló en dos etapas sin variar el objetivo principal; en la primera etapa se evaluó la remoción influenciada por la macrofita, utilizando como medio granular del humedal, grava de 5.0 cm de diámetro; y en la segunda etapa se evaluó de manera similar, la remoción influenciada por la macrofita, utilizando grava de 2.5 cm de diámetro. Para lo cual se instaló un sistema experimental compuesto principalmente por un tanque de alimentación y dos unidades en paralelo. La primera unidad fue un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal con la macrofita *Scirpus californicus* como

vegetación emergente y la segunda unidad un sistema de control, con las mismas características con la única diferencia que no tenía plantas. Las dimensiones de las unidades fueron de: 1.20 m de largo; 0.40 m de ancho y 0.42 m de altura, la cuales fueron construidos con ladrillo y mortero impermeabilizado con cemento pulido por la parte interna.

A continuación se muestran el esquema del sistema experimental y la conformación del medio granular.

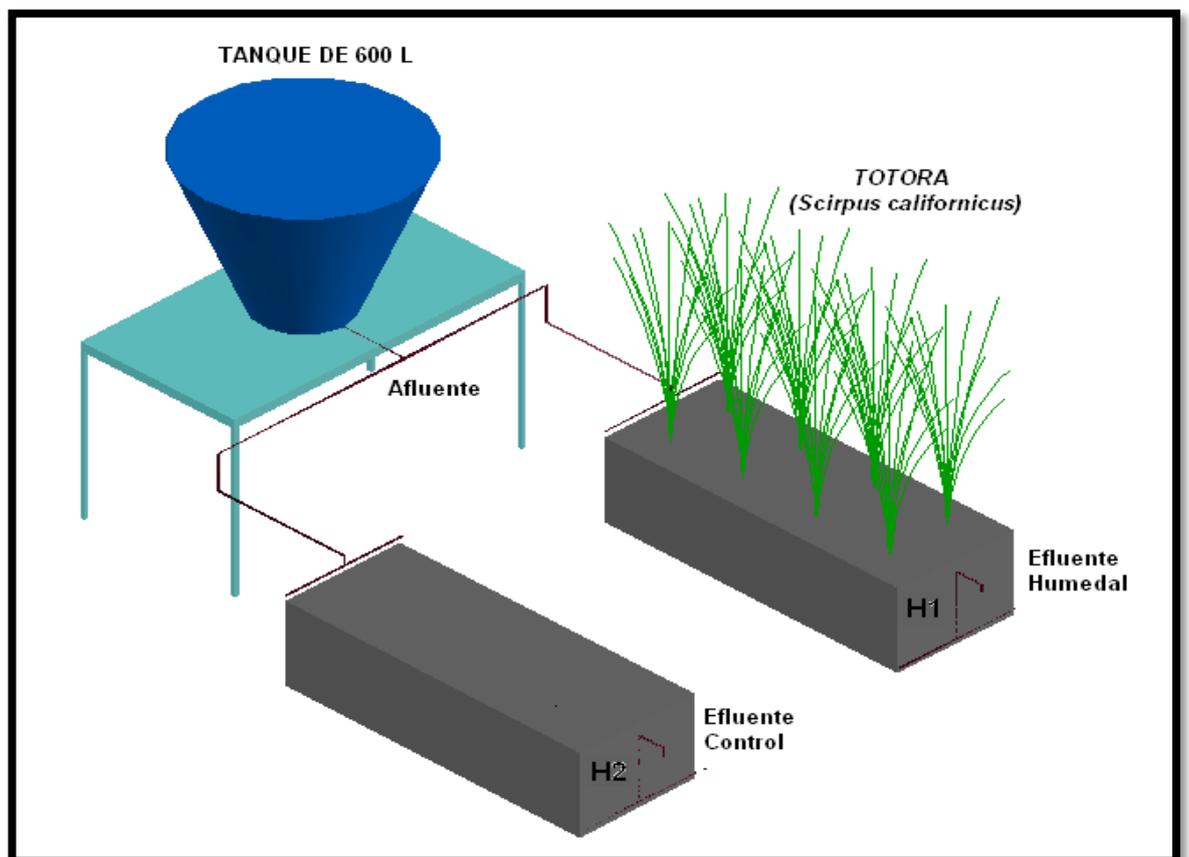
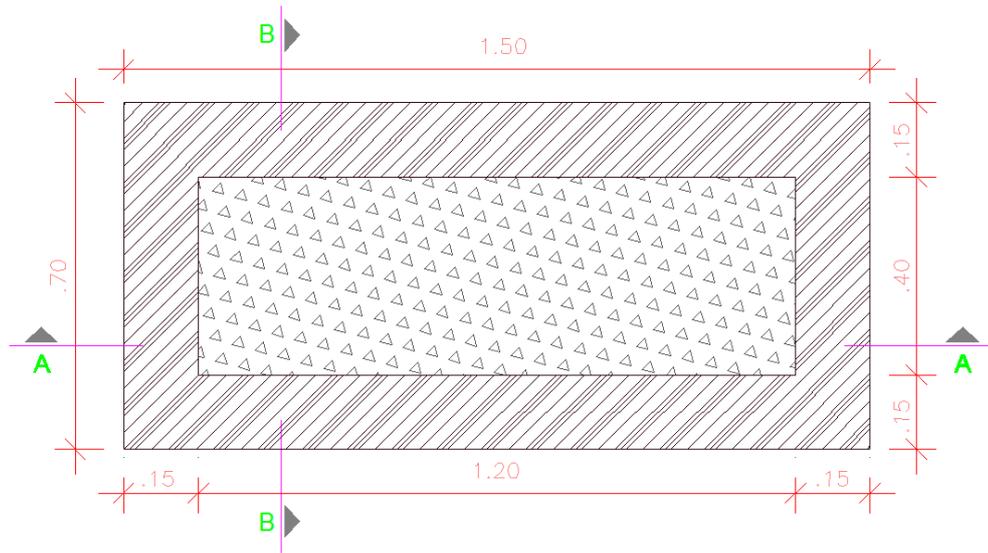


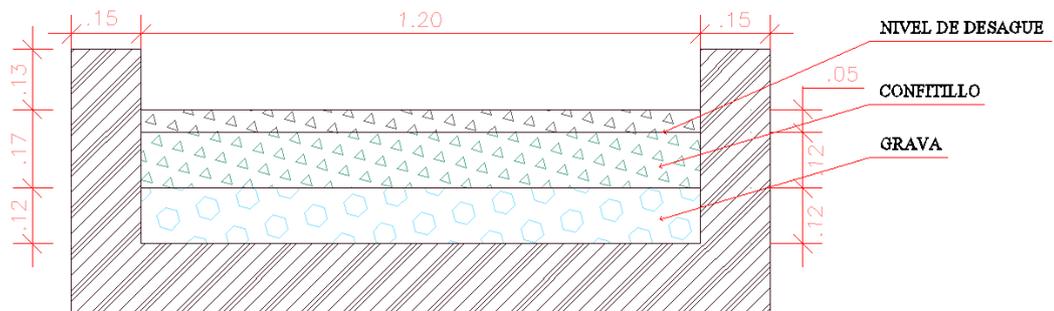
Figura 2. Esquema del sistema experimental de la investigación



**PLANTA: UNIDAD EXPERIMENTAL**

ESCALA: S/E

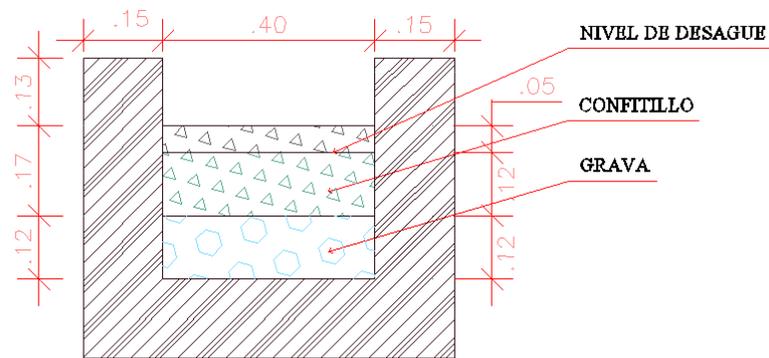
Figura 3. Vista en planta de la conformación del medio granular de la unidad experimental



**CORTE A-A: UNIDAD EXPERIMENTAL**

ESCALA: S/E

Figura 4. Corte A-A; de la conformación del medio granular en la unidad experimental



**CORTE B-B: UNIDAD EXPERIMENTAL**

BSCALA: S/B

*Figura 5 Corte B-B de la conformación del medio granular en la unidad experimental.*

### VI.3. PERIODOS Y METAS DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se desarrolló en dos etapas, la primera se desarrolló en el periodo de febrero del 2013 hasta febrero del 2014; y la segunda etapa en el periodo de mayo del 2014 hasta julio del 2015. En ambas etapas se desarrolló actividades similares, y se utilizaron las mismas unidades experimentales, con la diferencia que se utilizó como medio granular, grava de diferente tamaño en cada etapa.

Las metas desarrolladas y los periodos se describen a continuación:

1. Se instaló el sistema experimental según el esquema mostrado en la figura 2, de acuerdo al siguiente orden de actividades:
  - Instalación del tanque de 600 litros, en una plataforma elevada para alimentar las unidades experimentales por gravedad.
  - Limpieza de las unidades experimentales existentes.
  - Instalación del sustrato, conformado por grava (canto rodado) en la parte inferior y confitillo en la parte superior.

- *En la primera etapa se colocó grava de 5.0 cm de diámetro en la parte inferior hasta una altura de 12 cm y en la parte superior con confitillo hasta una altura de 30 cm.*
- *En la segunda etapa se colocó grava de 2.5 cm de diámetro en la parte inferior hasta una altura de 12 cm y en la parte superior con confitillo hasta una altura de 30 cm. En ambas etapas el nivel de agua residual alcanzaba una altura de 24.0 cm.*
- Plantación de la macrófita *Scirpus californicus* en una de las unidades experimentales.
- Instalación de accesorios y conexiones hidráulicas.

2. Pruebas hidráulicas y obtención de datos para la operación del sistema:

- Se determinó la porosidad del medio granular para determinar los caudales de operación. La porosidad se determinó de manera directa, midiendo el volumen de vacíos; es decir una vez instalada el sistema experimental se añadió agua hasta alcanzar el nivel del medio granular y con el gasto determinado se conoce el volumen de vacíos.
- Se determinó los caudales de operación en función de la porosidad y asumiendo tiempos de retención hidráulico para asegurar un adecuado flujo y distribución del afluente en las unidades, las cuales se muestran en el cuadro siguiente.

Tabla 2: Tiempos de retención hidráulico y caudales de operación en cada etapa.

ETAPA	TIEMPO DE RETENCIÓN			CAUDAL DE OPERACIÓN		
PRIMERA	TRH =	9	Horas	Q =	111.11	L/d
	TRH =	12	Horas	Q =	83.33	L/d
	TRH =	16	Horas	Q =	62.5	L/d
SEGUNDA	TRH =	10	Horas	Q =	94.74	L/d
	TRH =	12	Horas	Q =	78.95	L/d
	TRH =	14	Horas	Q =	67.67	L/d

3. El periodo de arranque en ambas etapas se determinó en función del crecimiento de la macrófita *Scirpus californicus*.

- *El periodo de arranque en la primera etapa fue de seis meses, desde abril del 2013 hasta setiembre del 2013.*
- *El periodo de arranque en la segunda etapa fue de siete meses, desde junio del 2014 hasta diciembre del 2014.*



*Figura 6 Crecimiento de la macrófita en el periodo de arranque de la primera etapa*



*Figura 7 Crecimiento de la macrófita en el periodo de arranque de la segunda etapa*

4. La caracterización de las aguas residuales a tratar en el sistema piloto se realizó mediante la recopilación de estudios de monitoreo realizados en la planta de tratamiento de aguas residuales del CITRAR-FIA-UNI.

Tabla 3: Caracterización del agua residual a tratar en los sistemas a evaluar.

PARÁMETRO	UND.	AFLUENTE DE REACTOR UASB				EFLUENTE DE REACTOR UASB			
		M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
DQO	mg/L	413	351	381	318	277	199	284	232
DBO5	mg/L	173	154	163	131	116	80	108	94
pH		7.12	6.95	7.06	7.08	6.88	6.83	6.9	6.76
Sólidos suspendidos totales	mg/L	212	72	158	94	90	18	60	12
Sólidos sedimentables	mg/L/H	2	0.1	1	1.1	0.4	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Sólidos volátiles	mg/L	110	32	69	39	37	8	24	5
Sulfatos	mg/L	186	147	189.5	177	184	80	183.5	176
M1, M2, M3 y M4; Son los ensayos realizados en el afluente y efluente del reactor UASB.									
FECHA: Octubre del 2013									

5. La evaluación de la remoción de materia orgánica, en ambas etapas se realizó de manera similar en términos de DBO<sub>5</sub> y DQO medidas de manera semanal, y complementariamente a dichos parámetros se realizó la medición de; pH, temperatura y turbiedad de manera diaria.

- *En la primera etapa la medición de parámetros para la evaluación se realizó en el periodo de octubre del 2013 hasta febrero del 2014.*
- *En la segunda etapa la medición de parámetros para la evaluación se realizó en el periodo de enero del 2015 hasta abril del 2015.*

#### VI.4. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA USADA EN LABORATORIO

La metodología utilizada en la medición de parámetros principalmente se enmarca en las recomendaciones de los métodos estándares para el análisis de aguas residuales y los parámetros evaluados se describen a continuación.

##### VI.4.1. MEDICIÓN DE LA DBO<sub>5</sub>

La medición de la DBO<sub>5</sub> se realizó mediante el método de las diluciones adaptado de los métodos estándares para el análisis de agua y aguas

residuales, y aceptado por la Agencia para la protección del ambiente de EE.UU (USEPA).

El procedimiento consistió básicamente en lo siguiente:

1. Obtención de las muestras.
2. Preparación del agua de dilución (Agua destilada aireada, con nutrientes de  $\text{DBO}_5$ ).
3. Medición del oxígeno inicial en la muestras.
4. Medición del oxígeno de saturación en el agua de dilución.
5. Preparación de tres diluciones por muestra, en botellas winkler.
6. Incubación de las diluciones, durante 5 días a  $20^\circ\text{C}$ .
7. Medición del oxígeno remanente mediante el método de Winkler.
8. Determinación de la  $\text{DBO}_5$  a partir de los gráficos generados de las diluciones y el oxígeno remanente medido.



*Figura 8 Preparación de las diluciones*



*Figura 9 Medición del oxígeno remanente mediante el método de winkler*

#### **VI.4.2. MEDICIÓN DE LA DQO**

La medición de la DQO se realizó mediante el método normalizado de oxidación al dicromato, y el valor se determina mediante el método colorimétrico.

El procedimiento básico consiste en lo siguiente:

1. Obtención de las muestras.
2. Calentamiento del digestor hasta alcanzar una temperatura de 150°C.
3. Homogenización e inoculación de 2 mL de muestra en viales de DQO de rango alto (0 a 1500mg/L).
4. Digestar por 2 horas los viales con las muestras inoculadas a la temperatura de 150°C
5. Dejar enfriar los viales digestados hasta alcanzar la temperatura ambiente.
6. Determinar el valor de la DQO mediante un colorímetro.

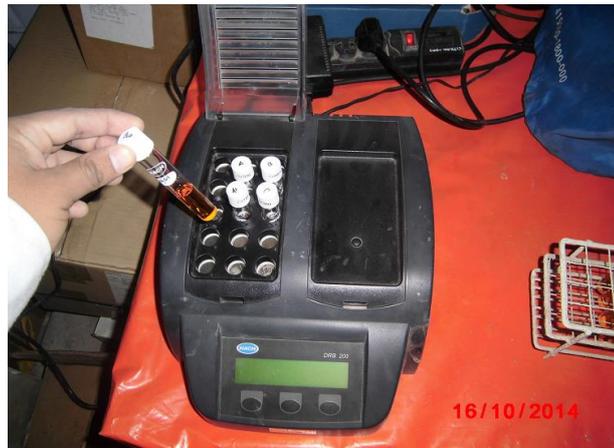


Figura 10 Digestión de los viales inoculados con las muestras.



Figura 11 Colorímetro DR/850 marca HACH, utilizado para la medición de la DQO.

#### VI.4.3. MEDICIÓN DE pH Y TEMPERATURA

La medición del pH y temperatura se realizó mediante el método instrumental, utilizando el medidor portátil HQ11d de la marca HACH.

El procedimiento básico y sencillo es obtener la muestra y realizar la lectura mediante el electrodo del medido portátil.



*Figura 12 Medidor portátil HQ11d de la marca HACH, para pH y Temperatura.*

#### **VI.4.4. MEDICIÓN DE LA TURBIEDAD**

La medición de la turbiedad se realizó mediante el método instrumental, utilizando el turbidímetro 2100Q de la marca HACH.

El procedimiento básico y sencillo es obtener la muestra y llenar la celda de del turbidímetro y realizar la lectura correspondiente.



*Figura 13 Medición de la turbiedad con el turbidímetro 2100Q de la marca HACH.*

## **VII. MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPOS.**

### **VII.1. MATERIALES**

- Estructuras de concreto en forma rectangular (existente)
- Grava de 5.0 cm (En la primera etapa) y 2.5 cm (En la segunda etapa).
- Confitillo
- Tanque de 600L
- Tuberías de PVC de 3/4 pulg.
- Tuberías de PVC de 1/2 pulg.
- Válvulas compuertas de 1/2 pulg.
- Válvulas compuerta de 3/4 pulg.
- Accesorios de tuberías (Tee, Codo de 90°, Tapones, etc.)
- Teflón
- Pegamento para PVC
- Plantas de Totorá
- Balde de 4L
- Sierra metálica
- Wincha de 5 metros
- Cinta Aislante
- Vaso Precipitado
- Botellas para muestras
- Recursos de Oficina

### **VII.2. REACTIVOS**

- Viales de DQO de alto rango (0 -1500 mg/L).
- Reactivos para determinar  $DBO_5$ .

### **VII.3. EQUIPOS**

- Incubadora de  $DBO_5$ .
- Digestor de DQO.
- Colorímetro.
- Turbidímetro.

- pH-metro.

## VIII. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos se presentan en gráficas y cuadros, con las observaciones y discusión respectiva.

### VIII.1. DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD DEL MEDIO GRANULAR

Se determinó la porosidad al inicio y al final de cada etapa, debido a que es uno de los factores que afecta el tiempo de retención hidráulico en las unidades.

En la primera etapa los resultados nos muestran una disminución de la porosidad del 6.06% en el Humedal (H1) y 0.77% en la cama de sólidos (H2) respecto a la porosidad al inicio.

En la segunda etapa los resultados nos muestran una disminución de la porosidad del 5.74 % en el Humedal (H1) y 4.88 % en la cama de sólidos (H2) respecto a la porosidad al inicio.

En ambas etapas se observa una disminución de la porosidad debido al crecimiento de la capa biológica, sin embargo en el humedal la disminución es mayor debido principalmente al crecimiento de las raíces de las macrófitas.

Los resultados de porosidad al inicio y al final de cada etapa se muestran en las tablas siguientes.

*Tabla 4: Porosidad inicial del medio granular en conjunto (Combinación de grava y confitillo).*

POROSIDAD EN PRIMERA ETAPA			POROSIDAD EN SEGUNDA ETAPA		
V total =	119.952	L	V total =	119.52	L
V útil =	41.665	L	V útil =	39.475	L
<b>POROSIDAD</b>	<b>34.73</b>	<b>%</b>	<b>POROSIDAD</b>	<b>32.91</b>	<b>%</b>
<b>NOTA: La porosidad al inicio es igual en ambas estructuras H1 y H2</b>					

Tabla 5: Porosidad del medio granular al final de las mediciones realizadas en la primera etapa.

POROSIDAD AL FINAL EN H1			POROSIDAD AL FINAL EN H2		
V total =	119.952	L	V total =	119.952	L
V útil =	34.4	L	V útil =	40.747	L
<b>POROSIDAD</b>	<b>28.68</b>	<b>%</b>	<b>POROSIDAD</b>	<b>33.97</b>	<b>%</b>

Tabla 6: Porosidad del medio granular al final de las mediciones realizadas en la segunda etapa.

POROSIDAD AL FINAL EN H1			POROSIDAD AL FINAL EN H2		
V total =	119.952	L	V total =	119.952	L
V útil =	32.59	L	V útil =	33.62	L
<b>POROSIDAD</b>	<b>27.17</b>	<b>%</b>	<b>POROSIDAD</b>	<b>28.03</b>	<b>%</b>

## VIII.2. ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN Y EVAPORACIÓN

Se determinó la evapotranspiración en el humedal (H1), que por definición corresponde a la pérdida del líquido por evaporación y transpiración de las plantas; y evaporación en la cama de sólidos (H2) que consiste en la pérdida del líquido por evaporación; los dos factores afectan el tiempo de retención hidráulico en cada unidad.

La evapotranspiración y evaporación se determinó en función del balance hídrico de los sistemas; es decir la variación de los caudales de entrada y salida en cada unidad, además considerando de manera práctica que la infiltración es despreciable.

En la primera etapa los resultados muestran que la evapotranspiración en el humedal fue de 13.30 L/d, mientras que la evaporación en la cama de sólidos fue de 5.07 L/d.

En la segunda etapa los resultados muestran que la evapotranspiración en el humedal fue de 19.52 L/d, mientras que la evaporación en la cama de sólidos fue de 4.22 L/d.

Tabla 7: Evapotranspiración en el humedal y la evaporación en la cama de sólidos para cada tiempo de retención (E: Afluente; H1: Efluente Humedal; H2: Efluente Cama de sólidos).

BALANCE HÍDRICO EN LAS UNIDADES EXPERIMENTALES							
	TRH	CAUDAL AFORADO (mL/min)				EVAPOTRANSPIRACIÓN Y EVAPORACIÓN (L/d)	
		E1	H1	E2	H2	HUMEDAL	CAMA DE SÓLIDOS
PRIMERA ETAPA	9 Horas	74.80	62.83	77.60	72.94	17.23	6.70
	12 Horas	56.65	47.59	56.21	52.84	13.05	4.86
	16 Horas	41.72	35.04	42.12	39.59	9.61	3.64
SEGUNDA ETAPA	10 Horas	62.40	52.83	61.14	56.86	13.78	6.17
	12 Horas	52.20	34.40	52.23	49.76	25.63	3.55
	14 Horas	45.01	31.71	44.60	42.57	19.15	2.93

### VIII.3. CALCULO DE TIEMPOS DE RETENCIÓN HIDRAULICO AL FINAL DE CADA ETAPA

En la operación del sistema se mantuvo un caudal desde el inicio hasta el final para cada tiempo de retención hidráulico, lo cual fue determinada en función de la porosidad inicial del medio granular y sin considerar pérdidas del líquido por evapotranspiración y evaporación, por lo tanto para hacer una mejor evaluación se determina el tiempo de retención hidráulico al final teniendo en cuenta que la porosidad del medio granular y las pérdidas por evaporación y evapotranspiración.

En la primera etapa los resultados nos muestran, que en el humedal (H1) el tiempo de retención hidráulico disminuye siempre, sin embargo para la cama de sólidos (H2) siempre aumenta, esto se da fundamentalmente porque la disminución de la porosidad en el humedal es mayor; a pesar que las pérdidas por la evapotranspiración en el humedal (H1) son mayores que la evaporación en la cama de sólidos (H2).

En la segunda etapa los resultados muestran que los tiempos de retención hidráulico en el humedal (H1) resultan mayores que en la cama de sólidos (H2) debido a que las pérdidas del líquido por evapotranspiración en el humedal son

mayores, que las pérdidas por evaporación en la cama de sólidos, lo cual se da a pesar de que la disminución de la porosidad en el humedal es mayor.

Tabla 8: Cálculo de los tiempos de retención hidráulico al final de cada etapa (H1: Humedal; H2: Cama de sólidos).

TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAULICO AL FINAL						
		CAUDAL (L/d)	EVAP (L/d)		THR (Horas)	
	TRH		H1	H2	H1	H2
PRIMERA ETAPA	9 Horas	111.11	17.23	6.70	8.79	9.37
	12 Horas	83.33	13.05	4.86	11.75	12.46
	16 Horas	62.50	9.61	3.64	15.61	16.61
SEGUNDA ETAPA	10 Horas	94.74	13.78	6.17	9.66	9.11
	12 Horas	78.95	25.63	3.55	14.67	10.70
	14 Horas	67.67	19.15	2.93	16.12	12.46

#### VIII.4. VARIACIÓN DEL pH

Los resultados obtenidos muestran, que en el efluente de la cama de sólidos (H2), el pH es mayor que en efluente del humedal (H1), lo cual supone que las plantas de alguna forma influyen en la disminución de la concentración del ion hidrógeno o al incremento de la concentración del dióxido de carbono que acidifica en alguna medida el efluente del humedal.

Los resultados del pH promedio obtenido en cada etapa de la investigación y para cada tiempo de retención evaluado se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 9: pH promedio en cada etapa y para los tiempos de retención hidráulico evaluados (E: Afluente; H1: Efluente Humedal; H2: Efluente Cama de sólidos).

ETAPA	TRH	pH		
		E	H1	H2
PRIMERA	9 Horas	7.07	7.33	7.35
	12 Horas	7.00	7.17	7.39
	16 Horas	7.33	7.29	7.64
SEGUNDA	10 Horas	6.97	6.92	7.40
	12 Horas	6.80	6.93	7.28
	14 Horas	6.80	6.99	7.32

En la primera etapa de la investigación, la variación del pH muestra que en el efluente de la cama de sólidos (H2), es mayor que en el efluente del humedal

(H1); y además el pH del afluente (E) es menor que en los dos efluentes para los tiempos de retención hidráulico de 9 y 12 horas, sin embargo para 16 horas, el pH del afluente es mayor que en el efluente del humedal y menor que en el efluente de la cama de sólidos.

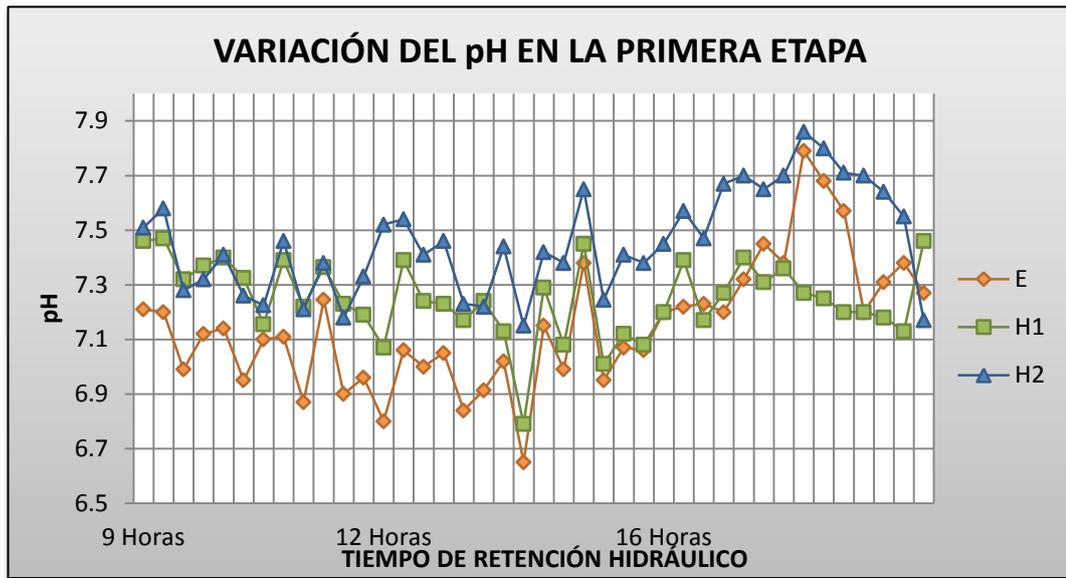


Figura 14 Variación del pH en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

En la segunda etapa de la investigación, la variación del pH muestra que en la cama de sólidos (H2) es mayor que en el efluente del humedal (H1); y además el pH del afluente (E), es menor que en los dos efluentes para los tiempos de retención hidráulico de 12 y 14 horas, sin embargo para 10 Horas el pH del afluente (E) es mayor que en el efluente del humedal y menor que en el efluente de la cama de sólidos.

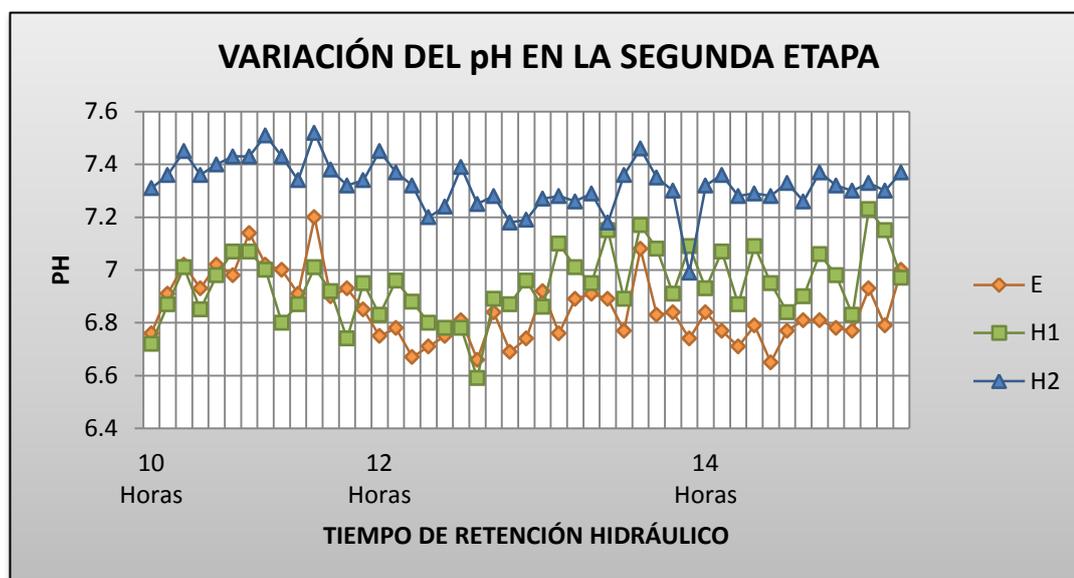


Figura 15 Variación del pH en la segunda etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

### VIII.5. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA

En general la temperatura del agua residual a tratar en los sistemas experimentales varía en función de la temperatura del ambiente y no se observa una variación mayor a 1°C en casi todos los tiempos de retención hidráulico en ambas etapas entre el afluente y los dos efluentes.

Los resultados de la temperatura promedio obtenido en cada etapa de la investigación y para cada tiempo de retención evaluado se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 10: Temperatura promedio en cada etapa y para tiempos de retención hidráulico evaluados (E: Afluente; H1: Efluente Humedal; H2: Efluente Cama de sólidos).

ETAPA	TRH	TEMPERATURA (°C)		
		E	H1	H2
PRIMERA	9 Horas	20.7	20.4	20.3
	12 Horas	21.7	21.5	21.6
	16 Horas	30.2	28.9	28.7
SEGUNDA	10 Horas	25.8	25.5	25.7
	12 Horas	28.4	28.1	28.4
	14 Horas	27.4	27.4	27.6

En la primera etapa de la investigación la evaluación se realizó para una temperatura promedio en el afluente de 20.7 °C para 9 horas de tiempo de retención, 21.7 °C para 12 horas y 30.2 para 16 horas

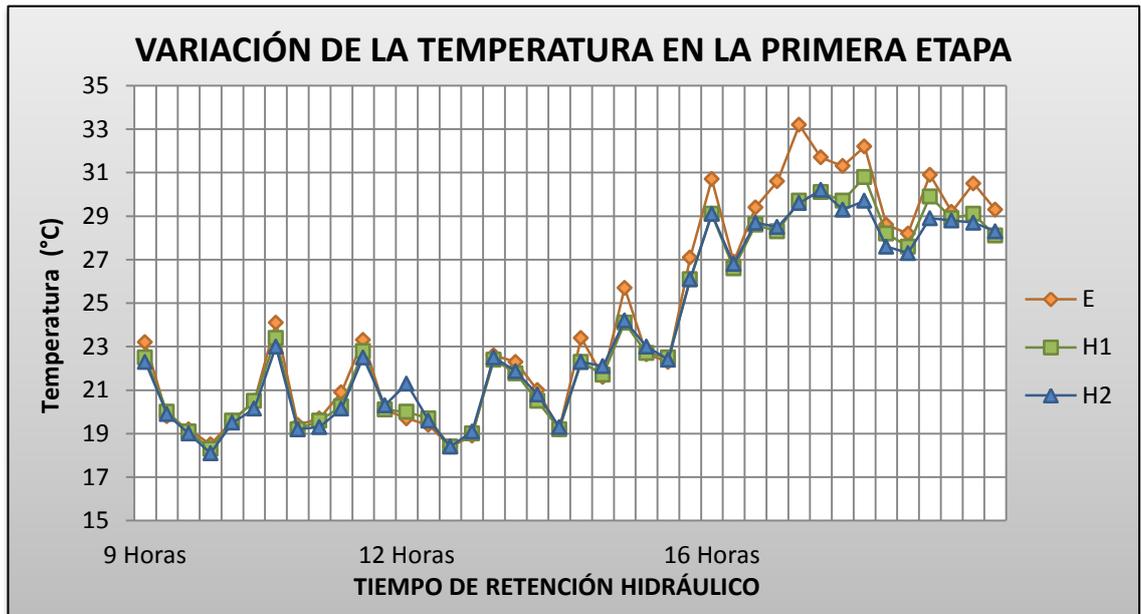


Figura 16 Variación de la Temperatura en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente Humedal; H2: Efluente Cama de sólidos).

En la segunda etapa de la investigación la evaluación se realizó para una temperatura promedio en el afluente de 25.8 °C para 10 horas de tiempo de retención, 28.4 °C para 12 horas y 27.4 para 14 horas.

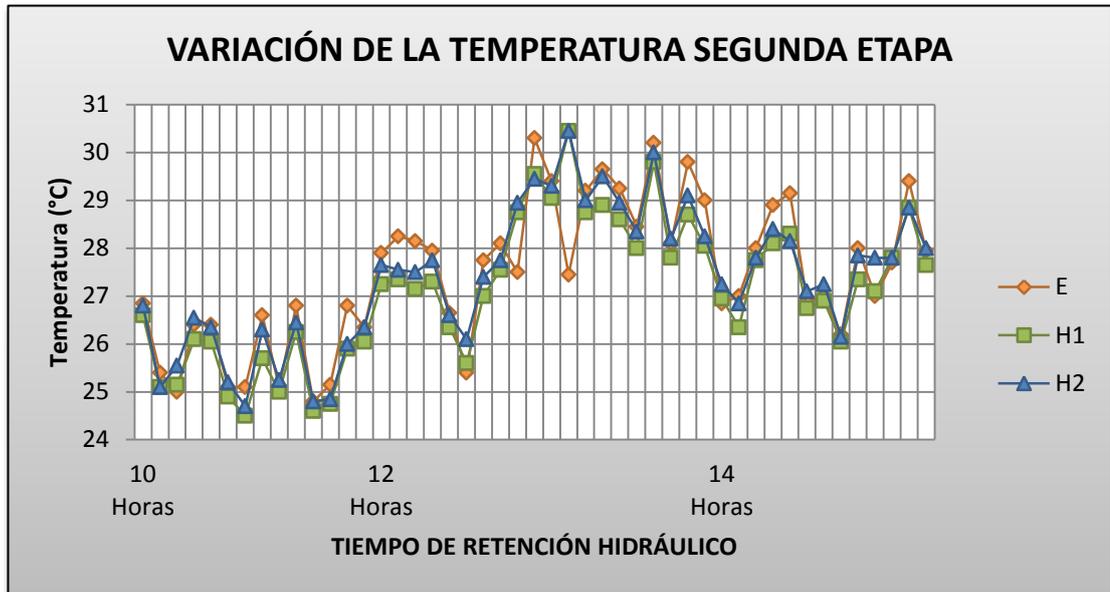


Figura 17 Variación de la Temperatura en la segunda etapa (E: Afluyente; H1: Efluente Humedal; H2: Efluente Cama de sólidos).

### VIII.6. VARIACIÓN DE LA TURBIEDAD

Los resultados obtenidos en turbiedad muestran que la variación en ambas unidades es de manera similar y aleatoria, no se puede decir cuál de ellas tiene mayor eficiencia debido a en algunos periodos el efluente del humedal (H1) es mayor y en otras, el efluente de la cama de sólidos (H2) es mayor.

Los resultados de la turbiedad promedio y remoción obtenidos en cada etapa y para cada tiempo de retención se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 11: Turbiedad y remoción promedio en cada etapa y para los tiempos de retención hidráulico evaluado (E: Afluyente; H1: Efluente Humedal; H2: Efluente Cama de sólidos).

ETAPA	TRH	TURBIEDAD (NTU)			REMOCIÓN (%)	
		E	H1	H2	H1	H2
PRIMERA	9 Horas	118	62.4	65	52.99 %	49.79 %
	12 Horas	64.1	17	25.5	78.40 %	64.80 %
	16 Horas	41.3	21.4	12.1	42.56 %	64.58 %
SEGUNDA	10 Horas	26.1	16.3	12	36.98 %	53.13 %
	12 Horas	40.3	13.4	12.9	64.45 %	65.44 %
	14 Horas	32.2	11.8	9.8	63.90 %	68.55 %

En la primera etapa de la investigación el efluente del humedal (H1) presenta una menor turbiedad que el efluente de la cama de sólidos (H2), para 9 y 12 horas de tiempo de retención, sin embargo para 16 horas de tiempo de retención el efluente de la cama de sólidos (H2) presenta menor turbiedad en comparación con el efluente del humedal (H1).

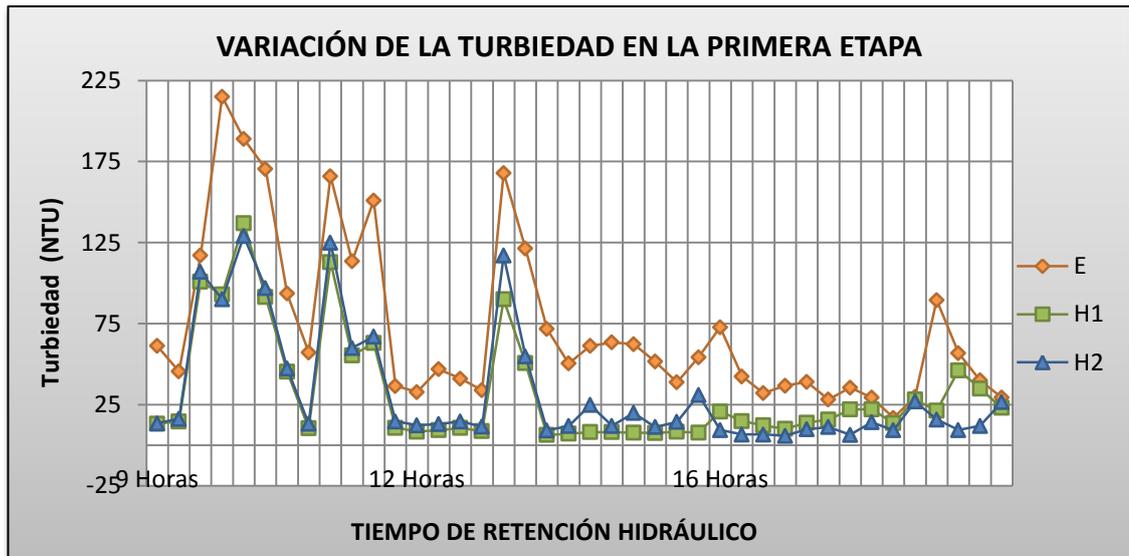


Figura 18 Variación de Turbiedad en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

En la primera etapa de la investigación, para 9 y 12 horas de tiempo de retención el humedal (H1) presenta una mayor remoción la turbiedad, sin embargo para 16 horas de tiempo de retención la cama de sólidos (H2) presenta una mayor remoción de la turbiedad.

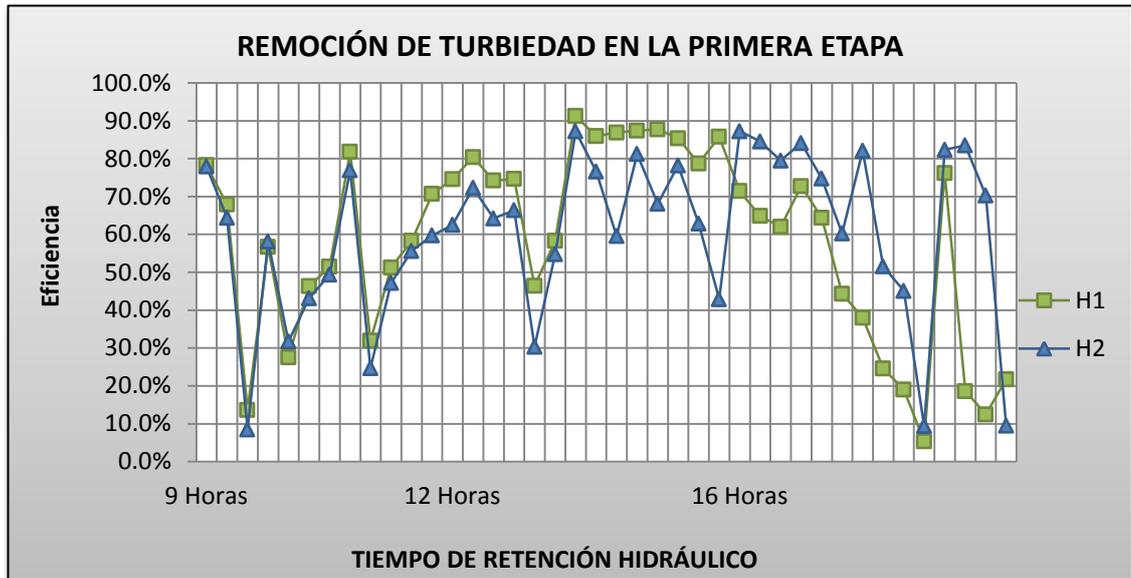


Figura 19 Remoción de la Turbiedad en la primera etapa (H1: Humedal; H2: Cama de sólidos).

En la segunda etapa de la investigación el efluente de la cama de sólidos (H2) presenta una menor turbiedad, en comparación con el efluente del humedal (H1), 10 para 9, 12 y 14 horas de tiempo de retención.

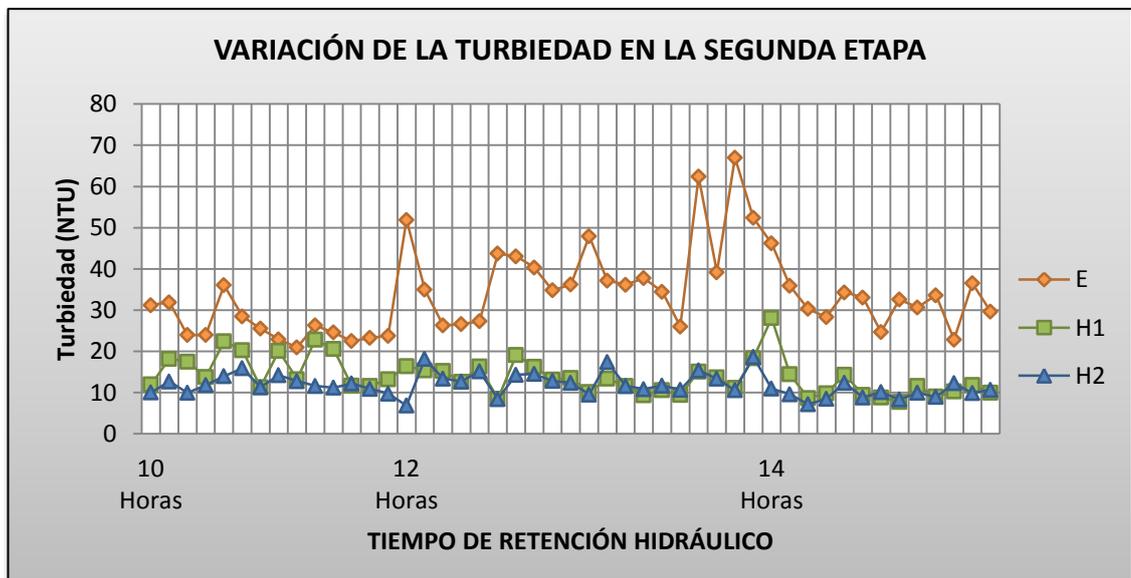


Figura 20 Variación de Turbiedad en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

En la segunda etapa de la investigación, para 10, 12 y 14 horas de tiempo de retención la cama de sólidos (H2) presenta una mayor remoción la turbiedad que el humedal (H1).

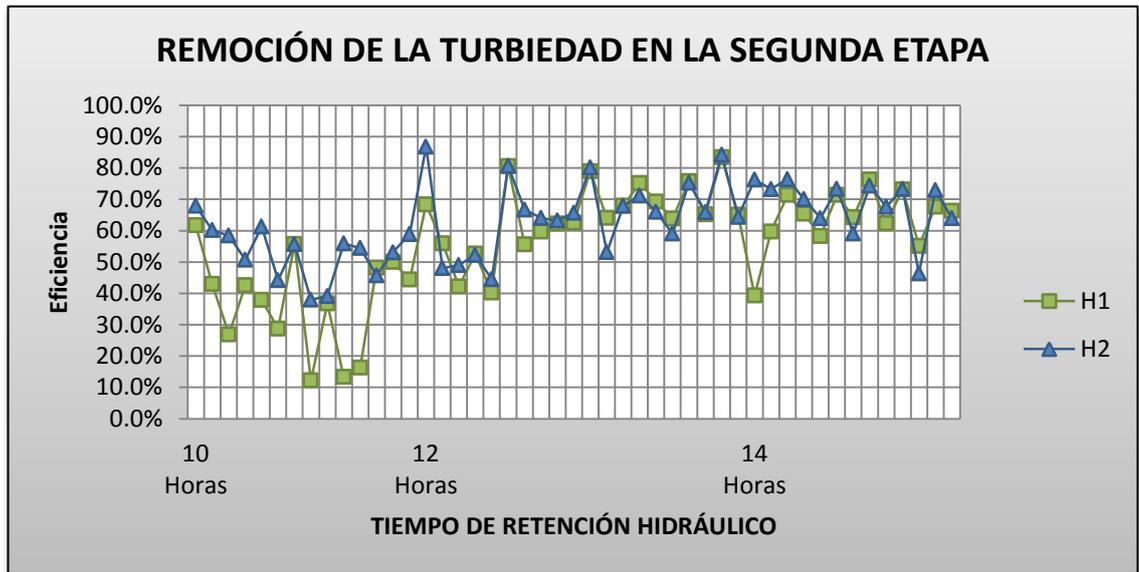


Figura 21 Remoción de Turbiedad en la segunda etapa (H1: Humedal; H2: Cama de sólidos).

### VIII.7. VARIACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO<sub>5</sub>)

Los resultados obtenidos en DBO<sub>5</sub> muestran, que el efluente del humedal (H1) es menor que el efluente de la cama de sólidos (H2), para tiempos de retención menores a 16 horas.

Los resultados de la DBO<sub>5</sub> promedio obtenido en cada etapa y para cada tiempo de retención se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 12: DBO<sub>5</sub> promedio en cada etapa y para cada tiempo de retención hidráulico.

ETAPA	TRH	DBO <sub>5</sub> (mg/L)		
		E	H1	H2
PRIMERA	9 Horas	105.85	41.75	64.14
	12 Horas	99.01	41.65	56.25
	16 Horas	48.21	19.68	11.40
SEGUNDA	10 Horas	63.38	20.41	27.06

	12 Horas	62.06	24.40	32.29
	14 Horas	58.29	22.66	31.79

En la primera etapa de la investigación, la variación de la DBO<sub>5</sub> muestra que el efluente del humedal (H1) resulta menor que el efluente de la cama de sólidos (H2) para los tiempos de retención de 9 y 12 horas, sin embargo para 16 horas de tiempo de retención el efluente del humedal (H1) resulta mayor que el efluente de la cama de sólidos (H2).

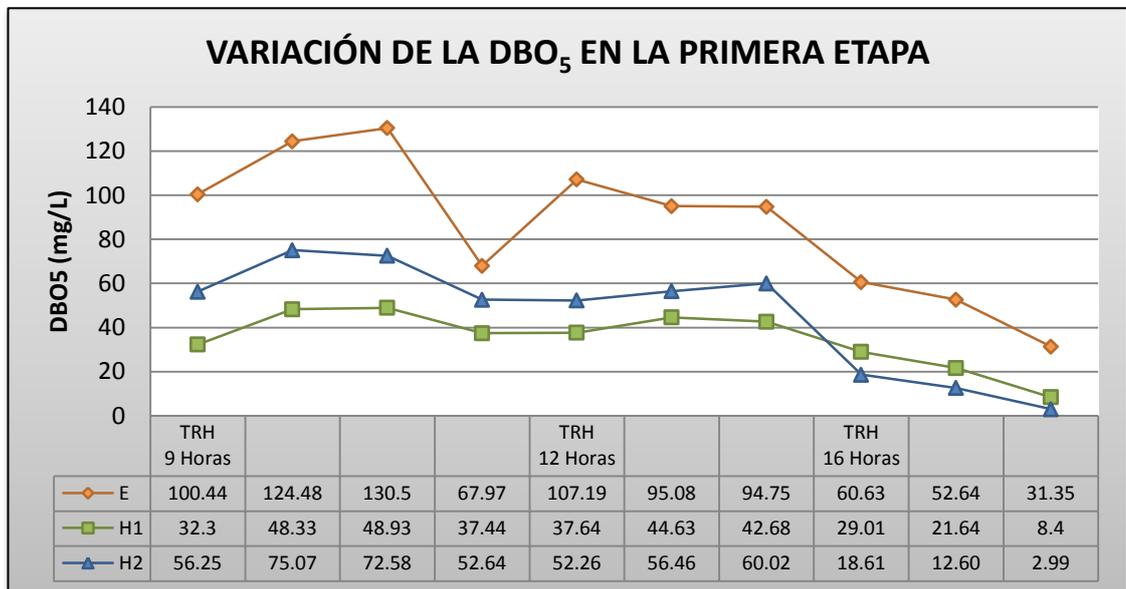


Figura 22 Variación de Turbiedad en la primera etapa (E: Afluyente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

En la primera etapa de la investigación, el humedal (H1) presenta una mayor remoción de la DBO<sub>5</sub>, para 9 y 12 horas de tiempo de retención; sin embargo para 16 horas de tiempo de retención la cama de sólidos (H2) presenta una mayor remoción de la DBO<sub>5</sub>.

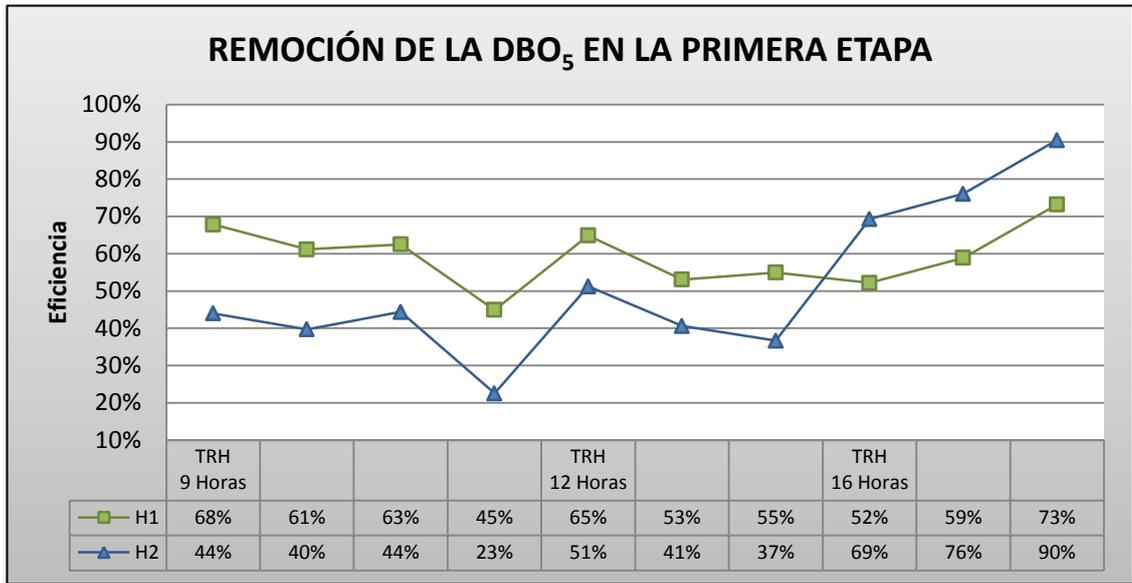


Figura 23 Remoción de la DBO<sub>5</sub> en la primera etapa (H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

En la segunda etapa, la variación de la DBO<sub>5</sub> muestra que el efluente del humedal es menor que el efluente de la cama de sólidos para los tiempos de retención de 10, 12 y 14 horas.

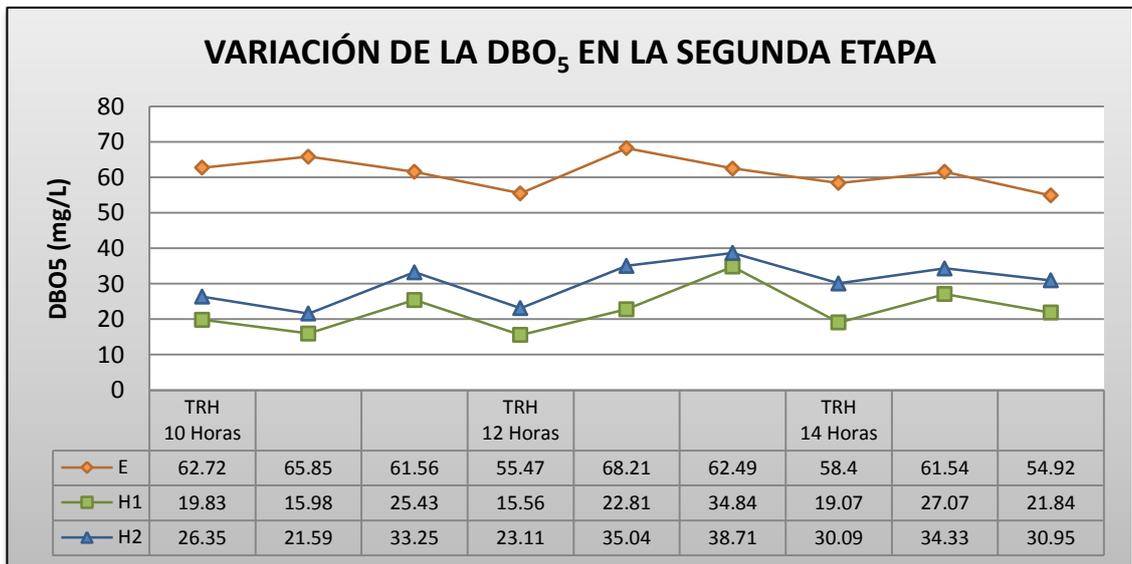


Figura 24 Variación de DBO<sub>5</sub> en la segunda etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

En la segunda etapa de la investigación, el humedal (H1) presenta una mayor remoción de la DBO<sub>5</sub>, para 10, 12 y 14 horas de tiempo de retención que la cama de sólidos (H2).

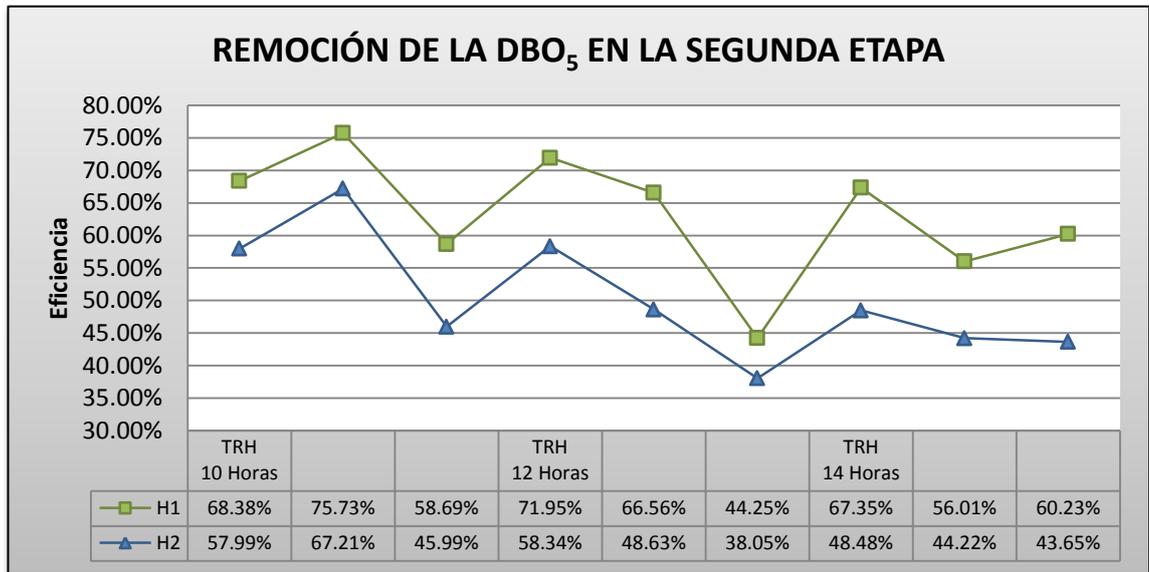


Figura 25 Remoción de la DBO<sub>5</sub> en la segunda etapa (H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

### VIII.8. REMOCIÓN DE LA DBO<sub>5</sub> INFLUENCIADA POR LA MACRÓFITA

La remoción de la DBO<sub>5</sub> influenciada por la macrófita se obtiene de manera práctica comparando la remoción obtenida en el humedal (H1) con la remoción en la cama de sólidos (H2) que funcionó como sistema de control.

La remoción de DBO<sub>5</sub> en cada unidad experimental y la remoción influenciada por la macrófita (H1-H2) se presentan a detalle en la tabla siguiente.

Tabla 13: Remoción de DBO<sub>5</sub> influenciada por la macrófita en cada etapa y para cada tiempo de retención hidráulico evaluado.

Eficiencias en remoción de DBO <sub>5</sub>										
ETAPA	TRH	H1			H2			H1 - H2		
		Máx	Min	Prom.	Máx	Min	Prom.	Máx	Min	Prom.
PRIMERA	9 Horas	67.8%	44.9%	59.1%	44.4%	22.6%	37.7%	23.8%	18.1%	21.5%
	12 Horas	64.9%	53.1%	57.6%	51.2%	36.7%	42.8%	18.3%	12.4%	14.8%

	16 Horas	73.2%	52.2%	61.4%	90.5%	69.3%	78.6%	-17.2%	-17.3%	-17.2%
<b>SEGUNDA</b>	10 Horas	75.7%	58.6%	67.6%	67.2%	45.9%	57.0%	12.7%	8.5%	10.5%
	12 Horas	71.9%	44.2%	60.9%	58.3%	38.0%	48.3%	17.9%	6.2%	12.6%
	14 Horas	67.3%	56.0%	61.1%	48.4%	43.6%	45.4%	18.9%	11.8%	15.8%

En la primera etapa la remoción de la  $DBO_5$  influenciada por la macrófita alcanza un 21.5 % para 9 horas de tiempo de retención hidráulico, 14.8 % para 12 horas, sin embargo para 16 horas de tiempo de retención las macrófitas tienen una influencia negativa en la remoción de la  $DBO_5$ , debido a que el humedal (H1) se tiene una menor eficiencia e en la remoción de  $DBO_5$ .

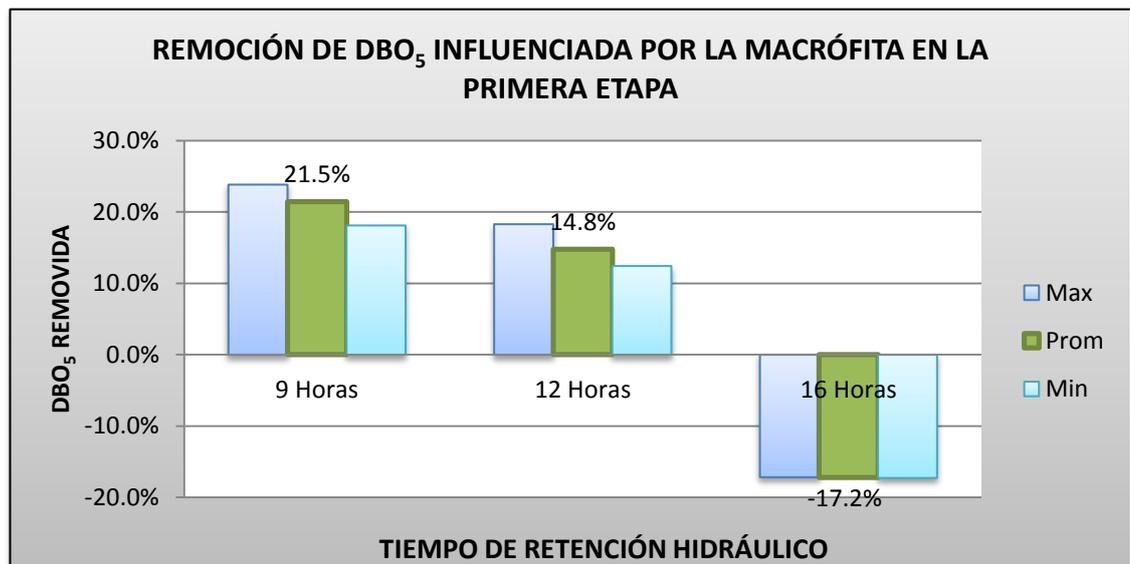


Figura 26 Remoción de  $DBO_5$  influenciada por la macrófita en la primera etapa y para cada tiempo de retención hidráulico.

En la segunda etapa la remoción de la  $DBO_5$  influenciada por la macrófita alcanza un 10.5 % para 10 horas de tiempo de retención hidráulico, 12.6 % para 12 horas y 15.8 % para 14 horas de tiempo de retención.

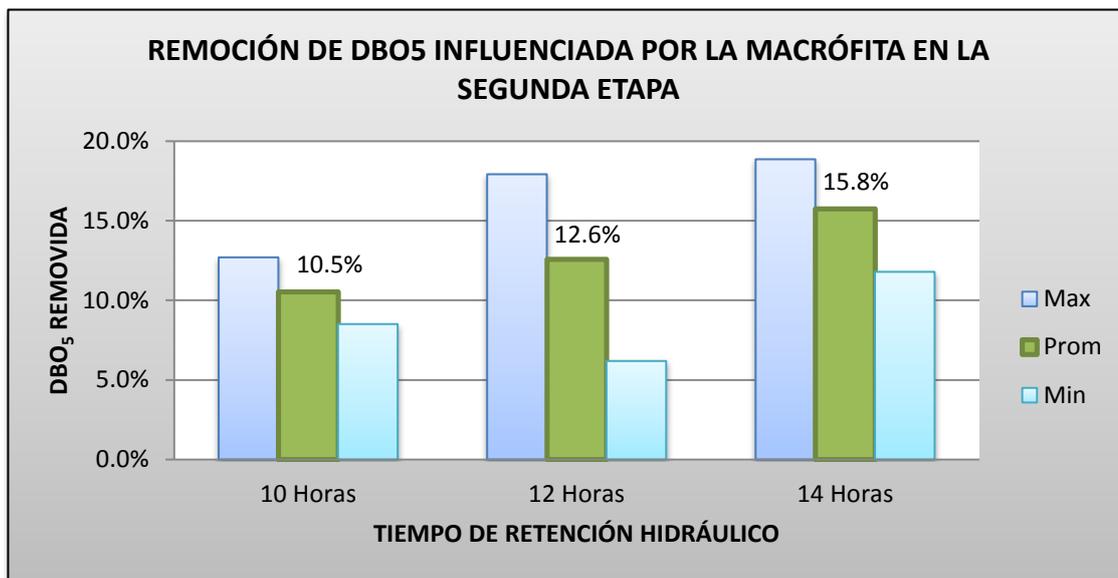


Figura 27 Remoción de DBO<sub>5</sub> influenciada por la macrófita en la segunda etapa y para cada tiempo de retención hidráulico.

### VIII.9. VARIACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Los resultados obtenidos en DQO muestran, que el efluente del humedal (H1) es menor que el efluente de la cama de sólidos (H2).

Los resultados de la DQO promedio obtenido en cada etapa y para cada tiempo de retención hidráulico se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 14: DQO promedio en cada etapa y para los tiempos de retención hidráulico evaluado.

ETAPA	TRH	DQO (mg/L)		
		E	H1	H2
PRIMERA	9 Horas	183.33	102.67	120
	12 Horas	206.33	92.33	120
	16 Horas	208.33	76.67	111.67
SEGUNDA	10 Horas	176.75	89.75	99.75
	12 Horas	244.67	105.67	153
	14 Horas	207.33	106	124

En la primera etapa de la investigación, la variación de la DQO muestra que en el efluente del humedal (H1) es menor que en la cama de sólidos (H2) para los tiempos de retención de 9, 12 y 16 horas.

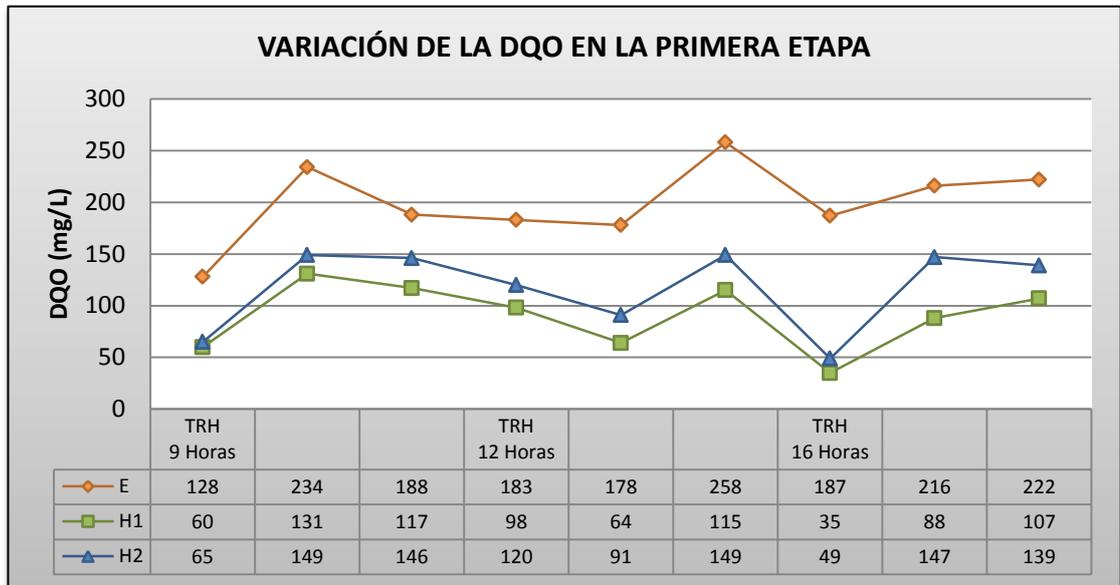


Figura 28 Variación de DQO en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos)

En la primera etapa de la investigación, la remoción de la DQO es mayor en el humedal (H1) que en la cama de sólidos (H2), para lo tiempos de retención hidráulico de 10, 12 y 14 horas.

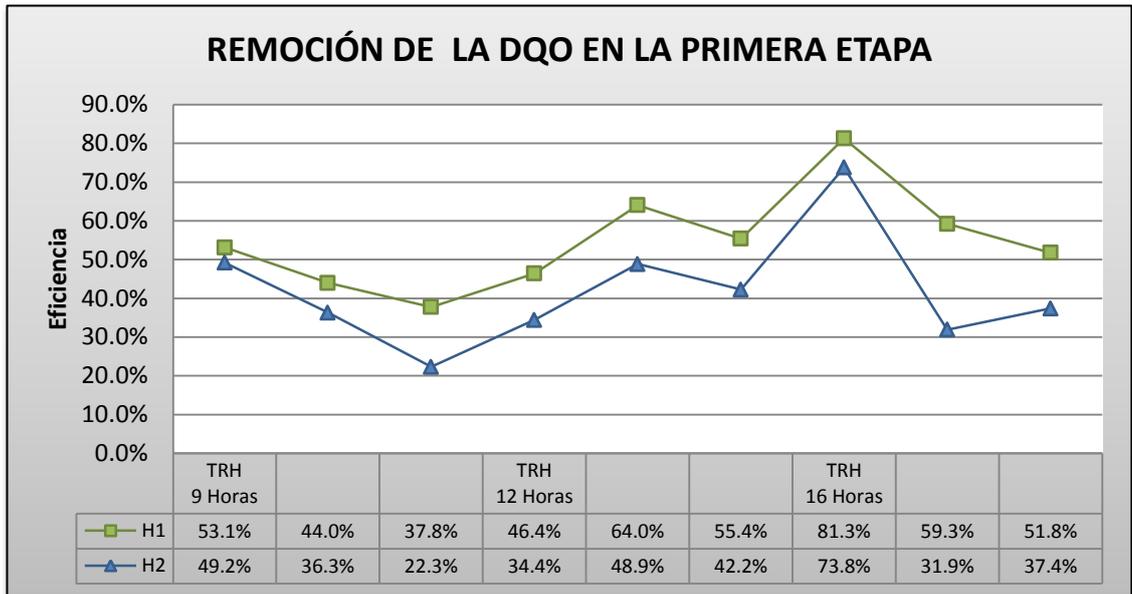


Figura 29 Remoción de la DQO en la primera etapa (H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

En la segunda etapa de la investigación, la variación de la DQO muestra que en el efluente del humedal es menor que en la cama de sólidos para los tiempos de retención de 10, 12 y 14 horas.

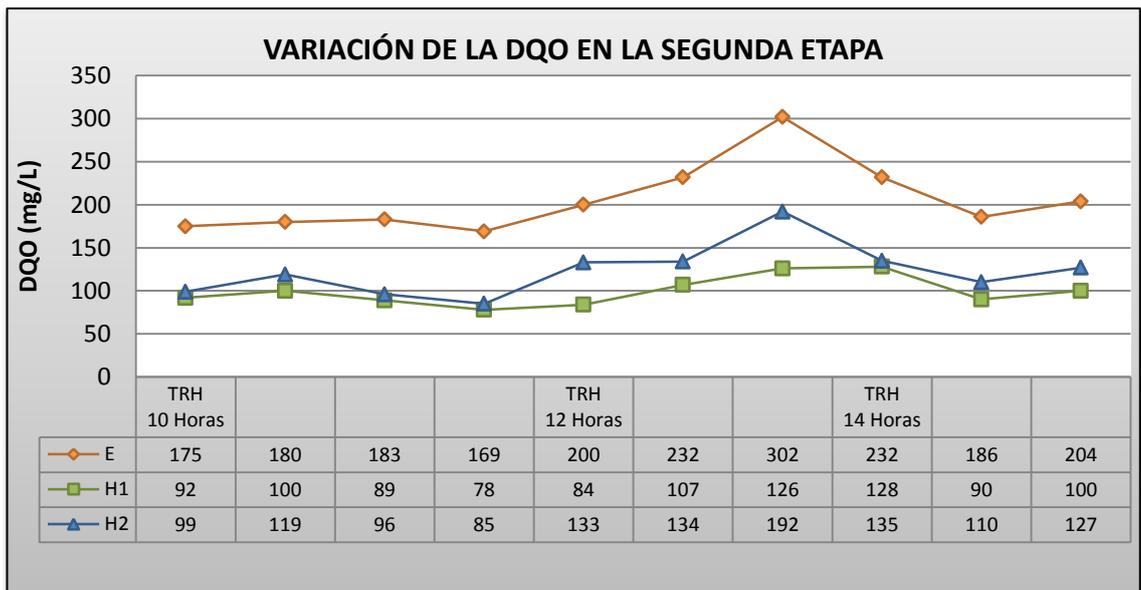


Figura 30 Variación de la DQO en la segunda etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

En la segunda etapa de la investigación, la remoción de la DQO es mayor en el humedal (H1) que en la cama de sólidos (H2), para los tiempos de retención hidráulico de 10, 12 y 14 horas.

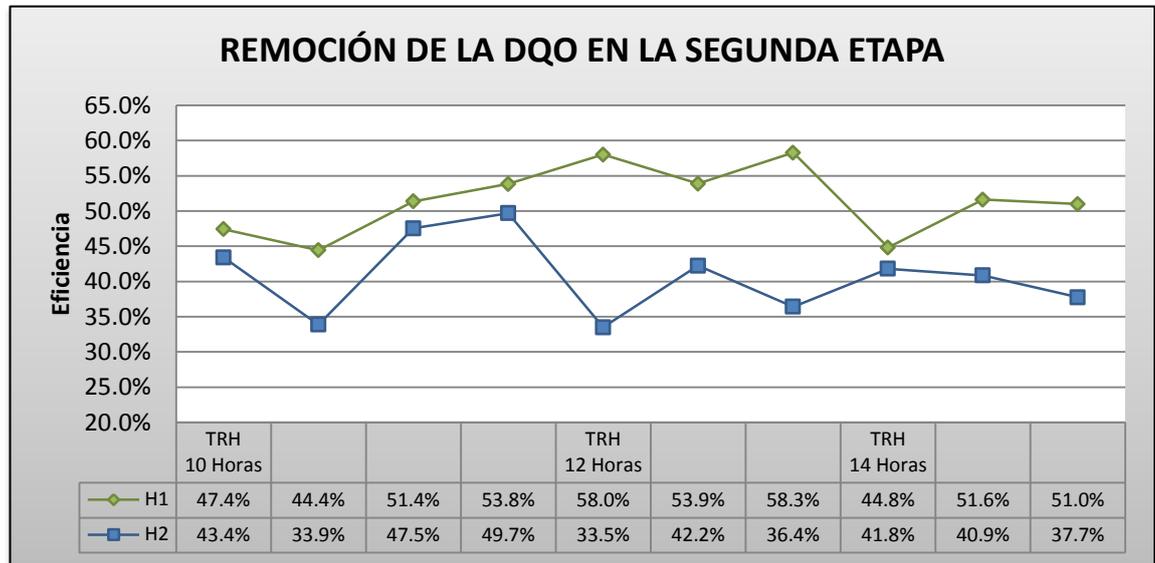


Figura 31 Remoción de la DQO en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente del Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

### VIII.10. REMOCIÓN DE LA DQO INFLUENCIADA POR LA MACRÓFITA

La remoción de la DQO influenciada por la macrófita se obtiene de manera práctica comparando la remoción obtenida en el humedal (H1) con la remoción obtenida en la cama de sólidos (H2), que funcionó como sistema de control.

La remoción de DQO en cada unidad experimental y la remoción influenciada por la macrófita (H1-H2) se presentan a detalle en la tabla siguiente.

Tabla 15: Remoción de DQO influenciada por la macrófita en cada etapa y para cada tiempo de retención hidráulico evaluado.

Eficiencias en remoción de DQO										
ETAPA	TRH	H1			H2			H1 - H2		
		Máx	Min	Prom	Máx	Min	Prom	Máx	Min	Prom.
PRIMERA	9 Horas	53.1%	37.8%	45.0%	49.2%	22.3%	36.0%	15.4%	3.9%	9.0%
	12 Horas	64.0%	46.4%	55.3%	48.9%	34.4%	41.9%	15.2%	12.0%	13.5%
	16 Horas	81.3%	51.8%	64.1%	73.8%	31.9%	47.7%	27.3%	7.5%	16.4%
SEGUNDA	10 Horas	53.8%	44.4%	49.3%	49.7%	33.9%	43.6%	10.6%	3.8%	5.6%

	12 Horas	58.3%	53.9%	56.7%	42.2%	33.5%	37.4%	24.5%	11.6%	19.3%
	14 Horas	51.6%	44.8%	49.1%	41.8%	37.7%	40.1%	13.2%	3.0%	9.0%

En la primera etapa la remoción de la DQO influenciada por la macrófita alcanza un 9.0 % para 9 horas, 13.5 % para 12 horas y 16.4 % para 16 horas de tiempo de retención hidráulico.

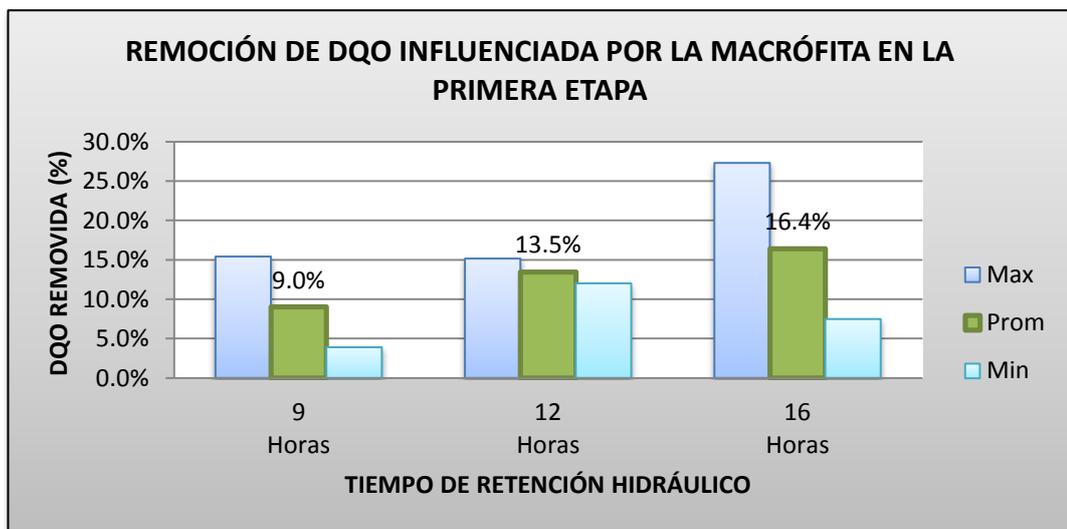


Figura 32 Remoción de DQO influenciada por la macrófita en la primera etapa y para cada tiempo de retención hidráulico.

En la segunda etapa la remoción de la DQO influenciada por la macrófita alcanza un 5.6 % para 10 horas de tiempo de retención hidráulico, 19.3 % para 12 horas y 9.0 % para 14 horas de tiempo de retención.

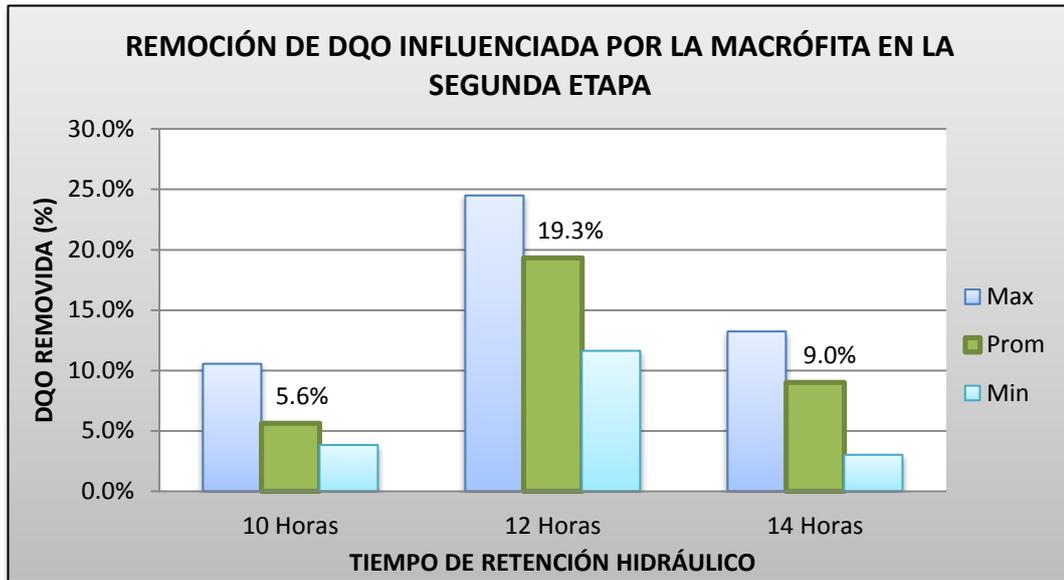


Figura 33 Remoción de DQO influenciada por la macrófita en la segunda etapa y para cada tiempo de retención hidráulico.

#### VIII.11. VARIACIÓN DE DBO<sub>5</sub> Y DQO EN EL AFLUENTE EN CADA ETAPA

En la primera etapa, la concentración de materia orgánica para el primer afluente (E1: Efluente de reactor UASB), fue de 199.30 mg/L y 86.50 mg/L en términos de DQO y DBO<sub>5</sub> respectivamente.

En la segunda etapa, la concentración de materia orgánica del afluente (E2: Efluente de reactor UASB), fue de 205.25 mg/L y 61.18 mg/L en términos de DQO y DBO<sub>5</sub> respectivamente.

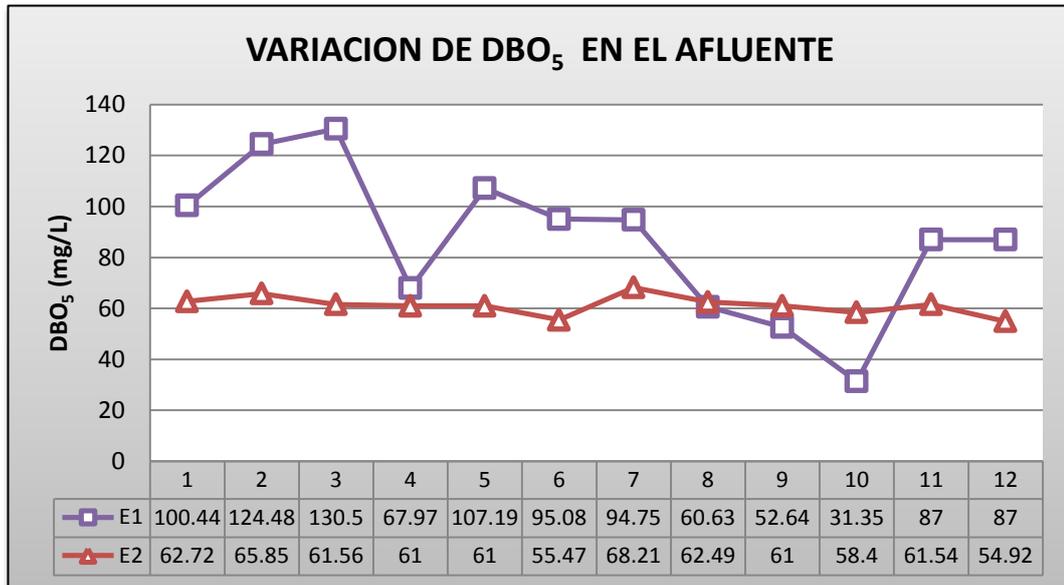


Figura 34 Variación de DBO<sub>5</sub> en el afluente de las unidades experimentales (E1: Afluente en la primera etapa; E2: Afluente en la segunda etapa)

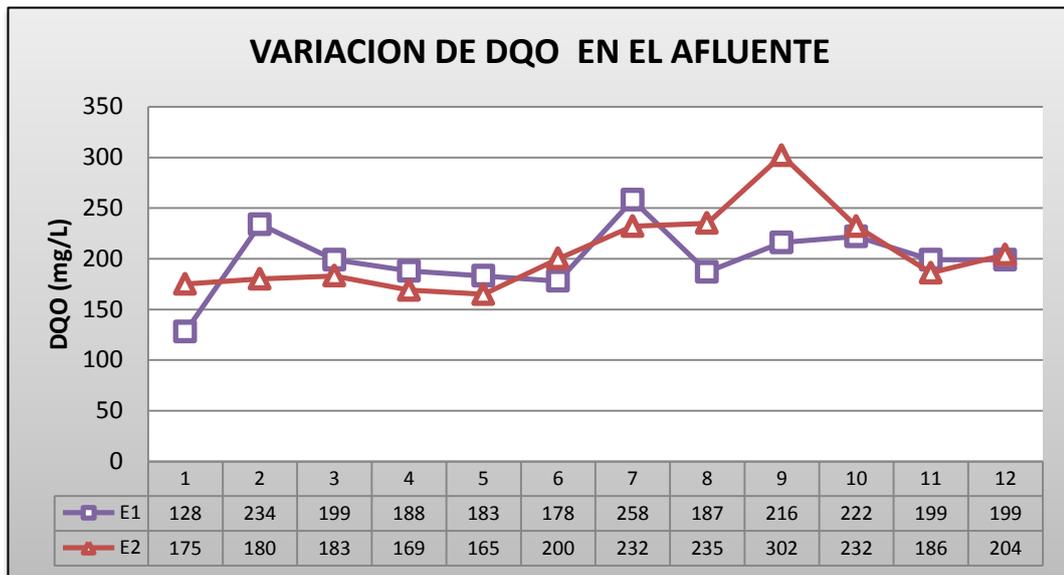


Figura 35 Variación de DQO en el afluente de las unidades experimentales (E1: Afluente en la primera etapa; E2: Afluente en la segunda etapa)

### VIII.12. VARIACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO (OD)

En la primera etapa la concentración de oxígeno disuelto fue de 0.19 mg/L en afluente (E), 0.34 mg/L en efluente del humedal (H1) y 0.29 mg/L en el efluente de la cama de sólidos.

En la segunda etapa la concentración de oxígeno disuelto fue de 0.24 mg/L en afluente (E), 0.84 mg/L en efluente del humedal (H1) y 0.55 mg/L en el efluente de la cama de sólidos.

Los resultados muestran una mayor concentración de oxígeno disuelto en el humedal, lo cual se da principalmente por la oxigenación de las macrófitas mediante sus raíces.

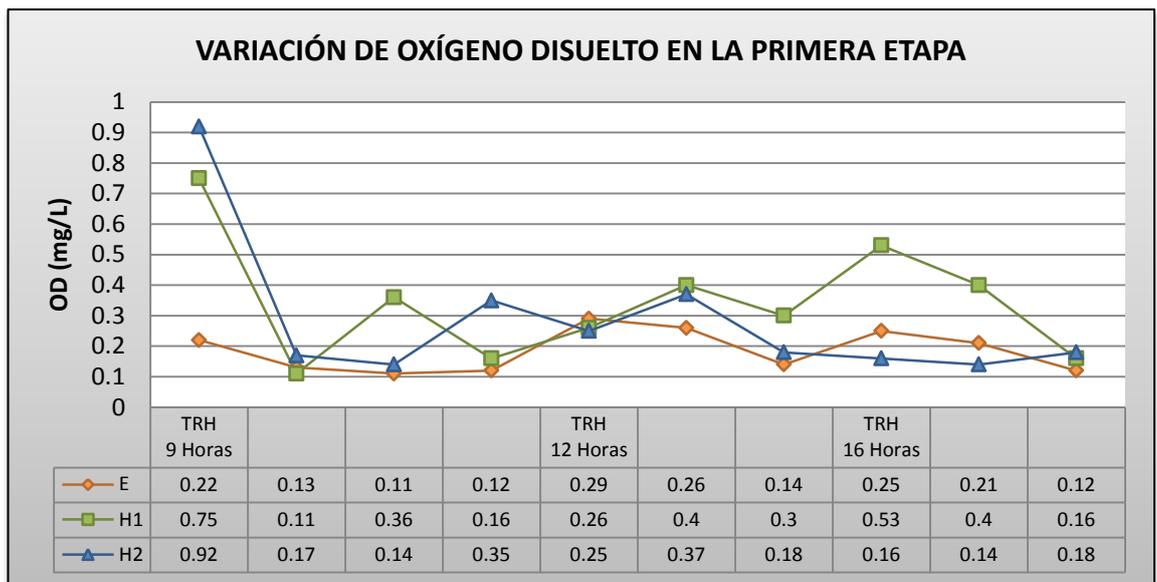


Figura 36 Variación de OD en la primera etapa (E: Afluente; H1: Efluente de Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

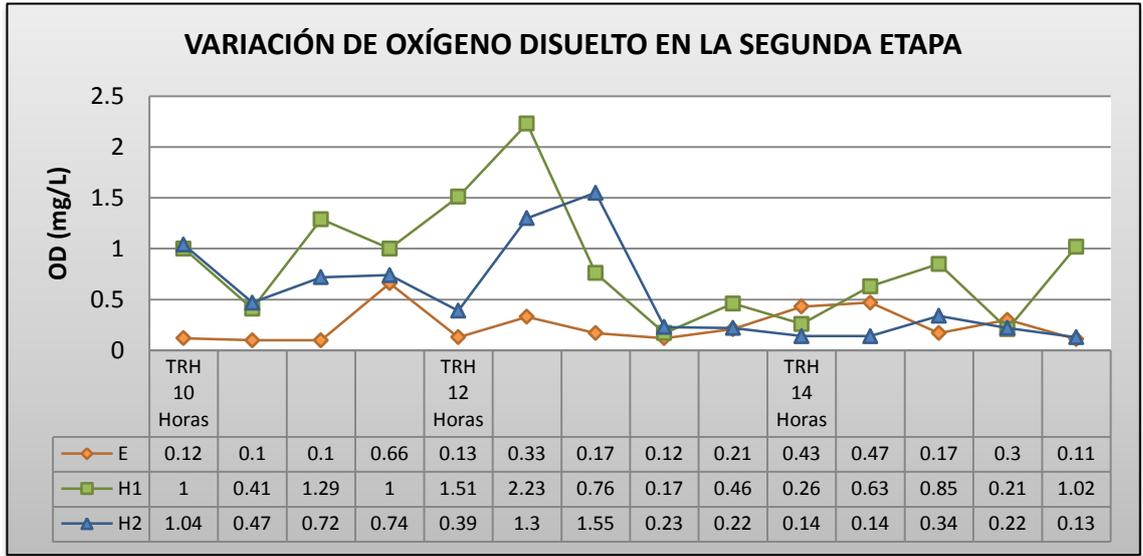


Figura 37 Variación de OD en la segunda etapa (E: Afluyente; H1: Efluente de Humedal; H2: Efluente de la Cama de sólidos).

### VIII.13. DESARROLLO DE LA MACRÓFITA (*Scirpus Californicus*)

En las estructuras experimentales se contó con un área disponible de 0.4 m de ancho y 1.20 m de largo, en la cual se plantaron tres plantaciones de la macrófita *Scirpus Californicus* (Totora), distribuidos uniformemente.

La tasa de crecimiento de las macrófitas fue en promedio 0.16 metros por semana y la máxima altura que alcanzaron fue de 2.20 m; y el desarrollo de las raíces alcanzó una longitud máxima de 0.25 m.

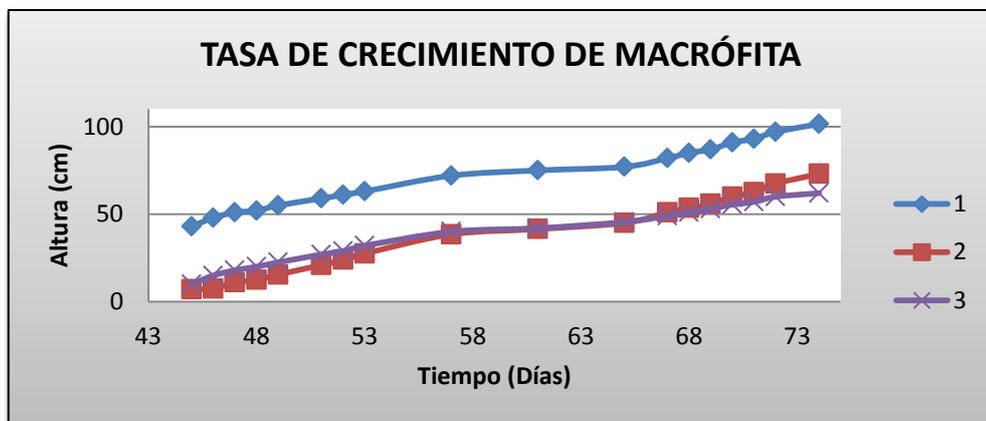


Figura 38 Crecimiento de la macrófita *Scirpus Californicus* (Totora)

Tabla 16: Resumen general de eficiencias en remoción de materia orgánica en las dos etapas y en las condiciones evaluadas.

ETAPA	TRH	Q	DBO <sub>5</sub>	Eficiencia		H1 - H2	Carga	DQO	Eficiencia		H1 - H2	Carga	pH			T
		(L/d)	(mg/L)	H1	H2		gDBO <sub>5</sub> /(m2.d)	(mg/L)	H1	H2		gDQO/(m2.d)	E	H1	H2	( ° C )
PRIMERA	9 Horas	111.11	105.85	59.12%	37.7%	21.5%	24.50	183.33	45.0%	36.0%	9.0%	42.44	7.07	7.33	7.35	20.70
	12 Horas	83.33	99.01	57.6%	42.8%	14.8%	17.19	206.33	55.3%	41.9%	13.5%	35.82	7.00	7.17	7.39	21.74
	16 Horas	62.50	48.21	61.4%	78.6%	-17.2%	6.28	208.33	64.1%	47.7%	16.4%	27.13	7.33	7.29	7.64	30.20
SEGUNDA	10 Horas	94.74	63.38	67.6%	57.1%	10.5%	12.51	176.75	49.3%	43.6%	5.6%	34.42	6.97	6.92	7.40	25.85
	12 Horas	78.95	62.06	60.9%	48.3%	12.6%	10.21	244.67	56.7%	37.4%	19.3%	39.85	6.80	6.93	7.28	28.42
	14 Horas	67.67	58.29	61.2%	45.4%	15.8%	8.22	207.33	49.1%	40.1%	9.0%	29.23	6.80	6.99	7.32	27.40

## IX. CONCLUSIONES

- La hipótesis se cumple parcialmente, debido a que la remoción de  $\text{DBO}_5$  influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** es negativa en la primera etapa para 16 horas de tiempo de retención hidráulico; además la remoción de DQO es menor al 10% planteado inicialmente en la primera etapa para 9 horas de tiempo de retención y en la segunda etapa para 10 y 14 horas de tiempo de retención.
- En la primera etapa de la investigación, evaluando para un tiempo de retención hidráulico de 9 horas, se obtuvo una concentración promedio en el afluente de  $\text{DBO}_5$  de 105.85 mg/L; para el cual se obtuvieron eficiencias en remoción de  $\text{DBO}_5$  del 59.12 % y 37.7 %, para el humedal (H1) y la cama de sólidos (H2) respectivamente, lo que implica una remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** del 21.5 % en remoción de  $\text{DBO}_5$ .
- En la primera etapa de la investigación, evaluando para un tiempo de retención hidráulico de 9 horas, se obtuvo una concentración promedio en el afluente de DQO de 183.33 mg/L; para el cual se obtuvieron eficiencias en remoción de DQO del 45.0 % y 36.0 %, para el humedal (H1) y la cama de sólidos (H2) respectivamente, lo que implica una remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** del 9.0 % en remoción de DQO.
- En la primera etapa de la investigación, evaluando para un tiempo de retención hidráulico de 12 horas, se obtuvo una concentración promedio en el afluente de  $\text{DBO}_5$  de 99.01 mg/L; para el cual se obtuvieron eficiencias en remoción de  $\text{DBO}_5$  del 57.6 % y 42.8 %, para el humedal (H1) y la cama de sólidos (H2) respectivamente, lo que implica una remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** del 14.8 % en remoción de  $\text{DBO}_5$ .
- En la primera etapa de la investigación, evaluando para un tiempo de retención hidráulico de 12 horas, se obtuvo una concentración promedio en

el afluente de DQO de 206.33 mg/L; para el cual se obtuvieron eficiencias en remoción de DQO del 55.3 % y 41.9 %, para el humedal (H1) y la cama de sólidos (H2) respectivamente, lo que implica una remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** del 13.5 % en remoción de DQO.

- En la primera etapa de la investigación, evaluando para un tiempo de retención hidráulico de 16 horas, se obtuvo una concentración promedio el afluente de DBO<sub>5</sub> de 48.21 mg/L en; para el cual se obtuvieron eficiencias en remoción de DBO<sub>5</sub> del 61.4 % y 78.6 %, para el humedal (H1) y la cama de sólidos (H2) respectivamente, lo que implica una influencia negativa de la macrófita ***Scirpus Californicus*** del 17.2 % en remoción de DBO<sub>5</sub>, en las condiciones mencionadas.
- En la primera etapa de la investigación, evaluando para un tiempo de retención hidráulico de 16 horas, se obtuvo una concentración promedio en el afluente de DQO de 208.33 mg/L; para el cual se obtuvieron eficiencias en remoción de DQO del 64.1 % y 47.7 %, para el humedal (H1) y la cama de sólidos (H2) respectivamente, lo que implica una remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** del 16.4 % en remoción de DQO.
- En la segunda etapa de la investigación, evaluando para un tiempo de retención hidráulico de 10 horas, se obtuvo una concentración promedio en el afluente de DBO<sub>5</sub> de 63.38 mg/L; para el cual se obtuvieron eficiencias en remoción de DBO<sub>5</sub> del 67.6 % y 57.1 %, para el humedal (H1) y la cama de sólidos (H2) respectivamente, lo que implica una remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** del 10.5 % en remoción de DBO<sub>5</sub>.
- En la segunda etapa de la investigación, evaluando para un tiempo de retención hidráulico de 10 horas, se obtuvo una concentración promedio en el afluente de DQO de 176.75 mg/L; para el cual se obtuvieron eficiencias en remoción de DQO del 49.3 % y 43.6 %, para el humedal (H1) y la cama de sólidos (H2) respectivamente, lo que implica una remoción adicional

influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** del 5.6 % en remoción de DQO.

- En la segunda etapa de la investigación, evaluando para un tiempo de retención hidráulico de 12 horas, se obtuvo una concentración promedio en el afluente de DBO<sub>5</sub> de 62.06 mg/L; para el cual se obtuvieron eficiencias en remoción de DBO<sub>5</sub> del 60.9% y 48.3 %, para el humedal (H1) y la cama de sólidos (H2) respectivamente, lo que implica una remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** del 12.6 % en remoción de DBO<sub>5</sub>.
- En la segunda etapa de la investigación, evaluando para un tiempo de retención hidráulico de 10 horas, se obtuvo una concentración promedio en el afluente de DQO de 244.67 mg/L; para el cual se obtuvieron eficiencias en remoción de DQO del 56.7 % y 37.4 %, para el humedal (H1) y la cama de sólidos (H2) respectivamente, lo que implica una remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** del 19.3 % en remoción de DQO.
- En la segunda etapa de la investigación, evaluando para un tiempo de retención hidráulico de 14 horas, se obtuvo una concentración promedio en el afluente de DBO<sub>5</sub> de 58.29 mg/L; para el cual se obtuvieron eficiencias en remoción de DBO<sub>5</sub> del 61.2 % y 45.4 %, para el humedal (H1) y la cama de sólidos (H2) respectivamente, lo que implica una remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** del 15.8 % en remoción de DBO<sub>5</sub>.
- En la segunda etapa de la investigación, evaluando para un tiempo de retención hidráulico de 14 horas, se obtuvo una concentración promedio en el afluente de DQO de 207.33 mg/L; para el cual se obtuvieron eficiencias en remoción de DQO del 49.1 % y 40.1 %, para el humedal (H1) y la cama de sólidos (H2) respectivamente, lo que implica una remoción adicional influenciada por la macrófita ***Scirpus Californicus*** del 9.0 % en remoción de DQO.

## **X. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda realizar la evaluación de remoción de otros parámetros como nutrientes y microorganismos patógenos, para ver la importancia de las macrófitas en los humedales de manera general.
- Se recomienda verificar la presencia de hierro y manganeso en el efluente, para descartar la formación de bacterias ferruginosas, debido a que la turbiedad se incrementa en función al tiempo entre el muestreo y la medición y luego de varias horas se estabiliza y clarifica.
- Se recomienda evaluar la influencia de la macrófita en la remoción de contaminantes para tiempos de retención mayores a 16 horas.
- Se recomienda realizar la evaluación para humedales con mayor tiempo de operación.
- La operación y mantenimiento de las unidades debe ser como mínimo dos veces por semana para evitar formaciones de natas u otros tipos de sustancia en la entrada y salida de las unidades y tener menor probabilidad de alteraciones en las mediciones.
- Se recomienda utilizar un mezclador en el tanque de almacenamiento para evitar la sedimentación y tener un afluente homogéneo.

## **XI. FUENTES DE INFORMACIÓN**

1. Guido Zárate A. y Durán de Bazúa C. (2008). Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio- Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos – México.
2. García Palacio J. (2010). Efecto del uso de plantas y configuración de los sistemas en la remoción de organismos patógenos mediante el uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domesticas en condiciones tropicales - Universidad Tecnológica De Pereira – Colombia.
3. Ignacio Montoya J. et.al (2010). Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial

usando tres especies de macrófitas - Escuela de Ingeniería de Antioquia – Colombia

4. García Serrano J. y Corso Hernández A. (2008). Depuración con humedales construidos – Universidad Politécnica de Catalunya – España.
5. Heike Hoffmann et.al (2011). Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas - Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, GIZ - Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN.
6. Oscar Delgadillo et. al (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales - Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA) – Cochabamba, Bolivia.
7. Londoño Cardona L. y Marín Vanegas C. (2009). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética - Universidad Tecnológica De Pereira – Colombia.
8. Miglio Toledo R. (2007). Humedales artificiales- documentación de experiencias existentes en el Perú - Organización Panamericana De La Salud - Representación en Perú.
9. Seoanez Calvo M. (1999). Aguas residuales: Tratamiento por humedales artificiales.
10. George Tchobanoglous y Franklin L. Burton (1995). Ingeniería de aguas residuales – Metcalf & Eddy.
11. Jordi Morató y Estela Delgado S. (2005). Eliminación de microorganismos en humedales construidos – Universidad Politécnica de Catalunya – España.
12. Eloy Bécares. Función de la vegetación y procesos de diseño de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal y flujo superficial – Universidad de León – España.
13. APHA, (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st Edition.

## **ANEXOS**

## ANEXO N° 01: PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 39 Selección de la grava y la macrófita



Figura 40 Instalación del sistema experimental en la primera etapa



Figura 41 Instalación del sistema experimental en la segunda etapa



*Figura 42 Sistema de distribución del afluente en las unidades experimentales*



*Figura 43 Bombeo del afluente hasta el tanque de almacenamiento*



*Figura 44 El arranque se llevó a cabo en función del crecimiento de las macrófitas*



Figura 45 Obtención de muestras para el análisis respectivo



Figura 46 Medición de pH y turbiedad



Figura 47 Medición de oxígeno disuelto



Figura 48 Inoculación de la muestra y titulación para medición de DBO<sub>5</sub>



Figura 49 Digestión y lectura de DQO



Figura 50 Observación de la capa biológica desarrollada en las unidades

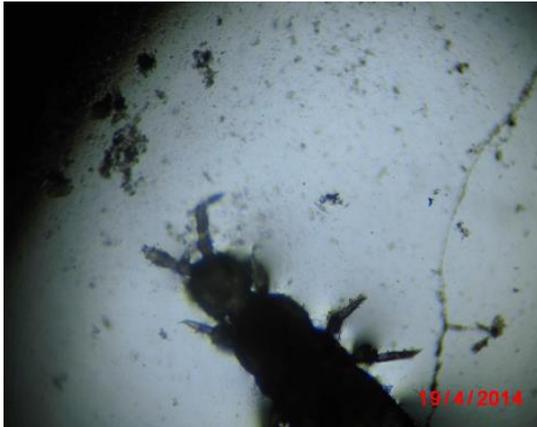


*Figura 51 Muestreo de la capa biológica para observación en microscopio*



*Figura 52 Desinstalación de las unidades experimentales*

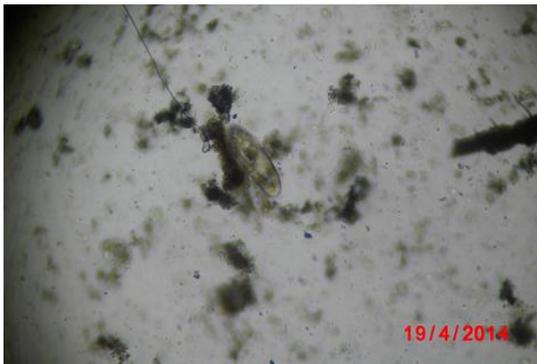
**ANEXO N° 02: MICROORGANISMOS OBSERVADOS EN LA CAPA BIOLÓGICA**



*Figura 54 Artrópodo (insecto que se introdujo en la muestra) podría ser una hormiga*



*Figura 53. Nemátodo de agua dulce o vida libre*



*Figura 55. Paramecium sp*



*Figura 56. No identificado*



*Figura 58. No identificado*



*Figura 57. Tejido vegetal*



*Figura 59. Tejido vegetal*



*Figura 60. Tejido vegetal*



*Figura 62. Tejido vegetal*



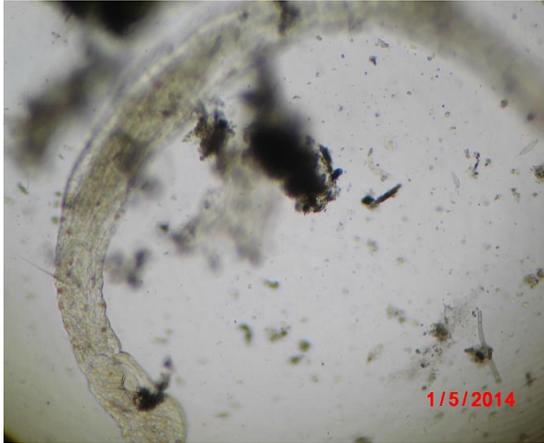
*Figura 61. Tejido vegetal*



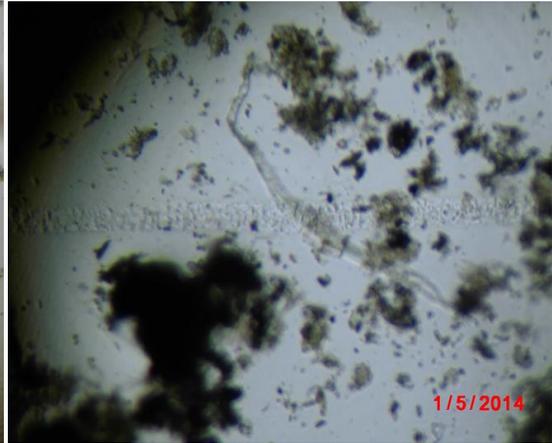
*Figura 63. No identificado*



*Figura 64. Nemátodo de vida libre*



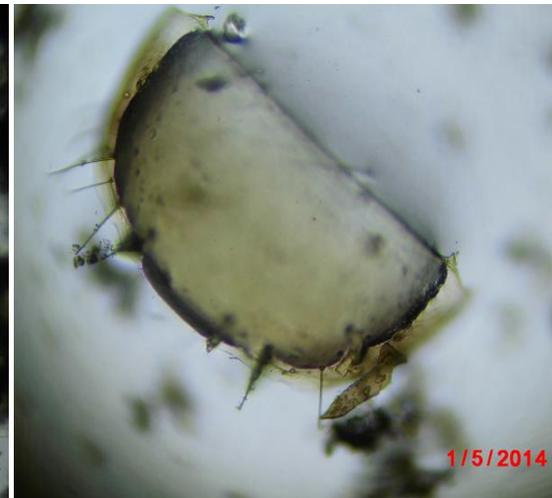
*Figura 65. Nemátodo de vida libre*



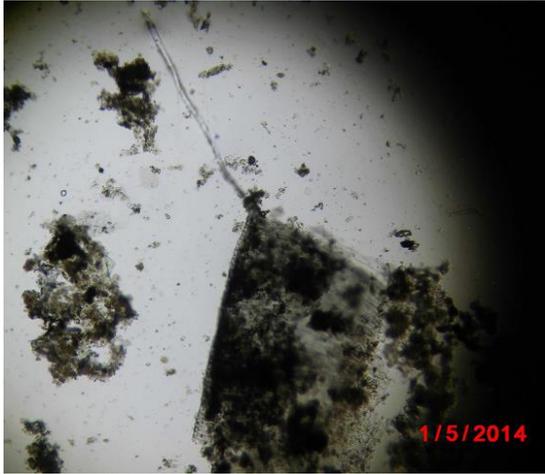
*Figura 66. No identificado*



*Figura 67. Nemátodo de vida libre*



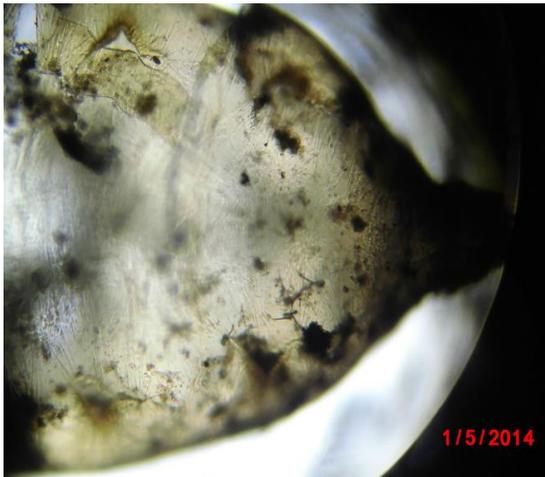
*Figura 68. Parte de un insecto*



*Figura 70. Parte de una cucaracha*



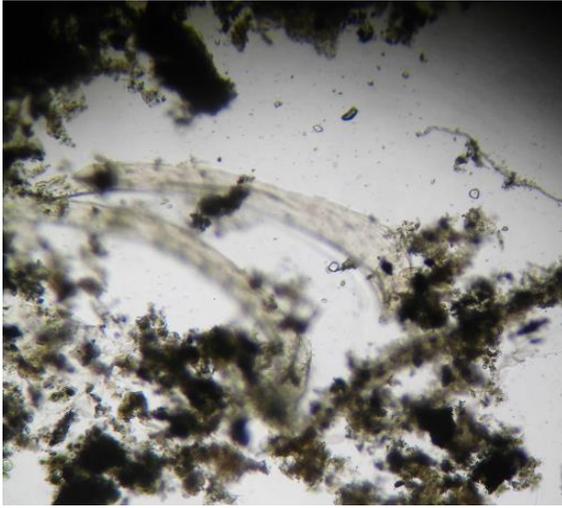
*Figura 69. Parte de un insecto*



*Figura 72. Parte de un insecto*



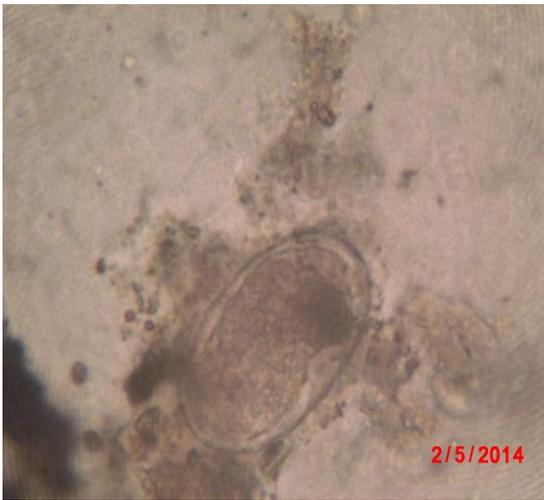
*Figura 71. No identificado*



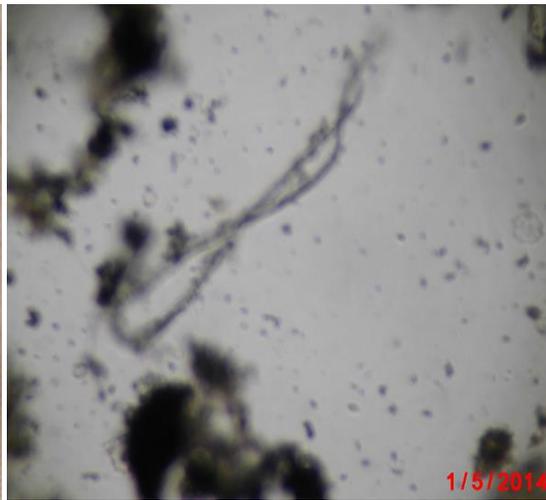
*Figura 73. Tejido vegetal*



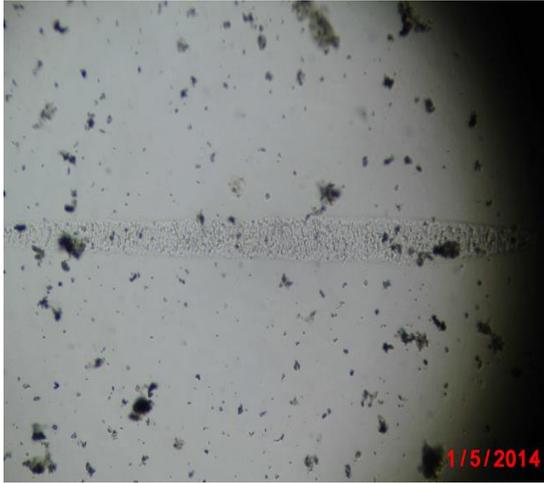
*Figura 74. Parte de un insecto*



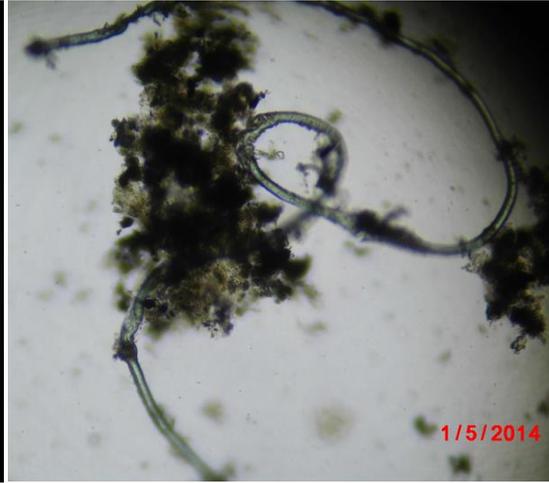
*Figura 75. Espora de alga*



*Figura 76. No identificado*



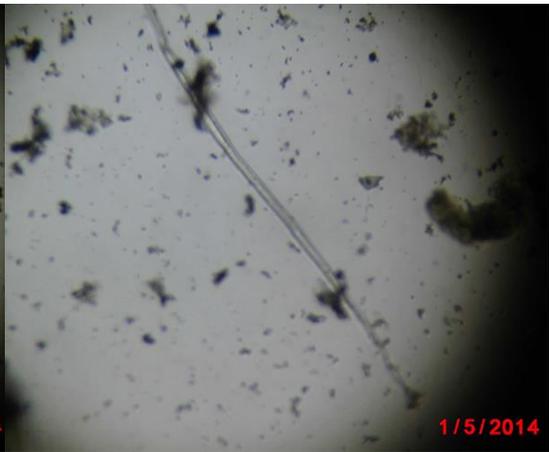
*Figura 78. No identificado*



*Figura 77. Tejido vegetal*



*Figura 80. Tejido vegetal*



*Figura 79. Tejido vegetal*