

# Evaluación de humedales artificiales pilotos de flujo horizontal y tipo superficial y subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales

## Pilot Assessment Flow Wetlands and Type Horizontal Surface and Subsurface for Wastewater Treatment

Recibido: 9 de octubre de 2013

Aprobado: 17 de enero de 2014

Para citar este artículo: F.J. A. Quintero, «Evaluación de humedales artificiales pilotos de flujo horizontal y tipo superficial y subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales», *Ingenium*, vol. 15, n.º 29, pp. 85-112, mayo, 2014.



Jesús A. Quintero Cardozo\*

## Resumen

Los humedales del medio natural desempeñan funciones en los ciclos hidrológicos y químicos, y como supermercados biológicos, en razón de las extensas redes alimentarias y la rica diversidad biológica que allí coexisten. La capacidad para promover sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos, puede ser utilizada en la construcción de humedales artificiales con el propósito de tratar las aguas residuales; estos logran el tratamiento a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacteriano, y son de dos tipos: los sistemas de flujo superficial (FWS) y los de flujo subsuperficial (SFS). El proyecto contempla la evaluación de cuatro humedales piloto, dos de tipo SFS, que consiste en canales o zanjas excavadas y rellenos de material granular, en donde el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie, estos generan unas biopelículas formando un lecho filtrante que acumula los compuestos que posteriormente son absorbidos por las plantas; y dos de tipo FWS donde se aplicó agua residual en forma continua y el tratamiento se produce durante

\* Ingeniero Ambiental y de Saneamiento. Director Ejecutivo de la Fundación Consultorio Ambiental Conciencia Verde, profesor Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ)

la circulación de esta a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente, con condiciones de diseño y climatología semejante; se utilizaron las especies vegetales, *Heliconia Psittacorum Lf* y *Lema Minor* respectivamente. El ensayo se desarrolló en las instalaciones del Centro de Investigación Santa Lucía (CISL), del Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ); es un estudio experimental, para dos tipos de tratamiento, cada uno con su tratamiento testigo con evaluaciones pretest - posttest. Contempla tres fases; Recopilación de información primaria y secundaria, incluyendo la caracterización inicial de las aguas a tratar; determinación de las especificaciones técnicas del modelo implementado, teniendo en cuenta la generación de biopelículas en el lecho filtrante de los SFS, la adaptación de las plantas vegetales y las condiciones hidráulicas; y la evaluación físico, química y biológica de las aguas residuales tratadas, determinando las correlaciones e identificando el sistema que ofrece mejores condiciones para el tratamiento de este tipo de agua.

### **Palabras clave**

Absorción, metabolismo, biopelícula, vegetación, climatología.

### **Abstract**

The natural wetlands serving on hydrological and chemical cycles, and as biological supermarkets, because of the extensive networks alimentary and the rich biodiversity that there coexist. The ability to promote effective nutrient sinks and dampers sites for organic and inorganic contaminants, can be used in the construction of artificial wetlands for the purpose of treating wastewater, they manage treatment through sedimentation, absorption and bacterial metabolism . And are of two types: surface flow systems (FWS) and subsurface flow (SFS ). The project provides for the evaluation of four pilot wetland two SFS type, which consists of channels or trenches and filled with granular material, wherein the water level remains below the surface, they generate a biofilm forming a filter bed accumulating the compounds which are then absorbed by plants and two FWS type where residual water was applied continuously , and the treatment occurs during this movement through the stems and roots of emergent vegetation , with conditions design and similar weather, plant species used, *Heliconia psittacorum* and *Lemna Minor* respectively. The trial was held at the premises of the Research Center Santa Lucia (CISL), the Graduate Institute of Peace (UNIPAZ) is an experimental study for two types of treatment, each with their assessments control treatment with pretest - posttest. Includes three phases; Gathering Primary and Secondary Information Including initial characterization of water to be treated, determine the technical specifications of the model implemented , taking into account the generation of biofilm in the filter bed of the SFS, the adaptation of plants vegetables and hydraulic conditions, and physical assessment, chemical and biological treated wastewater and identifying correlations determining the system that offers better conditions for the treatment of this type of water.

### **Keywords**

Absorption, metabolism, biofilm, vegetation, climatology.

## I. Introducción

Los humedales naturales están presentes en todos los continentes de la Tierra con excepción de la Antártida, existen en todos los climas, desde el trópico hasta la fría tundra. Cualquier estimación de la extensión total de los humedales naturales es difícil y depende principalmente de una precisa definición acerca del significado de humedal [1].

La importancia de los humedales ha variado con el tiempo. En el período carbonífero, es decir, hace 350 millones de años, cuando predominaban los ambientes pantanosos, los humedales produjeron y conservaron muchos combustibles fósiles (carbón y petróleo) de los que hoy dependemos; actualmente podemos observar su importancia como sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esta capacidad es el mecanismo detrás de los humedales artificiales para simular un humedal natural con el propósito de tratar las aguas residuales institucionales.

Los humedales artificiales construidos al inicio se desarrollaron observando la capacidad de tratamiento evidente de humedales naturales. Estudios sobre humedales (*wetlands*) construidos para tratamiento de aguas residuales institucionales se iniciaron en la década del cincuenta en el Instituto Max Planck en Alemania-USA. En los años noventa se vio un mayor incremento en el número de esos sistemas, aplicados para el tratamiento de agua residual municipal, agua industrial y residuos agrícolas. Autores como Kadlec Robert H. y Knight R. L. demuestran de manera efectiva el empleo de estos humedales para el tratamiento de aguas residuales institucionales.

Los humedales artificiales logran el tratamiento de las aguas residuales institucionales [2] a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacterial. Además, interactúan con la atmósfera. Los *wetlands* operan casi a velocidades de flujo y caudal constante y están sujetos a drásticos cambios de dbp, debido a los cambios en la temperatura del agua, por esta razón en zonas templadas estos sistemas de tratamiento tienden a variar su eficiencia durante el año [3].

Existen dos tipos de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de agua residual: sistemas de flujo libre (FWS) y sistemas de flujo subsuperficial (SFS). A los sistemas FWS se les aplica agua residual en forma continua y el tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de las raíces de la vegetación (macrófitas). Los sistemas de flujo subsuperficial SFS consisten en canales o zanjas excavadas y rellenos de material granular, generalmente grava o piedra de ríos, quebradas u otro cuerpo de agua lotico, en donde el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie.

El diseño piloto de los tipos de sistemas anteriormente descritos son los que contempla esta investigación desarrollada en el Centro de Investigación Santa Lucía (CISL), del Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ), con el fin de identificar la eficiencia de estos sistemas, manteniendo condiciones climáticas naturales y controlando caudales y concentraciones de los parámetros a evaluar (DBO, nitratos, nitritos, fosfatos, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, grasas y aceites y acidez) y proponer a la Univer-

sidad de la Paz un sistema de depuración de aguas residuales institucionales eficiente, económico y amigable con el ambiente, ya que a la fecha este no cuenta con planta de tratamiento de aguas residuales institucionales dato contemplado en la oficina de planeación del instituto universitario.

## **II. Metodología**

### **A. Tipo de estudio**

Es un estudio experimental, para dos tipos de tratamiento, cada uno con su tratamiento testigo con evaluaciones pretest - postest; es decir, se midieron las variables antes y después del tratamiento.

### **B. Materias primas y materiales**

El agua residual a tratar fue recolectada en el Centro de Investigación Santa Lucía (CISL) del Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ), localizado en la ciudad de Barrancabermeja, en la región central de Colombia, a orillas del río Magdalena, con una temperatura promedio de 28 grados centígrados y precipitación media anual de 2675 mm. El CISL del UNIPAZ tiene un área de 324 hectáreas, que se distribuyen en la zona de edificaciones y salones para las clases de tipo académico, laboratorios, zona de ganado y siembra de cultivos en los núcleos de producción.

En cuanto a materia y materiales requeridos para desarrollar la investigación se encuentra el agua residual procedente del lugar anteriormente mencionado, los elementos requeridos para el montaje de los pilotos, (tubos PVC, tanques, llaves de paso, estructura metálica, medidores) y los elementos requeridos para el análisis químico (nitritos, nitratos y fosfatos) del agua residual, para el análisis físico (pH, conductividad, temperatura, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y grasas y aceites) el multiparamétrico, y métodos de titulación y análisis biológico (DBO5).

### **C. Métodos de análisis**

Los parámetros físicos (sólidos totales suspendidos, sólidos sedimentables, grasas y aceites, conductividad, pH y temperatura) y biológicos (DBO5), fueron realizados en los laboratorios del CISL de la Universidad de la Paz.

Todos los análisis realizados se desarrollaron siguiendo los protocolos establecidos por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20 edition, 1998, APHA. AWWA, WEF (Métodos estándar para la examinación de aguas y aguas residuales institucionales, Edición 20, 1998) [4] y la establecida por la sección II Título E de la RAS 2000 [5].

### **D. Procedimiento**

La elaboración del diseño piloto de humedales artificiales con flujo superficial y flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales institucionales del CISL, UNIPAZ se realizó mediante las siguientes etapas:

**Fase I.** Recopilación de información primaria y secundaria; esta información se recolectó mediante la identificación de bibliografías pertinentes al objetivo de la investigación y visitas nacionales realizadas para conocer experiencias de los sistemas a investigar, como caso particular la Universidad Tecnológica de Pereira (*Pilotos de humedales de flujo subsuperficial*) y el Grupo Económico Magnetron en su sede principal ubicada en la Zona Franca del Eje Cafetero (*Sistema de tratamiento de aguas industriales a partir de humedales de flujo subsuperficial*).

**Fase II.** Cálculos y especificaciones técnicas de los modelos piloto para el sistema de tratamiento de aguas servidas del CISL, UNIPAZ; por medio de humedales artificiales.

**Modelo general de diseño.** Se aplicó la ecuación de los reactores de flujo de pistón utilizada por Lara Borrero, Jaime Andrés, 1999<sup>1</sup> [6].

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t}$$

**Fase III.** Evaluación del piloto de humedales artificiales referente a los parámetros físicos y biológicos para el tratamiento de aguas residuales institucionales.

### III. Hipótesis de la investigación

**Ho.** Los humedales pilotos presentan la misma eficiencia en el efluente en cuanto a parámetros físicos y biológicos.

**Ha.** No todos los humedales pilotos presentan la misma eficiencia en el efluente en cuanto a parámetros físicos y biológicos.

La evaluación se llevó a cabo mediante análisis estadístico que comprendió:

**Análisis univariado.** Se utilizó para caracterizar cada una de las variables cuantitativas de los tratamientos aplicados y a sus respectivos testigos dando seguimiento al periodo en días evaluado; realizando el análisis de medidas de tendencia central con la mediana y de posición con el rango intercuartílico.

Se realizaron gráficos de tendencia para la comparación de los tratamientos en los parámetros de control más determinantes: sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentados, DBO, grasas y aceites, nitritos, nitratos y fosfatos.

**Análisis bivariado.** Se aplicó la prueba no paramétrica para muestras dependientes o contraste no paramétrico de dos muestras relacionadas llamada prueba de la suma de rangos de Wilcoxon para la diferencia de medianas en los parámetros entre los tratamientos y entre las tres muestras diarias para los parámetros de control más importantes y mencionados en la sesión anterior. Este análisis se realizó para observar la diferencia entre los tratamientos y entre las muestras tomadas por día.

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Cataluña, Investigación diseño humedales artificiales. Enlace: [www.maslibertad.net/huerto/Humedales.pdf](http://www.maslibertad.net/huerto/Humedales.pdf)

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) no paramétrica, una Kruskal - wallis para dos o más factores, para medir el efecto individual y la prueba U mann - Whilthey para medir el efecto conjunto entre los tratamientos utilizando como variable independiente el tipo de humedal y variables dependientes los parámetros de control más determinantes.

Los resultados obtenidos del comportamiento de los tratamientos se analizaron mediante el software Excel y XLStat de circulación libre.

## IV. Prueba piloto

### Humedal de flujo subsuperficial. Humedales 1 y 2.

**Hidráulica.** El piloto posee un sistema hidráulico diseñado por la presente investigación que cumple especificaciones requeridas para evitar zonas sin actividad biológica, estancamiento hidráulico, de flujo pistón y con funcionalidad gravitacional para evitar el uso de energía; tiene controladores de caudal, medidores y/o aforadores, desagües o vertederos para evitar inundaciones, descarga de lodos y zonas muestrales, con el fin de poder controlar la hidráulica del sistema. Para llegar al actual diseño se debió probar con dos modelos.

**Modelo 1.** Diseño en material PVC, con llaves de paso plásticas, tanques plásticos, descarga del agua residual en el humedal con flauta dispersora en forma de U en PVC y aforadores (Modelo no funcional).



Figura 1. Flautas dispersoras en el modelo 1 para descarga del agua residual en el piloto humedales artificiales. Fuente: Quintero y García, 2012.



Figura 2. Modelo 1 de piloto de humedales artificiales. Fuente: Quintero y García, 2012.



**Modelo 2.** Diseño en material PVC, con llaves de paso plásticas y en aluminio (con mayor sensibilidad para control de fluidos), tanques plásticos, descarga del agua residual en el humedal con flauta dispersora de forma recta, paralela a la entrada del humedal en PVC y aforadores. (Modelo funcional).



Figura 3. Sistema del Modelo 2 para descarga del agua residual en el piloto humedales artificiales. Fuente: Quintero y García, 2012.

**Climatología.** Al ubicarse el piloto en espacio abierto, este estará expuesto a agentes climáticos naturales, tales como la precipitación y la luz solar, fenómenos representativos para esta investigación; de manera específica porque condicionan la capacidad de adaptación de las plantas vegetales a los sistemas y permite evaluar la reacción del sistema frente a esta clase de fenómenos naturales.

Altura sobre el nivel del mar	75.94 m.s.n.m
Precipitación	2500 mm(promedio a 10 años)
Humedad relativa	77 %
Temperatura	T. máxima 38°C T. mínima 21°C T. promedio 32°C
Brillo solar	6 horas/día
Nubosidad	Promedio 5 horas/mes
Evapotranspiración	4 mm/día en épocas críticas, promedio 6 mm
Vientos	1,8 m/s puede llegar a 2 m/s
Dirección de los vientos	Son vientos alisios que van de N a S

Cuadro 1. Climatología del Centro de Investigación Experimental Santa Lucía, Barrancabermeja 2012. Fuente: Plan de manejo ambiental Centro Experimental Santa Lucía.

**Especies vegetales.** En esta clase de humedal se implementaron dos especies de plantas de la misma familia.

- La Heliconia Bihai (sistema no funcional).
- La Heliconia Psittacorum Lf. (funcional para el sistema).

**Material.** El material usado como medio filtrante fue piedra de la quebrada la Gómez, ubicada en el municipio de Sabana de Torres, esta fue recolectada en su forma natural

y trasladada a las instalaciones de CISL, donde está el piloto. Se le hizo un lavado y se realizó granulometría para determinar las dimensiones de las piedras y poder ubicarlas en el humedal. El humedal posee una distribución por espesor, es decir; mientras se asciende en el humedal los niveles dimensionales aumentan. Al igual en las salidas y entradas del humedal la piedra es de mayor tamaño, con el fin de evitar taponamientos y posibles instrucciones en estos puntos.



Figura 4. Piedras de la quebrada La Gómez. Fuente: Quintero y García, 2012.

Para realizar la granulometría utilizamos el Ro-tap y los tamices de 1/4, 3/8, 1/2, 1, 1 1/2 y 2 pulgadas. Se saca una muestra representativa del material, se pesa, seguidamente se agrega a los tamices y el Ro-tap por acción de movimiento y gravedad distribuye la piedra según sea su diámetro.

**Volúmenes.** Para determinar el volumen de los materiales utilizados en el piloto, se tuvo en cuenta específicamente la capacidad volumétrica del humedal, dejando espacios de seguridad al momento de precipitaciones, resistencia del material con que está hecho el humedal y proporciones de los materiales a usar. En este punto también hubo modificaciones en el transcurso de la investigación, se desarrollaron dos modelos.

**Modelo 1.** Se desarrolló por capas de los materiales a usar. (Modelo no funcional).

Capa	Material	Volumen (m³)
1	Arena	0.0220
2	Piedra	0.0660
3	Abono	0.0220
4	Piedra	0.0367
<b>TOTAL</b>	-	<b>0.1467</b>

Tabla 1. Volúmenes de material utilizado para el montaje del modelo 1, humedal subsuperficial. Fuente: Autor.

**Modelo 2.** En este diseño solo se utilizó la piedra, se eliminaron las capas del diseño anterior, solo se aplicó alrededor de la raíz de las plántulas algunos gramos de abono y se distribuyó el material filtrante (piedra) de acuerdo a su tamaño. (Modelo funcional).



	Material	Volumen (m <sup>3</sup> )
1	Piedra	0.1321
2	Abono	0.0146
<b>TOTAL</b>	-	<b>0.1467</b>

Tabla 2. Volúmenes de material utilizado para el montaje del modelo 2, humedal subsuperficial.  
Fuente: Autor.

### Humedales de flujo superficial. Humedales 3 y 4.

**Hidráulica.** El piloto posee un sistema hidráulico diseñado por la presente investigación que cumple especificaciones requeridas para que el agua a tratar llegue de manera adecuada al humedal y sea distribuida en él; posee controladores de caudal, medidores y/o aforadores<sup>2</sup> [7], desagües o vertederos para evitar inundaciones, descarga de lodos y zonas muestrales, con el fin de poder controlar la hidráulica del sistema.

**Modelo.** Diseño en material PVC, con llaves de paso plásticas y en aluminio (más sensibles para control de fluidos), tanques plásticos, descarga del agua residual en el humedal de forma directa, paredes de retención del agua y aforadores. (ver figuras 3 y 5).



Figura 5. Descarga del agua residual en el piloto humedales artificiales de tipo superficial.  
Fuente: Quintero y García, 2012.

**Climatología.** Al ubicarse el piloto en espacio abierto, este estará expuesto a agentes climáticos naturales, tales como la precipitación y la luz solar, fenómenos representativos para esta investigación; de manera específica porque condicionan la capacidad de adaptación de las plantas vegetales a los sistemas y permite evaluar la reacción del sistema frente a esta clase de fenómenos naturales. El cuadro 1 describe las condiciones climatológicas de la zona donde se realizó la investigación.

<sup>2</sup> Laboratorio de control ambiental. Medición de caudales. Enlace: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7599/2/122851.pdf>

**Especie vegetal.** En esta clase de humedal se implementó la *Lemna minor L*, con su respectivo testigo. La *Lemna minor* es una macrófita<sup>3</sup> [8] flotante que se reproduce de manera adecuada en nuestra región.

**Volúmenes.** Para determinar el volumen que se puede mantener en los humedales se tuvo en cuenta la capacidad volumétrica del humedal, dejando espacios de seguridad al momento de precipitaciones, resistencia del material con que está hecho el humedal y resistencia del material de las paredes que dividen el humedal.

**Modelo.** Se dividió el humedal en tres secciones, cada sección con la capacidad de almacenar un volumen específico. (Ver figura 6).

Sección	Volumen (m <sup>3</sup> )
1	0.0448
2	0.0285
3	0.0067
<b>TOTAL</b>	<b>0.0800</b>

Cuadro 2. Volúmenes de almacenamiento de agua por secciones, humedal superficial.



Figura 6. Secciones de los humedales superficiales. Fuente: Quintero y García, 2012.

## V. Resultados

### Cálculo matemático y especificaciones técnicas de los pilotos

**Humedales de flujo subsuperficial.** La ley de Darcy explica el funcionamiento físico de estos sistemas, ya que describe el régimen de flujo en un medio poroso que es lo generalmente aceptado para el diseño de este tipo de humedales, y con base en ella se determinan los parámetros específicos de diseño.

**Humedal de flujo subsuperficial 1, plantación de *Heliconia Psittacorum*.** Presenta las siguientes características.

<sup>3</sup> Universidad del Valle – La Paz. Uso de macrófitas para el tratamiento de aguas residuales. Enlace: [www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S2075-89362010000300013&script=sci\\_arttext](http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S2075-89362010000300013&script=sci_arttext)

**Diseño del humedal.** Se utilizó un software aplicativo desarrollado en Microsoft Excel por esta investigación, con base en el diseño matemático elaborado por el Dr. Lara.

Fórmula general para reactores de flujo pistón		
Base teórica $\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_r t}$	Símbolo	Valor
DBO Salida del efluente, mg/l	Ce	8.0000
DBO Entrada del efluente, mg/l	Co	65.0000
Velocidad de reacción (adimensional)	Kr	1.7532
Tiempo de retención, d	t	1.5970
Número de Euler	e	2.7183
Largo del humedal, m	L	0.8500
Ancho del humedal, m	W	0.5500
Profundidad del humedal, m	y	0.2000
Porosidad (% expresado en decimales)	$f_j$	0.3500
Caudal medio a través del humedal, m <sup>3</sup> .d	Q	0.0205
Área superficial del humedal, m <sup>2</sup>	As	0.4675
Temperatura media de la zona, °C	T	28.0000
Pendiente del fondo del lecho, m	m	0.0117

Cuadro 3. Diseño general humedal de flujo subsuperficial 1. (Plantación *Heliconia Psittacorum Lf.*).  
Fuente: Autor.

Las dimensiones de los humedales y algunas variables de diseño como la pendiente, caudales y porosidad determinan el funcionamiento de los pilotos, importante para esta investigación obtener el número de Reynolds menor a 10, como lo muestra el cuadro 3, ya que se ratifica que el flujo que pasa a través del humedal es de régimen Laminar, por lo tanto es correcto utilizar las fórmulas expuestas en la ley de Darcy determinar las demás variables.

Humedal de flujo subsuperficial 1. PLANTACIÓN <i>Heliconia Psittacorum</i>		
La ley de Darcy		
	Símbolo	
Velocidad del flujo a través del humedal, m/s	V	0.1863
Conductividad hidráulica, m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d	Ks	67.6671
Gradiente hidráulico, m/m	S	0.0028
Caudal medio a través del humedal, m <sup>3</sup> .d	Q	0.0205
Área de la sección transversal perpendicular al flujo, m <sup>2</sup>	Ac	0.1100
Largo del humedal, m	L	0.8500
Ancho del humedal, m	W	0.5500
Área superficial del humedal, m <sup>2</sup>	As	0.4675
Profundidad del humedal, m	Y	0.2000

Esta tabla continúa en la siguiente página →

Humedal de flujo subsuperficial 1. PLANTACIÓN Heliconia Psittacorum		
La ley de Darcy		
	Símbolo	
Pendiente del fondo del lecho, m	M	0.0117
Número de Reynolds	NR	0.0355
Porosidad (% expresado en decimales)	fj	0.3600
Tiempo de retención, d	T	1.6427
Diámetro de los vacíos del medio, m	D 10	0.1600
Viscosidad cinemática x 10 <sup>-6</sup> , m <sup>2</sup> /s	τ	0.8400
Organic Loading Rate (Este número indicará la masa de bod por área por día que el sistema recibirá) (g bod/m <sup>2</sup> -día)	Lorg	2.8490

Cuadro 4. Parámetros y dimensiones del humedal subsuperficial 1, plantación Heliconia Psittacorum Lf. Fuente: Autor.

### Humedal de flujo subsuperficial 2, Testigo

**Diseño del humedal.** Se utilizó un software aplicativo en Microsoft Excel desarrollado por esta investigación, con base en el diseño matemático elaborado por el Dr. Lara.

Fórmula general para reactores de flujo pistón		
Base teórica $\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_r t}$	Símbolo	Valor
DBO Salida del efluente, mg/l	Ce	25.0000
DBO Entrada del efluente, mg/l	Co	65.0000
Velocidad de reacción (adimensional)	Kr	1.7532
Tiempo de retención, d	T	1.5502
Número de Euler	e	2.7183
Largo del humedal, m	L	0.8500
Ancho del humedal, m	W	0.5500
Profundidad del humedal, m	Y	0.2000
Porosidad (% expresado en decimales)	fj	0.3500
Caudal medio a través del humedal, m <sup>3</sup> .d	Q	0.0211
Área superficial del humedal, m <sup>2</sup>	As	0.4675
Temperatura media de la zona, °C	T	28.0000
Pendiente del fondo del lecho, m	M	0.0117

Cuadro 5. Diseño general humedal de flujo subsuperficial 2. Testigo. Fuente: Autor.

Las dimensiones de los humedales y algunas variables de diseño como la pendiente, caudales y porosidad determinan el funcionamiento de los sistemas, importante para esta investigación obtener el número de Reynolds menor a 10, ya que se ratifica que el flujo que pasa a través del humedal es de régimen laminar, por lo tanto, es correcto utilizar las fórmulas expuestas en la ley de Darcy determinar las demás variables.

Humedal de flujo subsuperficial 2. TESTIGO		
La ley de Darcy		
	Símbolo	
Velocidad del flujo a través del humedal, m/s	V	0.1919
Conductividad hidráulica, m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d	Ks	69.7106
Gradiente hidráulico, m/m	S	0.0028
Caudal medio a través del humedal, m <sup>3</sup> .d	Q	0.0211
Área de la sección transversal perpendicular al flujo, m <sup>2</sup>	Ac	0.1100
Largo del humedal, m	L	0.8500
Ancho del humedal, m	W	0.5500
Área superficial del humedal, m <sup>2</sup>	As	0.4675
Profundidad del humedal, m	Y	0.2000
Pendiente del fondo del lecho, m	M	0.0117
Número de Reynolds	NR	0.0366
Porosidad (% expresado en decimales)	fj	0.3600
Tiempo de retención, d	T	1.5945
Diámetro de los vacíos del medio, m	D 10	0.1600
Viscosidad cinemática x 10 <sup>-6</sup> , m <sup>2</sup> /s	τ	0.8400
Organic Loading Rate (Este número indicará la masa de BOD por área por día que el sistema recibirá) (g BOD/m <sup>2</sup> -día)	Lorg	2.93

Cuadro 6. Cálculos y dimensiones del humedal subsuperficial 2, Testigo. Fuente: Autor.

## Humedales de flujo superficial

### Humedal de flujo superficial 3, Testigo

**Diseño del humedal.** Se utilizó un software aplicativo desarrollado en Microsoft Excel por esta investigación, con base en el diseño matemático elaborado por el Dr. Lara.

Fórmula general para reactores de flujo pistón		
Base teórica $\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t}$	Símbolo	Valor
DBO Salida del efluente, mg/l	Ce	50.0000
DBO Entrada del efluente, mg/l	Co	65.0000
Velocidad de reacción (adimensional)	Kr	1.7532
Tiempo de retención, d	t	1.5886
Número de Euler	e	2.7183
Largo del humedal, m	L	0.8500
Ancho del humedal, m	W	0.5500
Profundidad del humedal, m	y	0.2000
Porosidad (% expresado en decimales)	fj	0.3500

Esta tabla continúa en la siguiente página →

Fórmula general para reactores de flujo pistón		
Base teórica $\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t}$	Símbolo	Valor
Caudal medio a través del humedal, m <sup>3</sup> .d	Q	0.0206
Área superficial del humedal, m <sup>2</sup>	As	0.4675
Temperatura media de la Zona, °C	T	28.0000
Pendiente del fondo del Lecho, m	M	0.0117

Cuadro 7. Diseño general humedal de flujo superficial 3, Testigo. Fuente: Autor.

La ecuación de Manning es la adecuada para la explicación física de estos sistemas, ya que define el flujo en canales abiertos que es lo generalmente aceptado para el diseño de este tipo de humedales, y con base en ella se determinan los parámetros específicos de diseño.

Humedal de flujo libre o superficial 3. TESTIGO		
Ecuación de Manning		
	Símbolo	
Velocidad del flujo a través del humedal, m/s	V	0.0020
Coefficiente de Manning	N	8.9443
Profundidad del humedal, m	Y	0.2000
Gradiente hidráulico, m/m	S	0.0028
Caudal medio a través del humedal, m <sup>3</sup> .d	Q	0.0206
Ancho del humedal, m	W	0.5500
Área superficial del humedal, m <sup>2</sup>	As	0.4675
Pendiente del fondo del lecho, m	m	0.0117
Largo del humedal, m	L	0.8500
Factor de resistencia, s.m <sup>1/6</sup>	a	4.0000
Porosidad (% , Expresado en decimales)	fj	0.3000
Velocidad del flujo a través del humedal, m/s	v	0.1873
Ancho del humedal, m	W	0.5500
Gradiente hidráulico, m/m	s	0.0028
Largo del humedal, m	L	0.8500
Tiempo de retención, d	t	1.3617

Cuadro 8. Cálculos y dimensiones del humedal superficial 3, Testigo. Fuente: Autor.

#### Humedal de flujo superficial 4, plantación de *Lenma minor*

**Diseño del humedal.** Se utilizó un software aplicativo elaborado en Microsoft Excel por esta investigación, con base en el diseño matemático elaborado por el Dr. Lara.



Fórmula general para reactores de flujo pistón		
Base teórica $\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_r t}$	Símbolo	Valor
DBO Salida del efluente, mg/l	Ce	7.0000
DBO Entrada del efluente, mg/l	Co	65.0000
Velocidad de reacción (adimensional)	Kr	1.7532
Tiempo de Retención, d	T	1.5684
Numero de Euler	e	2.7183
Largo del humedal, m	L	0.8500
Ancho del humedal, m	W	0.5500
Profundidad del humedal, m	Y	0.2000
Porosidad (% expresado en decimales)	fj	0.3500
Caudal medio a través del humedal, m <sup>3</sup> .d	Q	0.0209
Caudal de salida del humedal, m <sup>3</sup> .d	Qe	0.0211
Caudal de entrada del humedal, m <sup>3</sup> .d	Qo	0.0211
Área superficial del humedal, m <sup>2</sup>	As	0.4675
Temperatura media de la zona, °C	T	28.0000
Pendiente del fondo del Lecho, m	M	0.0117

Cuadro 9. Diseño general humedal de flujo superficial 4, Plantación Lenma minor. Fuente: Autor.

La ecuación de Manning es la adecuada para la explicación física de estos sistemas, ya que define el flujo en canales abiertos que es lo generalmente aceptado para el diseño de este tipo de humedales, y con base en ella se determinan los parámetros específicos de diseño.

Humedal de flujo libre o superficial 4. PLANTACIÓN Lemna minor		
La ecuación de Manning		
	Símbolo	
Velocidad del flujo a través del humedal, m/s	V	0.0020
Coefficiente de Manning	N	8.9443
Profundidad del humedal, m	Y	0.2000
Gradiente hidráulico, m/m	S	0.0028
Caudal medio a través del humedal, m <sup>3</sup> .d	Q	0.0209
Ancho del humedal, m	W	0.5500
Área superficial del humedal, m <sup>2</sup>	As	0.4675
Pendiente del fondo del lecho, m	M	0.0117
Largo del humedal, m	L	0.8500
Factor de resistencia, s.m <sup>1/6</sup>	A	4.0000
Porosidad (% expresado en decimales)	fj	0.3000
Velocidad del flujo a través del humedal, m/s	V	0.1897
Ancho del humedal, m	W	0.5500
Gradiente hidráulico, m/m	S	0.0028
Largo del humedal, m	L	0.8500
Tiempo de retención, d	T	1.3443

Cuadro 10. Cálculos y dimensiones del humedal superficial 4, Plantación Lenma minor. Fuente: Autor.

## Evaluación del piloto de humedales artificiales

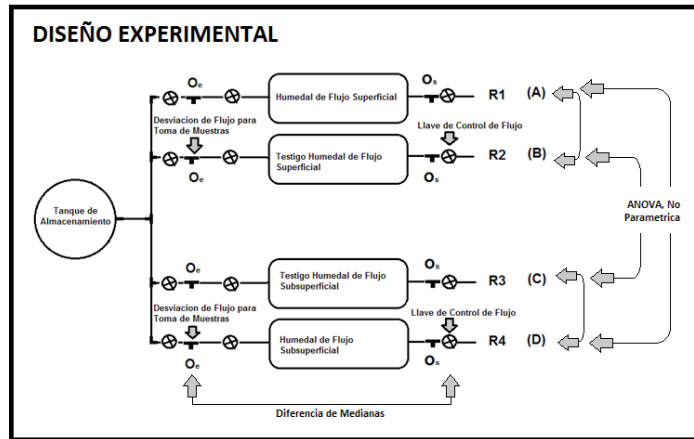


Figura 7. Diagrama de flujo experimental. Fuente: Autor.

VARIABLES NO CONTROLADAS	VARIABLES DE CONTROL	VARIABLES RESPUESTA
Condiciones ambientales	Concentraciones del agua residual institucional Caudales de entrada a los humedales Alturas de lamina Tipo de vegetación	Remoción Sólidos suspendidos totales sólidos sedimentables grasa y aceites DBO5

Cuadro 11. Variables influentes en la investigación. Fuente: Autor.

### Análisis estadístico univariado

**Características del agua residual del pozo de captación.** Las concentraciones y cargas de las variables físicas y biológicas del agua son combinadas, presentan concentraciones orgánicas e inorgánicas que permanecen similares en el tiempo, de acuerdo a lo anterior, este pozo fue el seleccionado para captar el agua residual institucional requerida para la investigación.

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR
pH		5.50 – 6.00
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	57.66
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	26 – 28
dbo5	mg O <sub>2</sub> /L	190
Grasas y aceites	mg/L	0.52
Sólidos suspendidos	mg/L	298
Sólidos sedimentables	ml/L	1.83

Cuadro 12. Caracterización física y biológica del agua residual descargada en el pozo séptico del CISL y que será empleada en la Investigación. Fuente: Autor.

**Análisis de medias, medianas y rangos intercuartílicos de los humedales por parámetros.** El cuadro 13. Contempla los valores de las concentraciones descriptivas por parámetros físicos y biológicos medidos en el afluente y el efluente y genera las medias, medianas y rangos intercuartílicos.

Parámetro	Medición	Media	Mediana	Cuartil	
				Q1	Q3
pH	Inicial	5.82	5.82	5.72	5.95
	Salida TT01	6.23	6.18	6.15	6.27
	Salida TT02	6.53	6.55	6.37	6.69
	Salida TT03	6.96	6.91	6.75	7.08
	Salida TT04	6.69	6.76	6.62	6.82
Conductividad	Inicial	53.83	53.83	51.33	56.33
	Salida TT01	16.96	16.50	13.50	20.16
	Salida TT02	15.23	14.67	14.25	16.41
	Salida TT03	20,77	19	18,17	25,08
	Salida TT04	17.13	16,67	12,83	20,33
Temperatura	Inicial	26.94	26.39	26.00	28.04
	Salida TT01	27.53	27.27	26.27	28.38
	Salida TT02	29.47	30.53	27.12	31.31
	Salida TT03	28.34	28.10	26.68	30.29
	Salida TT04	26.82	26.90	25.52	28.25
Solidos suspendidos totales	Inicial	244.0	244.0	218.00	270.00
	Salida TT01	18.30	16.80	14.81	23.67
	Salida TT02	20.69	17.08	12.97	31.04
	Salida TT03	19.58	18.88	15.82	25.21
	Salida TT04	13.99	13.75	11.55	15.60
Solidos sedimentables	Inicial	0.94	0.94	0.88	1.00
	Salida TT01	0.04	0.05	0.03	0.06
	Salida TT02	0.04	0.04	0.03	0.05
	Salida TT03	0.05	0.06	0.04	0.07
	Salida TT04	0.03	0.04	0.01	0.04
Grasas y aceites	Inicial	0.27	0.27	0.25	0.28
	Salida TT01	0.02	0.01	0.01	0.02
	Salida TT02	0.04	0.04	0.03	0.04
	Salida TT03	0.09	0.09	0.08	0.09
	Salida TT04	0.01	0.01	0.01	0.01
DBO5	Inicial	65.00	65.00	65.00	65.00
	Salida TT01	8.00	8.00	8.00	8.00
	Salida TT02	25.00	25.00	25.00	25.00
	Salida TT03	50.00	50.00	50.00	50.00
	Salida TT04	6.00	6.00	6.00	6.00

Cuadro 13. Concentraciones descriptivas parámetros físicos y químicos por humedal piloto, afluentes-efluentes, Centro de Investigación Santa Lucía, Barrancabermeja 2012. Fuente: Autor.

**Análisis comparativo y descriptivo para los parámetros.** La comparación se desarrolló mediante el uso de diagramas, que nos permite identificar las variaciones de cada sistema en relación con los parámetros medidos.

- pH.** La figura 33 muestra los niveles del pH del afluente y efluente de cada uno de los humedales piloto; denota que todos los niveles de pH aumentaron acercando su valor a un estado más neutro.

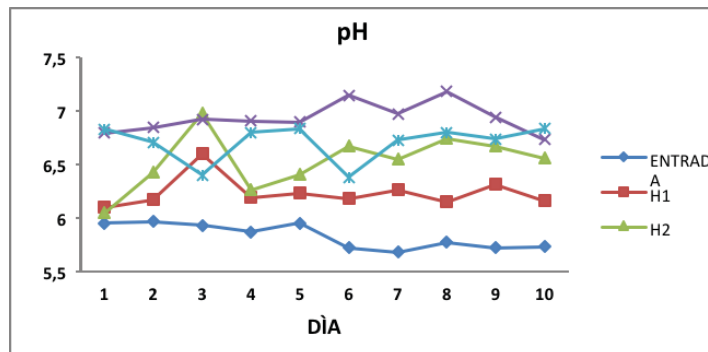


Figura 8. Análisis comparativo y descriptivo del pH. Fuente: Autor.

- Conductividad.** La figura 9 denota los valores obtenidos en la medición de la conductividad en el tiempo estudio. Los valores del efluente en todos los humedales piloto están por debajo del valor del afluente, lo que indica que en todos los sistemas evaluados hubo disminución de esta variable.

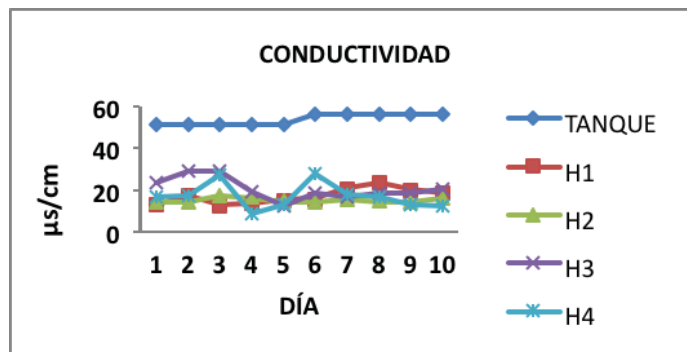


Figura 9. Análisis comparativo y descriptivo de la conductividad. Fuente: Autor.

- Temperatura.** La figura 10, presenta los valores obtenidos en el tiempo de estudio. La comparación entre pilotos está demarcada por la capacidad de retener energía en forma de calor y de la vegetación.

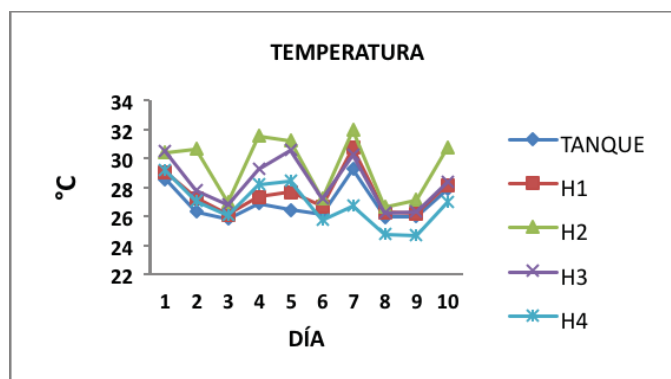


Figura 10. Análisis comparativo y descriptivo de la temperatura. Fuente: Autor.

- **Sólidos suspendidos totales.** La figura 11, describe los resultados obtenidos de sólidos suspendidos en la investigación, los valores medidos del efluente estuvieron por debajo de los valores del afluente, se debe a dos factores, el primero el tanque de sedimentación inicial y a la función sedimentadora de los sistemas, sobre todo en el sistema de flujo subsuperficial.

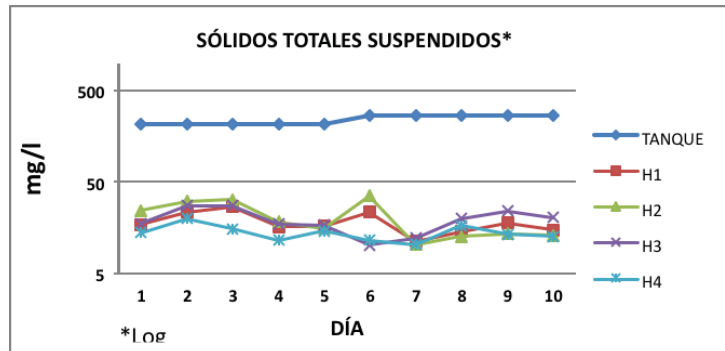


Figura 11. Análisis comparativo y descriptivo de los sólidos suspendidos totales. Fuente: Autor.

- **Sólidos sedimentables.** La figura 12, representa los valores que arrojó la investigación con base en los sólidos sedimentables, se observa el grado de remoción de esta variable en todos los pilotos.

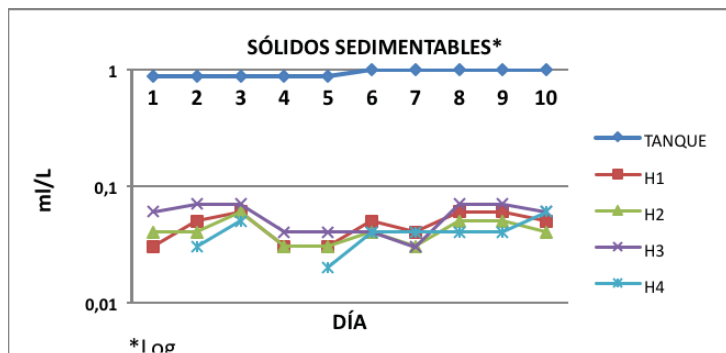


Figura 12. Análisis comparativo y descriptivo de los sólidos sedimentables. Fuente: Autor.

- **Grasas y aceites.** El comportamiento de esta variable en el tiempo estudio fue muy marcada, la figura 13 contempla los datos.

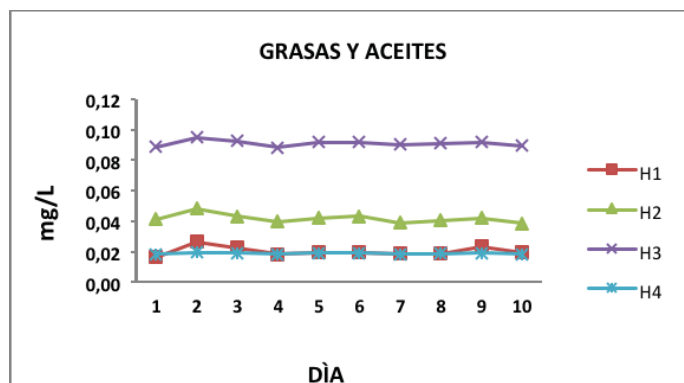


Figura 13. Análisis comparativo y descriptivo de las grasas y aceites. Fuente: Autor.

- Demanda biológica de oxígeno.** La DBO marca tendencia y agudiza las diferencias entre los pilotos; en H1 y H2 los porcentajes de remoción son variados, H1 obtuvo remociones de 87.7% y H2 de 38.5% lo que indica una diferencia bastante marcada en este parámetro biológico; en H3 y H4 la diferencia es más marcada H3 obtuvo remoción de 23.1% y H4 de 90.8%. (ver figura 14).

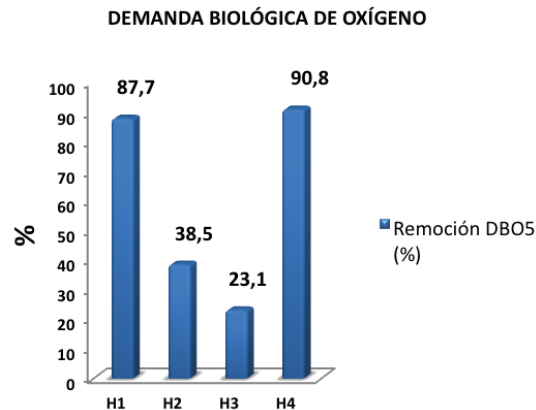


Figura 14. Análisis comparativo y descriptivo de la demanda biológica de oxígeno, DBO5 Fuente: Autor.

**Análisis bivariado.** Permite comparar a cada una de las variables independientes con la dependiente, por separado.

**Prueba de Wilcoxon.** Esta prueba arrojará un valor de resultado (valor de U) que si corresponde a una  $p < 0,05$ , indica que solo en el 5 % de las mediciones, las variaciones de los pilotos en los grupos citados se deben al azar, lo cual es significativo para la investigación. En este caso concluiríamos que los pilotos influenciaron benéficamente en la remoción de los contaminantes del agua residual.

Los valores de p fueron menores de 0.05 en todas las variables medidas, lo que indica que es tratamiento ofrecido en el humedal 1 influenció de manera benéfica a la remoción de los parámetros en estudio. Cuadro 14.

Parámetro	Rango promedio	Suma de rangos	Valor p*
pH H1 Sal.- pH H1 Ent.	Rangos negativos	,00	
	Rangos positivos	5,50	0.005
Conductividad H1 Sal.- Conductividad ccA1	Rangos negativos	5,50	0.005
	Rangos positivos	,00	
Temperatura H1 Sal.- Temperatura H1 Ent.	Rangos negativos	,00	0.005
	Rangos positivos	5,50	
Sólidos suspendidos H1 Sal.- Sólidos suspendidos H1 Ent.	Rangos negativos	5,50	0.005
	Rangos positivos	,00	
Sólidos sedimentables H1 Sal.- Sólidos sedimentables H1 Ent.	Rangos negativos	5,50	0.005
	Rangos positivos	,00	
Grasas y aceites H1 Sal. Grasas y aceites H1 Ent.	Rangos negativos	5,50	0.005
	Rangos positivos	,00	

\*Significativa  $p < 0.05$

Cuadro 14. Prueba de Wilcoxon para parámetros humedal 1.



En el humedal piloto 2 las variables medidas arrojan que todos los parámetros presentan rangos de influencia benéfica para la remoción de contaminantes pues el valor de p es menor de 0.05. Cuadro 14.

Parámetros		Rango promedio	Suma de rangos	Valor p*
pH H2 Sal. - pH H2 Ent.	Rangos negativos	,00	,00	
	Rangos positivos	5,50	55,00	0.005
Conductividad H2 Sal. - Conductividad H2 Ent	Rangos negativos	5,50	55,00	
	Rangos positivos	,00	,00	0.005
Temperatura H2 Sal. - Temperatura H2 Ent.	Rangos negativos	,00	,00	
	Rangos positivos	5,50	55,00	0.005
Sólidos suspendidos H2 Sal. Sólidos suspendidos H2 Ent	Rangos negativos	5,50	55,00	
	Rangos positivos	,00	,00	0.005
Sólidos sedimentables H2 Sal. Sólidos sedimentables H2 Ent	Rangos negativos	5,50	55,00	
	Rangos positivos	,00	,00	0.005
Grasas y aceites H2 Sal. - Grasas y aceites H2 Ent	Rangos negativos	5,50	55,00	
	Rangos positivos	,00	,00	0.005

\*Significativa  $p < 0.05$

Cuadro 14. Prueba de Wilcoxon para parámetros Humedal 2.

En el humedal piloto 3 la prueba de Wilcoxon arroja que en todas las variables medidas influyen significativamente en la eficiencia del sistema, Los valores de p se mantienen por debajo de 0.05. Cuadro 15.

Parámetros		Rango promedio	Suma de rangos	Valor P*
pH H3 Sal. - pH H3 Ent	Rangos negativos	,00	,00	
	Rangos positivos	5,50	55,00	0.005
conductividad H3 Sal. - conductividad H3 Ent	Rangos negativos	5,50	55,00	
	Rangos positivos	,00	,00	0.005
Temperatura H3 Sal. - Temperatura H3 Ent	Rangos negativos	,00	,00	
	Rangos positivos	5,50	55,00	0.005
Sólidos suspendidos H3 Sal. - Sólidos suspendidos H3 Ent	Rangos negativos	5,50	55,00	
	Rangos positivos	,00	,00	0.005
Sólidos sedimentables H3 Sal. - Sólidos sedimentables H3 Ent	Rangos negativos	5,50	55,00	
	Rangos positivos	,00	,00	0.005
Grasas y aceites H3 Sal. - Grasas y aceites H3 Ent	Rangos negativos	5,50	55,00	
	Rangos positivos	,00	,00	0.005

\*Significativa  $p < 0.05$

Cuadro 15. Prueba de Wilcoxon para parámetros Humedal 3.

El piloto 4 presenta en la prueba de Wilcoxon valores significativos en la mayoría de las variables, con excepción de la variable temperatura en donde no hay una diferencia

significativa entre el afluente y el efluente, en las otras variables el valor p, permanece menos de 0.05. Cuadro 16.

Parámetro	Rango promedio	Suma de rangos	Valor P*
pH H4 Sal. - pH H4 Ent	Rangos negativos	,00	
	Rangos positivos	5,50	0.005
Conductividad H4 Sal. - Conductividad H4 Ent	Rangos negativos	5,50	
	Rangos positivos	,00	0.005
Temperatura H4 Sal. - Temperatura H4 Ent	Rangos negativos	6,00	
	Rangos positivos	5,00	0.79
Sólidos suspendidos H4 Sal. - Sólidos suspendidos H4 Ent	Rangos negativos	5,50	
	Rangos positivos	,00	0.005
Sólidos sedimentables H4 Sal. - Sólidos sedimentables H4 Ent	Rangos negativos	5,50	
	Rangos positivos	,00	0.005
Grasas y aceites H4 Sal. - Grasas y aceites H4 Ent	Rangos negativos	5,50	
	Rangos positivos	,00	0.005

\*Significativa  $p < 0.05$

Cuadro 16. Prueba de Wilcoxon para parámetros Humedal 4.

### Valoración diferencial para los 4 tipos de humedales según los parámetros evaluados

Dado que los tratamientos no cumplen con el supuesto de normalidad y de homogeneidad de varianzas, se realizó el análisis de varianza no paramétrico o prueba de Kruskal-Wallis para encontrar las diferencias entre los diferentes tratamientos, siendo esta variable la independiente.

Al comparar las medianas de los tratamientos a nivel de todos los parámetros en la toma efluente, se observa evidencia estadística en que los resultados obtenidos por los cuatro tratamientos son diferentes, excepto para el parámetro sólidos suspendidos. Cuadro 17.

Parámetros efluentes	pH	Conductividad	Temperatura	Sólidos suspendidos	Sólidos Sedimentados	Grasas
Chi-cuadrado	26,687	8,187	8,968	6,003	7,927	33,841
Gl	3	3	3	3	3	3
Sig. asintót.	,000*	,042*	,030*	,111*	,048*	,000*

Variable de agrupación: Tipo de tratamiento

\* $p < 0.05$  significativo

Cuadro 17. Prueba de Kruskal-Wallis parámetros medidos en cuatro tipos de humedales, en el Centro de Investigación Santa Lucía, Barrancabermeja, 2012

Al observar entre qué grupo de humedales se encuentran las diferencias halladas en la prueba Kruskal-Wallis, se realizó la prueba U de Mann Whitney comparando por pares de tratamiento, obteniendo así seis combinaciones: humedales 1 y 2, humedales 1 y 3, humedales 1 y 4, humedales 2 y 3, humedales 2 y 4, humedales 3 y 4.

Entre los humedales 1 y 2 se encontró diferencia significativa para los parámetros pH, temperatura y grasas, siendo más eficiente el humedal 1 para estos parámetros Tabla 3.

	Humedal	N	Rango promedio	Suma de rangos	U de Mann-Whitney	Valor p*
pH	1	10	7,15	71,50		
	2	10	13,85	138,50	16,50	0,011
	Total	20				
Conductividad	1	10	11,65	116,50		
	2	10	9,35	93,50	38,50	0,384
	Total	20				
Temperatura	1	10	8,00	80,00		
	2	10	13,00	130,00	25,00	0,059
	Total	20				
Sólidos suspendidos	1	10	10,30	103,00		
	2	10	10,70	107,00	48,00	0,880
	Total	20				
Sólidos sedimentados	1	10	11,70	117,00		
	2	10	9,30	93,00	38,00	0,348
	Total	20				
Grasas	1	10	5,50	55,00		
	2	10	15,50	155,00	0,00	0,000
	Total	20				

\*P &lt; 0,05 significativo

Tabla 3. Comparación de medianas humedales 1 y 2, Centro Investigación Santa Lucía, Barrancabermeja 2012.

Entre los humedales 1 y 3 se presentó diferencia significativa para los parámetros pH y grasas, siendo más eficiente el humedal 1. Tabla 4.

	Humedal	N	Rango promedio	Suma de rangos	U de Mann-Whitney	Valor de p*
pH	1	10	5,50	55,00		
	3	10	15,50	155,00	0,000	0,000
	Total	20				
Conductividad	1	10	8,25	82,50		
	3	10	12,75	127,50	27,500	0,089
	Total	20				
Temperatura	1	10	9,00	90,00		
	3	10	12,00	120,00	35,000	0,280
	Total	20				
Sólidos suspendidos	1	10	9,40	94,00		
	3	10	11,60	116,00	39,000	0,436
	Total	20				
Sólidos sedimentables	1	10	8,60	86,00		
	3	10	12,40	124,00	31,000	0,165
	Total	20				
Grasas y aceites	1	10	15,50	155,00		
	3	10	5,50	55,00	0,000	0,000
	Total	20				

Tabla 4. Comparación de medianas humedales 1 y 3, Centro Investigación Santa Lucía, Barrancabermeja 2012.

Entre los humedales 1 y 4 se encontró diferencia significativa para los parámetros pH, sólidos suspendidos y grasas y aceites, siendo más eficiente el humedal 4 para estos parámetros. Tabla 5.

	Humedal	N	Rango promedio	Suma de rangos	U de Mann-Whitney	Valor de p*
Ph	1	10	5,70	57,00	2,000	0,000
	4	10	15,30	153,00		
	Total	20				
Conductividad	1	10	11,05	110,50	44,500	0,684
	4	10	9,95	99,50		
	Total	20				
Temperatura	1	10	11,80	118,00	37,000	0,353
	4	10	9,20	92,00		
	Total	20				
Sólidos suspendidos	1	10	13,30	133,00	22,000	0,036
	4	10	7,70	77,00		
	Total	20				
Sólidos sedimentables	1	10	12,55	125,50	29,500	0,123
	4	10	8,45	84,50		
	Total	20				
Grasas y aceites	1	10	13,00	130,00	25,000	0,053
	4	10	8,00	80,00		
	Total	20				

\*P < 0,05 significativo

Tabla 5. Comparación de medianas humedales 1 y 4, Centro Investigación Santa Lucía, Barrancabermeja 2012.

Entre los humedales 2 y 3 se encontró diferencia significativa para los parámetros pH, conductividad, sólidos sedimentables y grasas y aceites, siendo más eficiente el humedal 2 para estos parámetros. Tabla 6.

	Humedal	N	Rango promedio	Suma de rangos	U de Mann-Whitney	Valor de p*
ph	2	10	6,40	64,00	9,000	0,002
	3	10	14,60	146,00		
	Total	20				
Conductividad	2	10	6,65	66,50	11,500	0,003
	3	10	14,35	143,50		
	Total	20				
Temperatura	2	10	12,50	125,00	30,000	0,131
	3	10	8,50	85,00		
	Total	20				
Sólidos suspendidos	2	10	10,70	107,00	48,000	0,880
	3	10	10,30	103,00		
	Total	20				
Sólidos sedimentables	2	10	7,95	79,50	24,500	0,047
	3	10	13,05	130,50		
	Total	20				
Grasas y aceites	2	10	15,50	155,00	0,000	0,000
	3	10	5,50	55,00		
	Total	20				

\*P < 0,05 significativo

Tabla 6. Comparación de medianas humedales 2 y 3, Centro Investigación Santa Lucía, Barrancabermeja 2012.

Entre los humedales 3 y 4 se encontró diferencia significativa para los parámetros pH, conductividad, temperatura, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y grasas y aceites, siendo más eficiente el humedal 4 para estos parámetros. Tabla 7.

	Humedal	N	Rango promedio	Suma de rangos	U de Mann-Whitney	Valor de p*
pH	3	10	14,55	145,50		
	4	10	6,45	64,50	9,500	0,002
	Total	20				
Conductividad	3	10	13,00	130,00		
	4	10	8,00	80,00	25,000	0,058
	Total	20				
Temperatura	3	10	13,00	130,00		
	4	10	8,00	80,00	25,000	0,059
	Total	20				
Sólidos suspendidos	3	10	13,50	135,00		
	4	10	7,50	75,00	20,000	0,023
	Total	20				
Sólidos sedimentables	3	10	13,55	135,50		
	4	10	7,45	74,50	19,500	0,018
	Total	20				
Grasas y aceites	3	10	5,50	55,00		
	4	10	15,50	155,00	0,000	0,000
	Total	20				

\*P < 0,05 significativo

Tabla 7. Comparación de medianas humedales 3 y 4, Centro Investigación Santa Lucía, Barrancabermeja 2012.

Entre los humedales 2 y 4 se encontró diferencia significativa para los parámetros temperatura y grasas y aceites, siendo más eficiente el humedal 4 para estos parámetros. Tabla 8.

	Humedal	N	Rango promedio	Suma de rangos	U de Mann-Whitney	Valor de p*
pH	2	10	8,20	82,00		
	4	10	12,80	128,00	27,000	0,082
	Total	20				
Conductividad	2	10	9,90	99,00		
	4	10	11,10	111,00	44,000	0,649
	Total	20				
Temperatura	2	10	13,80	138,00		
	4	10	7,20	72,00	17,000	0,013
	Total	20				
Sólidos suspendidos	2	10	12,40	124,00		
	4	10	8,60	86,00	31,000	0,151
	Total	20				
Sólidos sedimentables	2	10	11,60	116,00		
	4	10	9,40	94,00	39,000	0,387
	Total	20				
Grasas y aceites	2	10	15,50	155,00		
	4	10	5,50	55,00	0,000	0,000
	Total	20				

\*P < 0,05 significativo

Tabla 8. Comparación de medianas humedales 2 y 4, Centro Investigación Santa Lucía, Barrancabermeja 2012.

## Conclusiones

El área donde se realizó la investigación fue determinante a la hora de evaluar los objetivos, permitiéndonos desde un inicio la adecuación del terreno (pendiente), la ubicación de los pilotos con la delineación hidráulica (tubería y accesorios), la fácil obtención del agua residual institucional y ante todo lo relevante las propias condiciones ambiente del lugar.

Es pertinente para la investigación utilizar la ley de Darcy, explica el funcionamiento de los sistemas de tipo subsuperficial, ya que describe el régimen de flujo en un medio poroso, mientras que la ecuación de Manning es adecuada para la explicación física de los humedales superficiales, ella define el comportamiento del flujo en canales abiertos.

Se evidenció que la base aplicativa implementada en Microsoft Excel es funcional, esta determina las características físicas del diseño de los humedales artificiales.

A nivel vegetal la *Heliconia Psitacorum* requirió más tiempo de adaptación aproximadamente 25 días mientras que la *Lenma minor* 8 días, pero ambas mostraron desarrollo vegetal en el tiempo de estudio, evidenciando los volúmenes de reproducción, la floración de nuevas especies y el crecimiento de tallos, hojas y raíces. Es de destacar el control vegetal requerido sobre todo con la *sp. Lenma minor*, puesto que logramos vivenciar al final de la investigación que se alcanzaban niveles de reproducción de hasta el 75 % del inicial en cinco días.

En los sistemas de flujo subsuperficial se observa que los sistemas fluctúan en temperatura interna por las variaciones de la temperatura ambiente y no por el caudal inyectado mientras que en los de flujo superficial se observa la influencia de ambos agentes en el resultado de la temperatura del humedal, podemos denotar que la temperatura ambiente incide en la temperatura del humedal, pero también observamos que el caudal inyectado provocó el efecto esperado; a menor caudal, mayor temperatura y a mayor caudal, menor temperatura en casi el 80 % del tiempo estudiado.

El diseño y la construcción experimental de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales institucionales en el Centro de Investigación Santa Lucía, da la primicia en investigación en Ecotecnología ante la escuela de Ingeniería Ambiental y de Saneamiento de Unipaz y la región del Magdalena Medio.

En el análisis univariado o descriptivo concluimos que los pilotos H1 y H4 remueven concentraciones por encima de las establecidas en la norma [9], ambos poseen rangos de remoción óptimos que cumplen con los valores mínimos exigidos por la normatividad colombiana vigente. Los humedales de tipo superficial se fluctuaron en rangos más neutros de pH mientras que los de flujo subsuperficial más ácidos.

La temperatura en el efluente se vio influenciada por la temperatura interna del humedal, ambos sistemas estuvieron en rangos similares, pero se denota que los humedales donde hay plantación vegetal (H1 y H4) mantienen temperaturas por debajo



de sus testigos, al mismo tiempo se concluye que los de tipo subsuperficial poseen más capacidad de retención energética frente a los de tipo superficial.

Los sistemas pilotos muestran alta eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos totales y sólidos sedimentables, los últimos con porcentajes de remoción mayores al 90 %, cada piloto marca tendencia y significancia investigativa. Los sistemas cortan la acción ionizante de los coloides provocando la precipitación de estos y por ende la disminución en el efluente.

En grasas y aceites la tendencia en el tiempo de estudio fue marcada, establecieron ejes de comportamiento con valores más significativos para los sistemas con vegetación H1 y H4.

La demanda biológica de oxígeno favoreció a los sistemas con vegetación, con diferencias marcadas, H1 obtuvo remoción de más del 87 % mientras que H4 obtuvo remoción de más del 90 %. Al comparar las mediciones de H2 y H3 se concluye que el sistema más efectivo para remover DBO es el de tipo subsuperficial con un porcentaje de remoción de 38,7 % frente al 23,1 % del humedal de flujo superficial, pero se concluye también que el agente biológico más efectivo para la remoción de esta variable es la utilizada en el H4, la *sp. Lenma minor*.

Las pruebas de wilcoxon, de Kruskal Wallis y U de Mann Whitney como pruebas de medición estadística no paramétricas precisan los datos recolectados y son pertinentes para el análisis estadístico de los datos obtenidos en la investigación. Las pruebas de wilcoxon determinaron significancia de los datos en los intragrupos (H1, H2, H3, H4), con excepción de la temperatura en el H4 en donde según wilcoxon no se evidenció variación entre el afluente y el efluente.

La ANOVA, no paramétrica de Kruskal - Wallis concluye significancia en todos los datos de los intergrupos (H1-H2-H3-H4), con excepción de los sólidos suspendidos, según esta prueba los sólidos suspendidos totales no presentan diferencias con significancia, es decir; que todos los pilotos se comportan semejantes frente a esta variable.

Al aplicar la prueba U de Mann Whitney para comparar los pares de tratamiento, se concluye que entre H1 y H2 el más efectivo para remoción o estabilización de las variables medidas es el H1, entre H1 y H3 el más efectivo es el H1, entre H2 y H4 el más efectivo es el H4, entre H3 y H4 el más efectivo es el H4, entre H2 y H3 el más efectivo es el H2 y entre H1 y H4 el más efectivo fue el H4; con esto se finaliza la investigación arrojando que entre sistemas de flujo superficial y subsuperficial sin plantación vegetal, el sistema que resulta más eficiente es el de flujo subsuperficial, pero con plantación vegetal el sistema de flujo superficial presenta mayores índices de eficiencia frente al de flujo subsuperficial, por ende se concluye que el patrón biológico establecido en los humedales inciden de manera directa en los rangos de eficiencia del sistema, en esta investigación y con los patrones utilizados la *Lenma minor* presenta mejor índice de eficacia.

## Referencias

- [1] Vymazal, J., Brix, H., Perfler, R. y Laber, J. «Removal mechanisms and types of constructed wetlands. Constructed wetlands for wastewater treatment» in Europe. *Backhuys publishers*, Leiden, 1998.
- [2] Escuela de Ingeniería de Antioquia. *Mecánica de fluidos y recursos hídricos. Tipos de tratamiento en aguas residuales institucionales*.
- [3] Llagas Chafloque, Wilmer Alberto y Guadalupe Gómez, Enrique. Diseño de humedales artificiales Para El Tratamiento De Aguas Residuales Institucionales En La Unmsm. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMM*.
- [4] *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20 edition, 1998, APHA. AWWA, WEF (Métodos estándar para la examinación de aguas y aguas residuales institucionales, Edición 20, 1998).
- [5] RAS - 2000. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Sección II. Título E .
- [6] Lara Borrero, Jaime Andrés. *Depuración de aguas residuales institucionales municipales con humedales artificiales*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona: mayo de 1999.
- [7] Aguirre, Hernando. Medición de caudales en canales abiertos. Laboratorio de control ambiental. Puerto Isaacs. Mineógrafo, 1995.
- [8] Delgadillo Zurit, Marcelo y Condori Carrasco, Luisa Jimena. *Planta de tratamiento de aguas residuales institucionales con macrófitas para comunidades cercanas al lago Titicaca*. Universidad del Valle - La Paz, 2009.
- [9] Decreto 1594 de 1984. Usos del Agua y residuos líquidos. Art. 74.



UNIVERSIDAD DE  
SAN BUENAVENTURA  
SEDE BOGOTÁ

*Calidad humana y profesional*

Ingeniería Electrónica



**CÓDIGO SNIES** 2901  
**TÍTULO QUE OTORGA** Ingeniero(a) Electrónico(a)  
**METODOLOGÍA** Presencial  
**DURACIÓN** 10 semestres

### Objetivo del programa

Formar ingenieros electrónicos integrales, con una amplia capacidad para investigar, diseñar, evaluar, mantener, elaborar y brindar soluciones técnicas para el sector productivo, desde la aplicación de sistemas electrónicos.

### Campos de acción del Ingeniero Electrónico, bonaventuriano

Diseño, implementación de procesos de automatización y control industrial.

Gestión, diseño e implementación de redes de computadores y accesos a Internet para la aplicación de las nuevas tecnologías en procesos industriales de producción y comercialización.

Diseño, implementación y gestión de sistemas de comunicación industrial móviles y fijos.

Investigación aplicada en el desarrollo de proyectos especiales en electrónica, para centros de investigación industrial y académico.

Diseño, instalación y mantenimiento de instrumentos y sistemas electrónicos aplicados a la medicina y la industria.