

## Diseño de una planta piloto para el estudio de humedales artificiales

**Carolina Medina Losada**

E-MAIL: carolinamedinalosada@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

**Luis F. Córdova López**

E-MAIL: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

**Dariel González Rodríguez**

E-MAIL: d.glezrguez99@gmail.com

Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana

**Luis Alberto Rivero Cárdenas**

E-MAIL: lriveroc89@gmail.com

Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana

### RESUMEN

El trabajo tiene como objetivo proponer el diseño de una planta piloto de humedales artificiales, como alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales domésticas, mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical no saturado – saturado, y fangos procedentes de fosas sépticas, mediante humedales artificiales para el tratamiento de lodos. La planta piloto se ubica en un área dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales María del Carmen y su vida útil es un período aproximado de cinco años. Se realiza el dimensionamiento de la misma, y se diseña un experimento considerando variables relevantes para el estudio del comportamiento de humedales artificiales en climas tropicales.

**PALABRAS**

Planta piloto, humedal artificial, tratamiento, aguas residuales, lodos.

**CLAVES:**

### Design of a pilot plant for the study of artificial wetlands

### ABSTRACT

The aim of this work is to propose the design of a pilot plant for artificial wetlands, as a viable alternative for the treatment of domestic wastewater, using artificial wetlands with vertical unsaturated-saturated subsurface flow, and sludge from septic tanks, using artificial wetlands for the treatment of sludge. The pilot plant is located in an area within the María del Carmen wastewater treatment plant and its useful life is approximately five years. Its dimensioning is carried out, and an experiment is designed considering relevant variables for the study of the behavior of artificial wetlands in tropical climates.

**KEYWORDS:** Pilot plant, artificial wetland, treatment, wastewater, sludge

## 01 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la sociedad ha provocado un incremento de los volúmenes de aguas residuales, el tratamiento de las mismas es un proceso complejo. En este escenario, se hace necesario implementar soluciones más económicas y amigables con el medio ambiente, como los humedales artificiales. Estos sistemas naturales pueden ser una alternativa efectiva para el tratamiento de aguas residuales y fangos, especialmente en zonas de clima tropical y en países en vías de desarrollo. Para abordar esta problemática, es fundamental llevar a cabo estudios sobre la viabilidad y eficacia de los humedales artificiales en estas regiones. Una forma de realizar estos estudios es a través de la implementación de una planta piloto, que permita evaluar el rendimiento de estos sistemas en condiciones reales y adaptadas a las necesidades locales.

Los humedales artificiales (HA) son áreas construidas que están temporal o permanentemente saturadas de agua, con el fin de eliminar nutrientes y materia orgánica de las aguas residuales mediante el aprovechamiento de la interacción entre microorganismos y la atmósfera. Hoy en día constituyen una de las tecnologías más utilizadas a nivel mundial para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas zonas urbanas (Salas, 2018). Algunos de estos sistemas de tratamiento tienen las ventajas que presentan bajo costo de inversión, al igual que de operación y mantenimiento.

Con la investigación se pretende crear un marco experimental (planta piloto y diseño de experimento) capaz de dar respuesta al estudio de la tecnología de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales y humedales artificiales para tratamiento de lodos extraídos de fosas sépticas en regiones con un clima tropical.

## 02 MATERIALES Y MÉTODOS

Para elaborar el diseño de la planta piloto el primer factor a tener en cuenta es la ubicación de la misma. Se decide emplazar la obra dentro del área de la planta de tratamiento de aguas residuales “María del Carmen”, esta se encuentra ubicada en el municipio Boyeros en La Habana, colindando al norte con el Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, en la calle 114 a escasos metros de la avenida Rancho Boyeros y al sur con el reparto “María del Carmen”. La PTAR vierte sus aguas al río Almendares, considerado cuerpo receptor de clase C según la (NC27:1999).

Las condiciones favorables para la obtención de agua residual doméstica, la disponibilidad de área y de personal con el conocimiento necesario para efectuar labores de mantenimiento, hacen de la PTAR “María del Carmen” el lugar idóneo para emplazar la planta piloto. En la

Figura se muestra una vista satelital de la PTAR “María del Carmen” y se señala el lugar donde se emplazará la planta piloto con una disponibilidad de área de 1221 m<sup>2</sup>.



Figura 1. Vista Satelital PTAR María del Carmen

Para llevar a cabo el diseño se tuvo en cuenta primeramente el tipo de humedal que se deseaba construir, analizando principalmente las ventajas y desventajas de su uso.

Para el tratamiento de agua residual se escoge la variante de humedal artificial de flujo subsuperficial vertical no saturado – saturado (Ver figura 2). Establecer una zona saturada en el fondo del filtro permite que este opere en condiciones anóxicas en dicha región, logrando un tratamiento más intensivo de algunos compuestos. Esto equivaldría a superponer un filtro de flujo vertical no saturado sobre un filtro de flujo horizontal.

El uso de una zona saturada en el filtro permite, fundamentalmente:

- potenciar el tratamiento del nitrógeno total al establecer una zona anóxica, condición indispensable para la desnitrificación,
- mejorar los rendimientos de la degradación del carbono gracias a un consumo suplementario asociado a las reacciones de desnitrificación,
- capturar los sólidos suspendidos residuales y garantizar así una concentración de sólido suspendidos totales (SST) en el efluente inferior a 25 mg/L, condición indispensable para el funcionamiento de módulos.

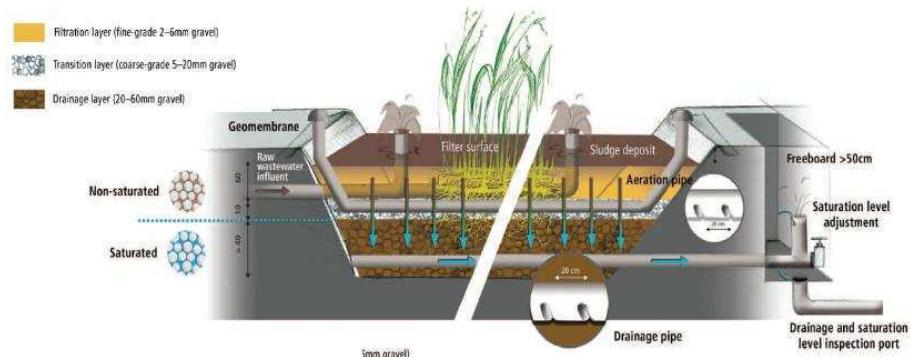


Figura 2. Esquema de un HAFsV con capa saturada. Tomado de Lombard-Latune y Molle, (2017)

Los tratamientos de lodos a través de humedales consisten en tanques que se encuentran llenos de una capa de grava y plantas con raíces emergentes (Ver figura 3), los lodos se esparcen y almacenan en la superficie de los lechos, la mayor parte de su contenido de agua se pierde por procesos de evapotranspiración de las plantas y el drenaje, dejando la capa de lodo concentrado en la superficie (Uggeti et al., 2010), la evolución del mismo está ligado a los procesos de deshidratación y mineralización (Nielsen, 2003).

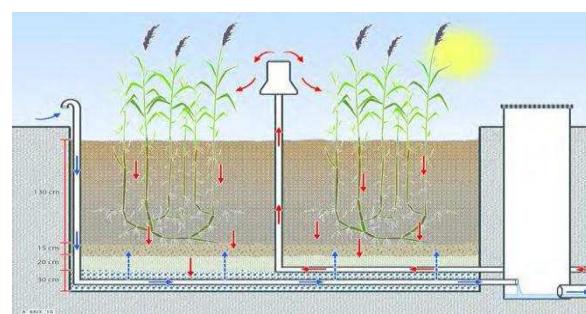


Figura 3. Representación esquemática de un humedal artificial para tratar lodos. Tomado de Dotro et al., (2021).

Luego de seleccionar las variantes de humedal artificial se procede a seleccionar los parámetros que serán medidos en la planta piloto. Se propone evaluar una serie de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos teniendo como objetivo el estudio del desempeño y comportamiento de los HA. Las variables propuestas se mencionan a continuación: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total kjeldahl (NTK), nitratos, nitritos, fósforo total, fósforo ortosoluble, temperatura, pH, grasas y aceites, humedad del lodo, color del lodo, olor del lodo.

Posterior a la toma de muestras, estas deben ser analizadas en el laboratorio mediante diversas técnicas que permiten caracterizar los parámetros que se desean evaluar. En la Tabla 1 se muestran las técnicas y métodos para la medición y se propone el equipamiento necesario para realizar la caracterización de cada parámetro.

Tabla 1. Parámetros de agua residual a caracterizar, técnicas, métodos y equipamiento a emplear.

| Parámetro                  | Técnica             | Método                    | Equipo                 |
|----------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------|
| <b>DBO</b>                 | Titulométrica       | Winkler-azida             | Bureta                 |
| <b>DQO</b>                 | Espectrofotométrica | Reflujo cerrado           | Espectrofómetro        |
| <b>NTK</b>                 | Titulométrica       | Semi-micro Kjeldahl       | Bureta                 |
| <b>Nitratos</b>            | Espectrofotométrica | Ácido fenoldisulfónico    | Colorímetro            |
| <b>Nitritos</b>            | Espectrofotométrica | Sulfanilamida             | Colorímetro            |
| <b>Fósforo Total</b>       | Espectrofotométrica | Ácido ascórbico           | Colorímetro            |
| <b>Fósforo Ortosoluble</b> | Espectrofotométrica | Ácido ascórbico           | Colorímetro            |
| <b>Temperatura</b>         | Termométrica        | Termómetro de inmersión   | Termómetro (-20/110°C) |
| <b>pH</b>                  | Potenciométrica     | Electrodo de calomel      | Potenciómetro pH       |
| <b>SST</b>                 | Gravimétrica        | Evaporación               | Balanza Digital        |
| <b>Grasas y aceites</b>    | Gravimétrica        | Extracción con disolvente | Balanza Digital        |

Para un correcto análisis de la humedad del lodo se toma una muestra antes de la descarga y otra un día después de alimentar al humedal. Sin embargo, cuando los tiempos entre alimentaciones del humedal sean largos, se tomará una muestra de humedad intermedia.

Se toma una muestra pequeña de lodo de distintas partes del humedal y se mezcla homogéneamente para su análisis. Se determina la humedad en las muestras mediante un medidor de humedad. (Ver figura 4)



Figura 4. Medidor de humedad. Tomado de (Molle et al., 2013).

Los parámetros físicos, color y olor serán determinados en campo, esto se lo realiza de manera diaria a través de la observación del mismo. Para un correcto análisis, el área de estudio se debe encontrar en condiciones óptimas, esto referente a la vegetación del humedal ya que, si esta se encuentra con un tamaño muy grande, no permitiría visualizar resultados correctos.

## 03 RESULTADOS

Se presentan las propuestas de diseño para implementar una planta piloto de humedales artificiales como herramienta para estudiar sistemas de tratamiento de aguas residuales y lodos, y el diseño del experimento en sus primeras etapas.

### CONCEPCIÓN DEL FLUJO TECNOLÓGICO DE LA PLANTA PILOTO

La planta piloto está formada por varios elementos que permiten el estudio y la experimentación en los humedales artificiales. Dos celdas de HAFSSV NS/S se alimentarán con agua residual tomada del registro de entrada a la PTAR, bombeada a un tanque de homogenización, luego a un tanque de alimentación para muestreo y almacenamiento del agua residual, que se conducirá hacia un registro de salida tras ser tratada en el filtro. El agua residual tratada vuelve al inicio de la PTAR.

Para el tratamiento de lodos, se construirán dos celdas alimentadas desde un tanque para muestreo y almacenamiento de lodos provenientes de tanques sépticos. Los lixiviados se conducirán a un registro de salida para su análisis antes de pasar al registro de entrada a la PTAR.

La figura 5 muestra la concepción del flujo tecnológico propuesta.

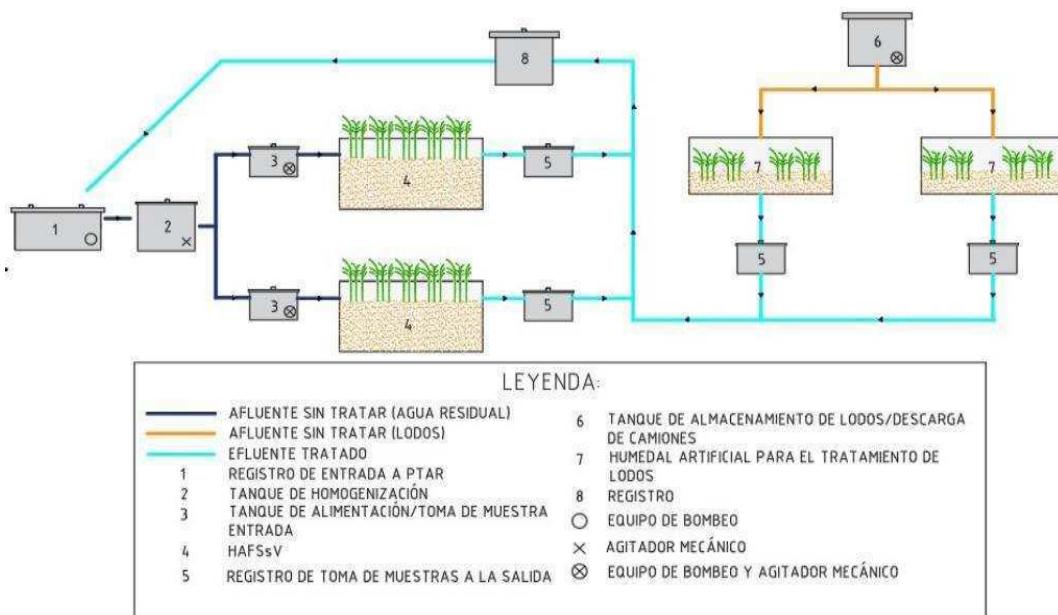


Figura 5. Concepción del flujo tecnológico.

### DISEÑO DEL EXPERIMENTO EN LA PLANTA PILOTO PARA EL ESTUDIO DE HAFSSV NS/S

El experimento varía factores para estudiar el comportamiento y la eficiencia de los HAFSSV NS/S bajo diferentes condiciones. Se establece la ubicación y frecuencia de la toma de muestras y los

compuestos específicos para modificar las características del agua residual. Se seleccionan las siguientes variables para su estudio:

- Intensidad de carga hidráulica
- Capa líquida
- Intensidad de carga orgánica

Para variar la carga orgánica, se usarán aditivos que cambian las propiedades del agua residual. (Ver tabla 2)

Tabla 2. Compuestos que varían las propiedades del agua residual

| Autor                                  | Compuestos orgánicos   | Compuestos inorgánicos   |
|--|--|--|
| Rodríguez (1993), Torres et al. (1996) | Proteína: Extracto de carne<br>Carbohidratos: Sacarosa, Almidón, Celulosa<br>Lípidos: Aceite de Soya | Solución de sales minerales propuesta por Vazoller (1988)<br>Solución de micronutrientes propuesta por Touzel y Albagnac (1983)  |
| Universidad de Valencia                | Proteína: Gelatina<br>Carbohidratos: Almidón<br>Lípidos: Jabón de tocador, Leche en polvo            | Sulfato de magnesio MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O<br>Fosfato Mono potásico KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub><br>Sulfato de Amonio (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>Bicarbonato de Sodio NaHCO <sub>3</sub>                |
| Norma Alemana DIN 38412                | Fuente de proteína:<br>Peptona<br>Extracto de carne  | Urea (CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> )<br>Sulfato de magnesio MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O<br>Fosfato Mono potásico KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub><br>Cloruro de Calcio CaCl <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O<br>Cloruro de sodio NaCl |

## DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

El experimento se realiza en celdas de 9 m<sup>2</sup> cada una. La intensidad de carga hidráulica (ICH) varía entre 0,50 y 0,90 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*h).

$$Q = ICH * \text{Área} \quad (1)$$

La carga orgánica de entrada (DBO de 150 mg/l) se puede ajustar con los aditivos anteriormente mencionados y se calcula con la fórmula:

$$ICO = \text{Carga Orgánica} / \text{Área} \quad (2)$$

La capa líquida (CL) varía entre 0,025 y 0,05 m. El volumen por lote se obtiene con:

$$Volumen \ por \ lote = \text{Área} * \text{Capa Líquida} \quad (3)$$

El número de lotes se calcula:

$$\text{Número de lotes} = \text{Caudal} / (\text{Volumen por Lote}) \quad (4)$$

La duración de cada lote:

$$\text{Duración de un lote} = (\text{Volumen por Lote}) / (\text{Caudal}) \quad (5)$$

La Tabla 3 muestra los resultados de la experimentación

Tabla 3. Resultados de la experimentación en HAFSSV NS/S

| ICH<br>(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *h)<br>o (m/h) | ICO<br>(kg/m <sup>2</sup> *día) | Q<br>(m <sup>3</sup> /h) | CL (m)               |           | CL (m)               |           | CL (m)               |           | CL (m)               |           |
|---|---------------------------------|--------------------------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|
|   |                                 |                          | 0,025                |           | 0,03                 |           | 0,04                 |           | 0,05                 |           |
|   |                                 |                          | VxL(m <sup>3</sup> ) |           | VxL(m <sup>3</sup> ) |           | VxL(m <sup>3</sup> ) |           | VxL(m <sup>3</sup> ) |           |
|   |                                 |                          | 0,225                |           | 0,27                 |           | 0,36                 |           | 0,45                 |           |
|   |                                 |                          | NL                   | DxP(mins) | NL                   | DxP(mins) | NL                   | DxP(mins) | NL                   | DxP(mins) |
| 0,50  | 0,08                            | 4,50                     | 20,00                | 3,00      | 16,67                | 3,60      | 12,50                | 4,80      | 10,00                | 6,00      |
| 0,60  | 0,09                            | 5,40                     | 24,00                | 2,50      | 20,00                | 3,00      | 15,00                | 4,00      | 12,00                | 5,00      |
| 0,70  | 0,11                            | 6,30                     | 28,00                | 2,14      | 23,33                | 2,57      | 17,50                | 3,43      | 14,00                | 4,29      |
| 0,80  | 0,12                            | 7,20                     | 32,00                | 1,88      | 26,67                | 2,25      | 20,00                | 3,00      | 16,00                | 3,75      |
| 0,90  | 0,14                            | 8,10                     | 36,00                | 1,67      | 30,00                | 2,00      | 22,50                | 2,67      | 18,00                | 3,33      |

## PROPIUESTA DE MONITOREO Y TOMA DE MUESTRAS

La evaluación de la planta piloto se basa en el monitoreo y procesamiento de muestras de agua del afluente y efluente (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Lugar y frecuencia del muestreo

| Parámetro | Frecuencia de medición                       | Lugar de toma de muestras   |
|-----------|--|---|
| DBO       | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema. Diferentes niveles del medio filtrante o de soporte y zona anóxica. |

| Parámetro           | Frecuencia de medición                       | Lugar de toma de muestras   |
|---------------------|--|---|
| DQO                 | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema. Diferentes niveles del medio filtrante o de soporte y zona anóxica. |
| NTK                 | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema. Diferentes niveles del medio filtrante o de soporte y zona anóxica. |
| Nitratos            | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema. Diferentes niveles del medio filtrante o de soporte y zona anóxica. |
| Nitritos            | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema. Diferentes niveles del medio filtrante o de soporte y zona anóxica. |
| Fósforo Total       | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema. Diferentes niveles del medio filtrante o de soporte y zona anóxica. |
| Fósforo Ortosoluble | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema. Diferentes niveles del medio filtrante o de soporte y zona anóxica. |
| Temperatura         | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema. Diferentes niveles del medio filtrante o de soporte y zona anóxica. |
| pH                  | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema. Diferentes niveles del medio filtrante o de soporte y zona anóxica. |
| SST                 | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema. Diferentes niveles del medio filtrante o de soporte y zona anóxica. |
| Grasas y aceites    | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema. Diferentes niveles del medio filtrante o de soporte y zona anóxica. |

## DISEÑO DEL EXPERIMENTO PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS

Se varían factores para evaluar la eficiencia de los humedales artificiales en el tratamiento de lodos, estableciendo ubicación y frecuencia de las muestras.

- Tasa de carga

- Tiempo de retención

### DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

Se varía la tasa de carga entre 60 y 100 kgST/(m<sup>2</sup>·año). El peso del lodo líquido se calcula considerando el contenido de sólidos totales (ST) y el volumen de carga. Teniendo en cuenta que la superficie de cada celda de los humedales de tratamiento de lodos es de 9m<sup>2</sup>, la cual se encuentra previamente determinada y los valores de tasa de carga seleccionados, es posible estimar la cantidad de fango destinado hacia su tratamiento en el humedal mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Producción de Lodo} = \text{Tasa de Carga} * \text{Área Total} \quad (6)$$

Conocida la producción de lodo diario que se asignará al humedal en peso seco y considerando que el contenido de sólidos totales en un típico fango líquido podría ser igual a 1%, se podría determinar el peso del fluido total que será depositado en una celda.

$$\text{Peso de lodo líquido} = (\text{Producción de lodo}) / (\% \text{ ST}) \quad (7)$$

Donde:

- Producción de lodo: es el lodo a destinarse al humedal por día, en kg ST/día
- % ST: es el contenido de ST en el fango líquido, en %

Si se considera un peso específico del lodo líquido igual a 1000 kg/m<sup>3</sup> se puede determinar el volumen aproximado de carga.

$$\text{Volumen de carga} = (\text{Peso de lodo líquido}) / (\gamma \text{ lodo}) \quad (8)$$

Donde:

- $\gamma$  lodo: peso específico del lodo líquido, en kg/m<sup>3</sup>

Si la carga de lodos se realiza en una celda por fase de alimentación, entonces la superficie a recibir el lodo líquido será el correspondiente a cada depósito, así:

$$\text{Carga Hidráulica} = (\text{Volumen de carga}) / \text{Superficie} \quad (9)$$

Donde:

- Superficie, es el área asignada a cada cama del humedal, en m<sup>2</sup>

Como se ha indicado el sistema de humedales artificiales está diseñado para albergar una altura de 1.0 m de fango ya tratado. Por lo tanto, se puede determinar el volumen total de producto que se tendría que retirar en 5 años (vida útil aproximada de la planta piloto), así:

$$VF = \text{Altura} * \text{Superficie} \quad (10)$$

En la Tabla 5 se muestran los resultados de distintos parámetros para la variación de la tasa de carga. El tiempo de retención cambia según el experimento que se deseé realizar. Los días de alimentación pueden variar entre 1 y 7 días y los días de reposo del humedal entre 7 y 21 días.

Tabla 5. Resultados de la experimentación en HAFSSV NS/S

| Tasa de carga<br>(kgST/m <sup>2</sup> *año) | Producción de<br>Lodos |          | Peso de lodo<br>líquido<br>(kg/día) | Volumen de<br>carga (m <sup>3</sup> /día) | Carga<br>Hidráulica<br>(m/d) | Volumen de<br>producto<br>final (m <sup>3</sup> ) |
|---|------------------------|----------|-------------------------------------|---|------------------------------|---|
|   | kgST/año               | kgST/día |                                     |   |                              |   |
| 60,00                                       | 1080,00                | 2,96     | 295,89                              | 0,30                                      | 0,03                         | 9,00  |
| 70,00                                       | 1260,00                | 3,45     | 345,21                              | 0,35                                      | 0,04                         | 9,00  |
| 80,00                                       | 1440,00                | 3,95     | 394,52                              | 0,39                                      | 0,04                         | 9,00  |
| 90,00                                       | 1620,00                | 4,44     | 443,84                              | 0,44                                      | 0,05                         | 9,00  |
| 100,00                                      | 1800,00                | 4,93     | 493,15                              | 0,49                                      | 0,05                         | 9,00  |

### PROPUESTA DE MONITOREO Y TOMA DE MUESTRAS

La evaluación de la unidad piloto se basa en el monitoreo y procesamiento de muestras de agua del efluente y afluente (Ver Tabla 6).

Tabla 6. Lugar y frecuencia del muestreo

| Parámetro         | Frecuencia de medición                       | Lugar de toma de muestras    |
|-------------------|--|------------------------------|
| DBO               | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema |
| DQO               | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema |
| Sólidos totales   | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema |
| Sólidos volátiles | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema |
| pH                | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema |
| Oxígeno disuelto  | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Entrada y salida del sistema |
| Humedad           | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Capa de lodo                 |
| Color             | Dependerá del estudio que se desea realizar. | Capa de lodo                 |

### DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA PILOTO

Se describen las dimensiones y características de cada elemento de la planta piloto para cumplir con las fases del experimento y resistir episodios de lluvia intensos.

**Tanque de homogenización de agua residual:** El tanque de homogenización (TH) almacena el agua residual (AR) y cuenta con un agitador mecánico.

**Tanque de alimentación y toma de muestras:** El tanque de alimentación (TA) se coloca antes de cada celda de HA y almacena un lote de alimentación para su posterior descarga al filtro. El TA

almacena 1 m<sup>3</sup> de agua (1 m<sup>3</sup> x 1 m<sup>3</sup> x 1 m<sup>3</sup>) y toma muestras del agua antes del filtro. Equipado con bomba y agitador mecánico para preparar y homogeneizar agua residual sintética con compuestos mencionados anteriormente. (Ver Figura 6)

Se implementarán dos celdas de HAFSSV NS/S con el objetivo de evaluar principalmente la eficiencia del medio filtrante y de la vegetación a sembrar.

El área superficial de cada una de las celdas se encuentra previamente determinada y se escoge de acuerdo a la disponibilidad de terreno dentro de la PTAR y teniendo en cuenta las experiencias estudiadas con respecto a HA a nivel de planta piloto. Las paredes y el suelo de las celdas se construirán de hormigón y en una de las paredes se ubicará una ventana de acrílico que permita observar el medio filtrante y algunos de los procesos que ocurren dentro del HA.



Figura 6. Tanque de homogenización y tanques de alimentación

Las dimensiones de las celdas son de 3 m \* 3 m cada una, contando así con un área superficial de 9 m<sup>2</sup> y su profundidad será de 1,5 m. Se diseñan las celdas con un borde libre que tiene como objetivo resistir la fuerza y la frecuencia de los episodios de lluvia que se presentan en un clima tropical. Cada celda cuenta con dos tuberías de aireación y un sistema tuberías de drenaje que garantizan la recolección uniforme del efluente. Para la alimentación del filtro se ubicará un punto de alimentación en cada celda que garantizará la repartición del agua residual de manera uniforme.

En las primeras etapas de experimentación en la planta piloto se propone evaluar la eficiencia del medio filtrante, por tanto, se planifica que en cada celda se coloque una configuración distinta del medio y se pretende sembrar la misma especie vegetal en ambas. Las capas que componen el medio filtrante se muestran a continuación, así como las configuraciones que se proponen para cada una de las celdas de HA (Ver Tabla 7).

$$\text{Profundidad de la celda} = CF + CT + CS + BL \quad (11)$$

Donde: Capa de filtración (CF), Capa de transición (CT), Capa saturada (CS), Bordo libre (BL)

Tabla 7. Configuración del medio filtrante para HAFSSV NS/S en primeras etapas de experimentación.

| Capas              | Profundidad (CELDA 1) | Profundidad (CELDA 2) |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| Capa de Filtración | 0,50 m                | 0,40 m                |
| Capa de Transición | 0,10 m                | 0,10 m                |

| Capas         | Profundidad (CELDA 1) | Profundidad (CELDA 2) |
|---------------|-----------------------|-----------------------|
| Capa Saturada | 0,50 m                | 0,50 m                |

Para la extracción de muestras en los distintos estratos del medio filtrante, se sugiere la utilización de conductos perforados, dispuestos a intervalos de 1,00 m de longitud y con la profundidad adecuada para la captura del agua en el nivel deseado. Las características de estos conductos varían en función de la configuración de material de soporte empleado en cada fase del proceso experimental. La recolección de muestras en la zona anóxica se llevará a cabo mediante un conducto perforado que se extienda a lo largo de dicha área del filtro, conectado a una válvula en la pared correspondiente a esa sección del filtro.

En la Figura 7 se muestra la sección de la celda 1 de HA, la configuración del medio filtrante y la granulometría de cada capa, se señala la ubicación de las tuberías de aireación y drenaje, así como la tubería de alimentación al filtro.



Figura 7. Celda de HAFsV NS/S

**Registro de toma de muestras a la salida (RTM):** Almacena el efluente tratado para su análisis. Dimensiones: 1 m<sup>3</sup> x 1 m<sup>3</sup> x 1 m<sup>3</sup> (Ver Figura 8)

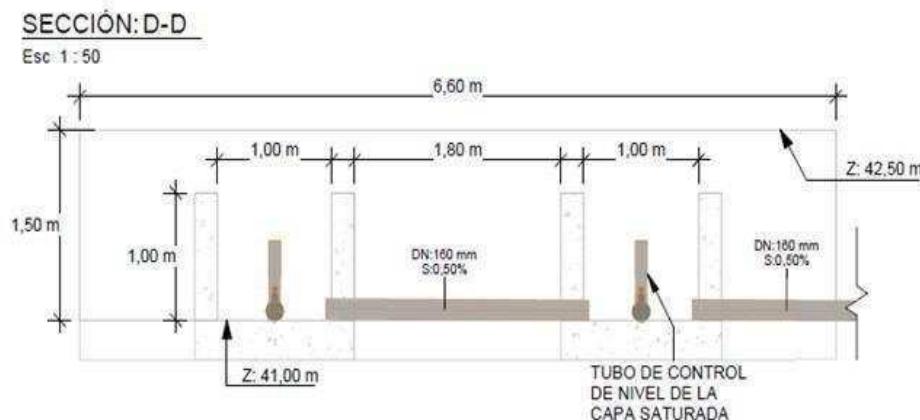


Figura 8. Registros de toma de muestras a la salida

**Tanque de almacenamiento de lodo (TA):** Tiene dimensiones 1,2 m x 1,5 m x 1,2 m con capacidad de 2,16 m<sup>3</sup> para lodos de fosas sépticas, equipado con agitador mecánico y bomba. En la Figura 9 se muestran las dimensiones del TA y la cámara de cribado que lo antecede. Se muestra el agitador mecánico que se ubica en el TA y el diámetro de la tubería de alimentación a los filtros.



Figura 9. Tanque de almacenamiento de lodos

El diseño concibe dos celdas de humedal artificial para el tratamiento de lodos (HATL), el área superficial de cada celda se encuentra previamente determinada. Sus dimensiones son 3 m \*3 m cada celda de HATL, contando así con un área superficial de 9 m<sup>2</sup> y su profundidad será de 1,5 m. Las celdas se diseñan con un BL que se emplea como altura de seguridad. Para el cálculo de la profundidad del HATL se tienen en cuenta elementos que se citan a continuación y la profundidad del medio filtrante, así como su configuración se describen en la Tabla 8.

$$\text{Profundidad de la CELDA} = F + A + BL \quad (11)$$

Donde: Medio filtrante (F), Altura de acumulación de lodo (A), Bordo libre (BL).

Tabla 8. Configuración del medio filtrante para HATL

| Capas              | Profundidad |
|--------------------|-------------|
| Capa de arena      | 0,05 m      |
| Capa de filtración | 0,20 m      |
| Capa de transición | 0,10 m      |
| Capa de drenaje    | 0,15 m      |

En la Figura 10 se muestra la sección de una celda de HATL, se señala la ubicación de las tuberías de aireación y drenaje, así como la tubería de alimentación al filtro y los diámetros correspondientes a las mismas.

En la Figura 11 se muestra en detalle la configuración del medio filtrante para los HATL y la granulometría del material de cada capa.

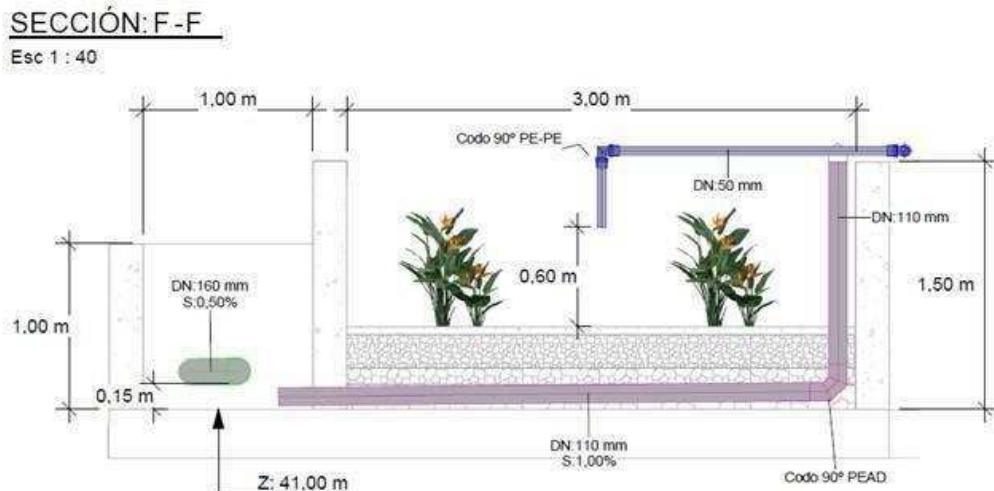


Figura 10. Sección de una celda de HATL

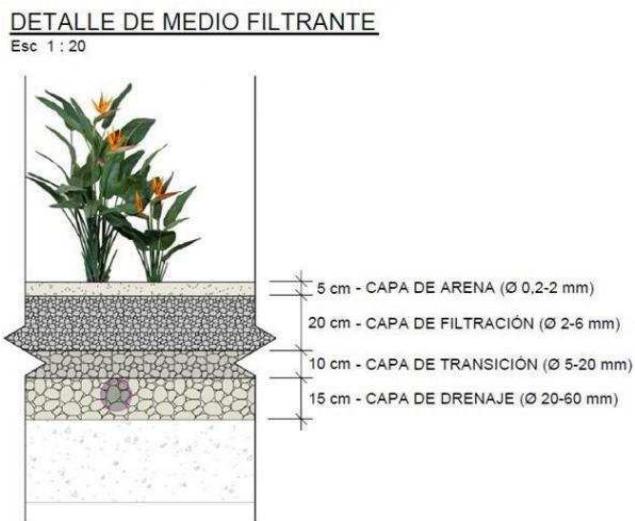


Figura 11. Detalle del medio filtrante HATL

**Registro de toma de muestras a la salida:** El registro de toma de muestras (RTM) se emplaza a la salida de cada celda de HATL. Almacena los lixiviados efluentes que pasan a través del filtro y son recogidos por la tubería de drenaje. El RTM se dispone para la toma de muestras del efluente para su posterior análisis.

Las dimensiones de RTM son 1 m \* 1 m \* 1 m y almacena un volumen de 1 m<sup>3</sup> de lixiviados. El efluente recogido en este registro pasa a otro registro donde se almacenará toda el agua residual de la planta piloto para luego ser conducido por gravedad de vuelta al registro inicial de la PTAR.

## 04 CONCLUSIONES

- Mediante una profunda revisión bibliográfica se detallan características de los HA y se definen antecedentes de los HA a nivel de planta piloto.
- Se diseña un experimento que permite analizar el comportamiento de HAFSSV NS/S en clima tropical.
- Se diseña un experimento que permite analizar el comportamiento de un HA para tratar lodos provenientes de fosas sépticas.
- Se proponen variables a monitorear en la planta piloto y se describe la forma, el lugar y el equipamiento para llevarlo a cabo.
- Se define la ubicación de la planta piloto y se dimensionan los elementos que la componen.

## 05 REFERENCIAS

- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & Von Sperling, M. (2021).** Biological Wastewater Treatment Series Volume 7: Treatment Wetlands.
- Lombard-Latune, R., & Molle, P. (2017).** Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zona tropical (Doctoral dissertation, Agence française pour la Biodiversité).
- Molle, P., Vincent, J., Troesch, S., & Malamaire, G. (2013).** Humedales artificiales utilizados en el tratamiento de lodos y fangos extraídos de fosas.
- NC 27: 1999 VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A LAS AGUAS TERRESTRES Y AL ALCANTARILLADO.ESPECIFICACIONES.**
- Nielsen, S. (2003).** Sludge drying reed beds. Water Science and Technology, 48 (5), 101-109.
- Salas, J. J. (2018).** Introducción a los Humedales Artificiales como tratamiento de las aguas residuales. iAgua.
- Uggetti, E., Ferrer, I., Llorens, E., and García, J. (2010).** Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. Bioresource Technology, 101(9), 2905–2912.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

### ORCID de los autores

Carolina Medina Losada <https://orcid.org/0009-0005-5485-8760>

Luis F. Córdova López <https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>

Dariel González Rodríguez <https://orcid.org/0009-0009-1869-450X>

Luis Alberto Rivero Cárdenas <https://orcid.org/0009-0007-6620-4515>