



Diseño, construcción y puesta en marcha de un humedal subsuperficial como tecnología complementaria para el tratamiento de efluentes de un sistema séptico del proyecto Peaje Seminario (Concesión Túnel de Aburrá Oriente S.A)

Santiago Franco Hernández

Informe de práctica presentado para optar al título Ingeniero Sanitario

Modalidad de Práctica

Semestre de Industria

Asesores

David Aguiar Gil, Magister (MSc)

Mauricio Andrés Correa Ochoa, Magister (MSc)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Sanitaria

Medellín

2025

Cita	(Franco Santiago,2025)
Referencia	Franco Hernández, S. (2025). <i>Diseño, construcción y puesta en marcha de un humedal subsuperficial como tecnología complementaria para el tratamiento de efluentes de un sistema séptico del proyecto peaje Seminario (Concesión Túnel de Oriente S.A)</i> [Trabajo de grado profesional] Universidad de Antioquia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Luego de esta experiencia vivida, debo agradecerle a mi madre, Gloria Hernández, y a mi hermana, Carolina Franco, por todo el apoyo que me dieron en todos estos años, sin ustedes, este logro hubiese sido aún más retador. A mis amigos, quienes han sido un pilar fundamental en este camino: Julián, por haber estado presente desde las primeras semanas del primer semestre hasta el final de esta etapa; a Mateo, Sebastián, Diego, Alejandro, Jose, Mariana y Valentina por su compañía, apoyo y por hacer de esta experiencia la mejor posible.

A todos ustedes, gracias por su confianza y por ser parte de este proceso.

Tabla de contenido

6Resumen	9
Abstract	10
1. Introducción	11
2. Planteamiento del problema	12
3. Objetivos	13
3.1. Objetivo general	13
3.2. Objetivos específicos	13
4. Marco teórico	14
5. Metodología	15
6. Análisis de resultados	17
6.1. Diseño del humedal subsuperficial	18
6.1.1. Modelo de concentración unitaria	18
6.1.2. Caudal de diseño (QMD)	19
6.1.3. Modelo de cálculo	19
6.1.4. Tiempo de detención hidráulica.....	21
6.1.5. Dimensiones	22
6.1.6. Plantas emergentes (Vetier).....	27
6.2. Recomendaciones para el proceso de construcción del humedal subsuperficial....	31
6.3. Puesta en marcha, operación y mantenimiento del humedal subsuperficial.....	32
7. Conclusiones	37
8. Bibliografía	38

Listado de tablas

Tabla 1. Unidades del sistema de tratamiento.....	18
Tabla 2. Parámetros biológicos de diseño.....	18
Tabla 3. Contribuciones de ARD en el Peaje Seminario.	19
Tabla 4. Resultado muestreo en efluente del pozo séptico.....	19
Tabla 5. Estratificación, altura y peso de lechos de soporte y tierra negra.	30
Tabla 6. Tabla propuesta para llevar registro del control de lodos.	33
Tabla 7. Mantenimiento caja de reparto y caja de salida.	34
Tabla 8. Mantenimiento humedal subsuperficial.	35
Tabla 9. Mantenimiento de otros equipos.	36

Tabla de ilustraciones

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo llevada a cabo en la práctica académica.	16
Figura 2. Tren de tratamiento PTARD.....	17
Figura 3. Bandeja en PRFV para humedal subsuperficial.	23
Figura 4. Vista en planta de sistema de tratamiento con humedal subsuperficial.....	26
Figura 5. Vista 3D de sistema de tratamiento con humedal subsuperficial.	27
Figura 6. Vetiver, sistema de raíces masivas, penetrantes y profundas. Tomado de: Truong, P., & Danh, L. (2015). El sistema vetiver para mejorar la calidad del agua.	28
Figura 7. Estratificación lechos de soporte y tierra negra.	31
Figura 8. Modelación teórica de la construcción del humedal artificial subsuperficial en el Peaje Seminario.	32

Siglas, acrónimos y abreviaturas

PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales.
ODS	Objetivo de desarrollo sostenible.
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno.
DQO	Demanda bioquímica de oxígeno.
SST	Sólidos suspendidos totales.
MSc	Magister Scientiae.
FAFA	Filtro anaerobio de flujo ascendente.
ARD	Agua residual doméstica.
RAS	Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico.
PRFV	Poliéster reforzado con fibra de vidrio.
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Resumen

El presente trabajo de grado desarrolla el diseño, construcción y puesta en marcha de un humedal artificial subsuperficial como tecnología complementaria para el tratamiento de efluentes domésticos provenientes de un sistema séptico en las instalaciones del Peaje Seminario, perteneciente a la Concesión Túnel de Aburrá Oriente. La necesidad del proyecto radica en el cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015, que regula los límites de vertimiento, asegurando una disposición adecuada de las aguas residuales y minimizando su impacto ambiental.

La metodología se estructuró en cuatro fases principales: recopilación de información primaria y secundaria, selección y diseño del humedal artificial, supervisión de la construcción y puesta en marcha del sistema. Se implementó un sistema integrado que combina un pozo séptico con filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) y un humedal subsuperficial. Este último se diseñó considerando parámetros normativos y técnicos, como el tiempo de detención hidráulico, la eficiencia de remoción de DBO₅ y DQO, y el uso de materiales como grava y plantas emergentes (vetiver).

El sistema propuesto logró una reducción significativa de los contaminantes, alcanzando niveles que cumplen con los estándares de vertimiento exigidos. Además, se destaca la sostenibilidad económica y operativa del humedal, que requiere bajos costos de mantenimiento y ofrece un rendimiento eficiente en un entorno empresarial como el del Peaje Seminario. En conclusión, este proyecto demuestra la viabilidad técnica de integrar tecnologías sostenibles en instalaciones privadas para el tratamiento de aguas residuales, contribuyendo a la protección de los recursos hídricos y al cumplimiento de la normativa de vertimiento (Resolución 0631 de 2015).

Palabras clave: Humedal artificial, vertimiento, DBO, DQO, sistema séptico.

Abstract

This undergraduate thesis develops the design, construction, and commissioning of a subsurface flow constructed wetland as a complementary technology for treating domestic effluents from a septic system at the Peaje Seminario facilities, part of the Túnel de Oriente Concession. The project addresses the need to comply with Resolution 0631 of 2015, which regulates discharge limits, ensuring proper wastewater disposal and minimizing environmental impact.

The methodology was structured into four main phases: gathering primary and secondary information, selecting and designing the technology, supervising the construction, and commissioning the system. An integrated system combining a septic tank with an upflow anaerobic filter (FAFA) and a subsurface flow constructed wetland was implemented. The wetland was designed based on normative and technical parameters, such as hydraulic retention time, efficiency in removing BOD5 and COD, and the use of materials like gravel and emergent plants (vetiver).

The proposed system achieved a significant reduction in contaminants, reaching levels that comply with the required discharge standards. Furthermore, the economic and operational sustainability of the wetland stands out, requiring low maintenance costs while offering efficient performance in a corporate setting like Peaje Seminario.

In conclusion, this project demonstrates the technical feasibility of integrating sustainable technologies into private facilities for wastewater treatment, contributing to water resource protection and compliance with environmental regulations.

Keywords: Constructed wetland, discharge, BOD, COD, septic system.

1. Introducción

El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 incluye proporcionar acceso a un saneamiento adecuado y equitativo, mejorar la calidad del agua y proteger y restaurar los ecosistemas relacionados con el agua. Sin embargo, se estima que el 80 por ciento de las aguas residuales a nivel mundial regresan a la naturaleza sin tratamiento, con graves implicaciones ambientales y a la salud pública. (Carlos A. Arias et al., 2023). Una de las alternativas para mejorar las condiciones de saneamiento rural y evitar la disposición incorrecta de los efluentes domésticos es el uso de sistemas sépticos, cuyo principal objetivo es prevenir la contaminación del suelo y aguas continentales utilizadas para el consumo humano (Aparecida Bezerra Pereira et al., 2018).

Según Gomes Colares, se recomienda el uso de sistemas sépticos en las siguientes situaciones: para áreas sin una red pública de recolección de aguas residuales; como alternativa para el tratamiento de aguas residuales en áreas provistas de una red de recolección local; para la retención previa de sólidos sedimentables. A pesar de todas las ventajas, la eficiencia del sistema séptico para la eliminación de materia orgánica es moderada, requiriendo un tratamiento posterior para lograr un grado aceptable de eliminación de materia orgánica(Gomes Colares & Sandri, 2014), por lo tanto, se ha propuesto diseñan un humedal artificial subsuperficial como complemento al sistema séptico existente en el Peaje Seminario perteneciente a la Concesión Túnel de Oriente S.A.

2. Planteamiento del problema

Actualmente, el Peaje Seminario, perteneciente al proyecto Túnel de Aburrá Oriente S.A, cuenta con un pozo séptico para el tratamiento de las aguas residuales domésticas (ARD) generadas en sus instalaciones. Sin embargo, para que el efluente cumpla con los límites de vertimiento establecidos en la Resolución 0631 de 2015 y pueda ser descargado sin afectar el medio ambiente, es necesario implementar un postratamiento. Esta necesidad ha sido evidenciada en el “Informe técnico de la calidad fisicoquímica de las aguas residuales domésticas de la Concesión Túnel Aburrá Oriente S.A.”, elaborado por el Laboratorio de Monitoreo Ambiental G-LIMA, el cual demostró que la DBO₅ y la DQO no cumplen el límite máximo permisible.

Entonces, se ha planteado la selección de una tecnología complementaria para el tratamiento del agua residual doméstica, teniendo como elección un humedal artificial. Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento acuático que utilizan plantas y sustratos para la remoción de contaminantes en aguas residuales. Estos sistemas han demostrado su eficacia como tratamiento secundario avanzado, así como en el manejo de efluentes de tanques sépticos y otros propósitos (Romero, 2000). Dado su bajo costo de operación y su capacidad para tratar efluentes en condiciones similares, se seleccionan como la solución adecuada para el presente diseño.

De acuerdo con los requerimientos establecidos por la Resolución 0330 de 2017, modificada parcialmente por la Resolución 0799 de 2021, en las cuales se adopta el “Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, Sección II, Título E, Tratamiento de Aguas Residuales”, este documento presenta el diseño de un humedal subsuperficial que funcionará como sistema de tratamiento complementario para el efluente del pozo séptico existente en el Peaje Seminario.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Diseñar, implementar y evaluar un humedal subsuperficial como tecnología de tratamiento complementaria para los efluentes de un sistema séptico en el Peaje Seminario, Concesión Túnel de Oriente.

3.2. Objetivos específicos

- Evaluar la implementación de tecnologías complementarias al sistema séptico para el tratamiento de aguas residuales domésticas del peaje Seminario.
- Diseñar un humedal subsuperficial como tecnología de tratamiento complementaria para mejorar la calidad del efluente del sistema séptico existente.
- Apoyar técnicamente en la supervisión de la construcción y puesta en marcha del humedal subsuperficial, garantizando su correcta operación inicial.

4. Marco teórico

Las aguas residuales son el resultado de las actividades humanas, fuentes generadoras de residuos domésticos, residuos líquidos industriales y agrícolas. Según informes del PNUMA (2000) en los países de Latinoamérica menos del 20% del agua residual recibe tratamiento adecuado. El vertimiento de las aguas residuales en las fuentes de agua superficial genera impactos, tales como problemas en la salud de la población, disminución de la biodiversidad, desaparición de hábitat, problemas en la salud de la población, entre otros (García Botero, 2005).

Entonces los humedales artificiales constituyen una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, ya sea como sistemas individuales o integrados con otros procesos de tratamiento (García Acevedo et al., 2023). Su implementación es particularmente viable en zonas rurales debido a sus bajos costos de construcción y operación, y a la disponibilidad de terrenos amplios en estas áreas. Estas características los convierten en una opción adecuada para localidades de baja densidad poblacional (García Acevedo et al., 2023).

El funcionamiento de estos humedales artificiales se basa en la interacción entre la vegetación hidrófita emergente, el sustrato y la zooglea, que se forma gradualmente en la rizosfera. Estos elementos trabajan conjuntamente para remover contaminantes presentes en las aguas residuales. Sin embargo, con el tiempo, la saturación del sustrato reduce la conductividad hidráulica del sistema, lo que afecta su eficiencia de remoción (García Acevedo et al., 2023).

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2010) define los humedales artificiales como “jardineras impermeables donde se siembran plantas de pantano, las cuales se nutren de los fosfatos presentes en los detergentes y de la materia orgánica, permitiendo la recuperación de un 70% del agua, que puede ser utilizada para irrigación”.

En el diseño de estos sistemas, la Resolución 0330 de 2017 establece que se deben considerar factores como el caudal y las características del afluente, el tipo de vegetación a emplear y las tasas de evapotranspiración. Además, el diseño técnico incluye un tiempo de retención hidráulica de aproximadamente 5 días, una relación largo-ancho entre 3:1 y 4:1, y profundidades recomendadas de 0,30 a 0,60 m para sistemas de flujo superficial y de 0,10 a 0,45 m para flujo subsuperficial. La impermeabilización del suelo debe garantizarse mediante el uso de capas de arcilla o geomembranas (Ministerio de Vivienda, 2017).

5. Metodología

Para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos propuestos, el proyecto se estructuró en cuatro fases, donde se participó activamente en cada etapa para garantizar la ejecución satisfactoria de las actividades asignadas durante las prácticas académicas.

- **Fase I:**

En la fase I se llevó a cabo la recopilación de información tanto primaria como secundaria, clave para fundamentar la selección y diseño del sistema. Esta se divide de la siguiente manera:

- **Información primaria:** Recogida mediante visitas técnicas al sitio de estudio, análisis de campo, datos preliminares del sistema séptico existente y estudio de caracterización de calidad del agua del sistema.
- **Información secundaria:** Obtenida a partir de una revisión bibliográfica exhaustiva para sustentar la metodología del trabajo con base en argumentos científicos y normativos.

- **Fase II:**

Una vez recopilada la información adecuada para llevar a cabo la ejecución conceptual del proyecto, en la fase II se brindó apoyo en la selección de la tecnología de tratamiento complementaria (humedal artificial subsuperficial), considerando criterios como: condiciones topográficas del sitio, disponibilidad del espacio físico, evaluación técnico-económica. Asimismo, se dio apoyo en el diseño hidráulico del sistema y la elaboración de la ingeniería de detalle del humedal subsuperficial.

- **Fase III:**

Durante el desarrollo de la fase III, se dio acompañamiento a la construcción del humedal subsuperficial, además, de dar apoyo a la supervisión del cumplimiento de los criterios de diseño exigidos en la Resolución 0330 de 2017, mediante visitas periódicas al sitio del proyecto.

- **Fase IV:**

Finalmente, en la fase IV se brindó acompañamiento en la puesta en marcha del humedal subsuperficial, verificando su operación inicial y realizando recomendaciones para su monitoreo y ajuste en función de la calidad del efluente tratado.

Diseño, construcción y puesta en marcha de un humedal subsuperficial como tecnología complementaria para el tratamiento de efluentes de un sistema séptico del proyecto Peaje Seminario (Concesión Túnel de Aburrá Oriente S.A).

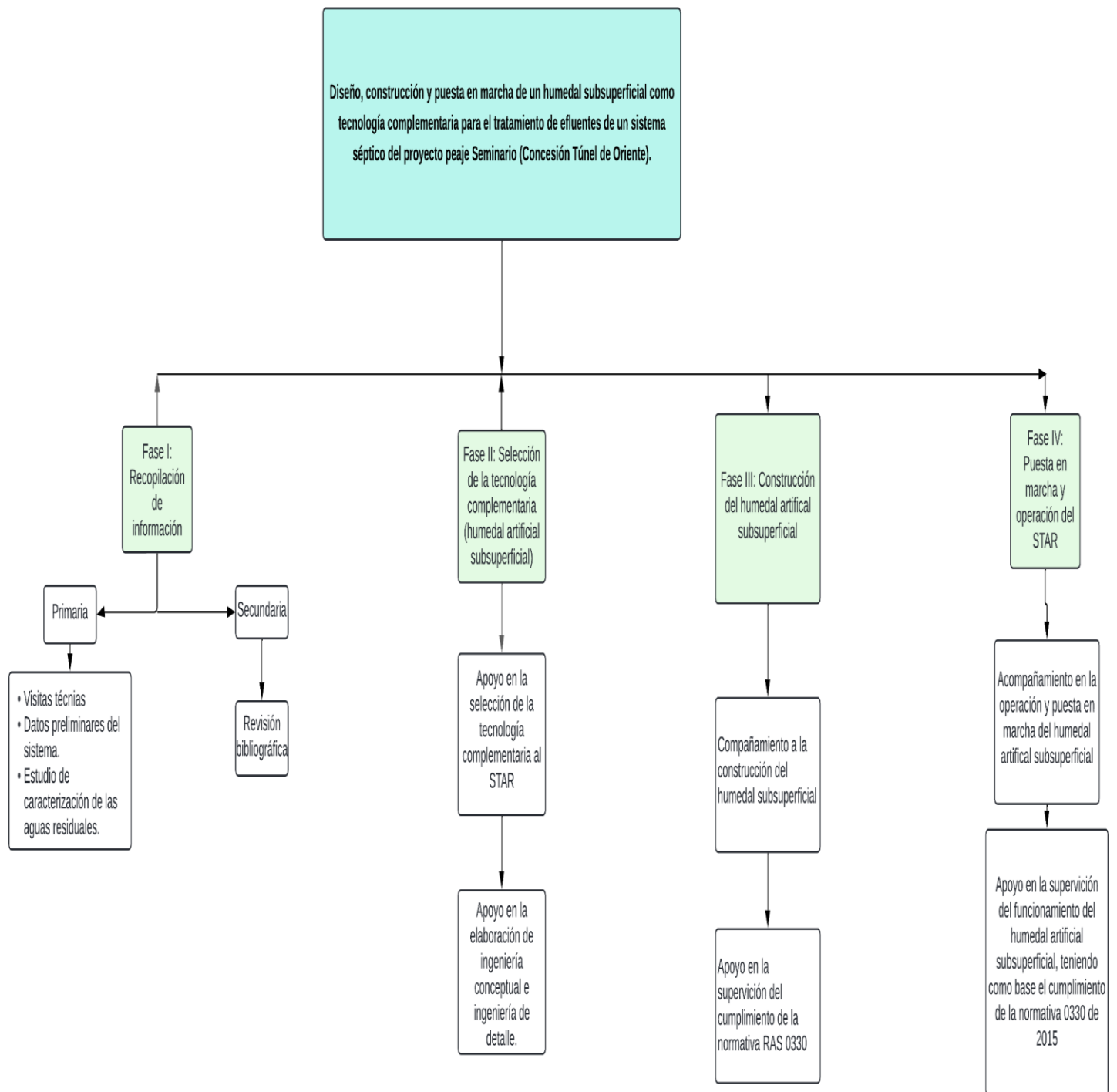


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo llevada a cabo en la práctica académica.

6. Análisis de resultados

Para llevar a cabo el tratamiento de las ARD generadas en el Peaje Seminario perteneciente al proyecto Túnel de Oriente, se propone complementar el pozo séptico existente con un humedal subsuperficial.

A continuación, se presenta el tren de tratamiento propuesto:

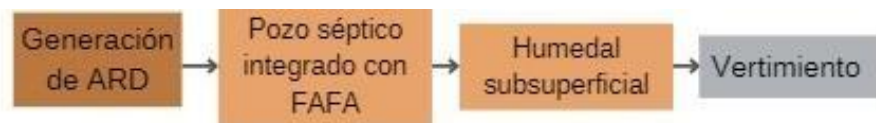


Figura 2. Tren de tratamiento PTARD.

El sistema cuenta con el siguiente proceso unitario:

- **Pozo séptico integrado con filtro anaerobio de flujo ascendente.**

En esta unidad se da la separación de los sólidos gruesos que son capaces de sedimentar por su propio peso, y se inicia la transformación de la materia orgánica soluble a lodos por medio de bacterias anaerobias. Además, cuenta con una tercera cámara útil para mantener las células en suspensión y adheridas en un lecho de soporte (Biopack) que propicia el contacto del residuo líquido con los microorganismos para asegurar la eficiencia del sistema.

Para llevar a cabo el tratamiento de la ARD generadas en el Peaje Seminario, se parte de un sistema integrado que incluye separación física de sólidos y procesos biológicos anaerobios (pozo séptico + FAFA), dónde sus efluentes son recibidos por el humedal subsuperficial para su respectivo pulimiento y finalmente realizar la disposición final del agua tratada dando cumplimiento a la resolución 0631/2015.

- **Diagrama del sistema**

Las unidades que conforman el sistema son las siguientes:

Tabla 1. Unidades del sistema de tratamiento.

ÍTEM	COMPONENTE	CANTIDAD
1	Sistema séptico Integrado con FAFA	1
2	Caja principal de reparto	1
3	Bandejas de humedal subsuperficial PRFV - D:2.00 m	1

6.1. Diseño del humedal subsuperficial

En este tipo de humedales el agua fluye por debajo de la superficie de un medio poroso sembrado de plantas emergentes. El medio es comúnmente grava gruesa y con pendiente de 0 a 0.5%. Tienen bajos requerimientos de área y carecen de problemas de olores y de mosquitos.

La experiencia analizada indica que dichos humedales son adecuados para la remoción de DBO y SS. (Romero, 2000).

6.1.1. Modelo de concentración unitaria

De manera general, las ARD generadas son de concentración media; entonces, se consideran los siguientes valores típicos basados en literatura especializada:

Tabla 2. Parámetros biológicos de diseño.

Parámetro	Valor asumido (mg/l)
DBO ₅	300
DQO	500
SST	150

6.1.2. Caudal de diseño (QMD)

Luego de realizar un aforo por el método volumétrico el caudal medio diario es mostrado en la tabla 3.

Tabla 3. Contribuciones de ARD en el Peaje Seminario.

Caudal (l/s)	Caudal (m ³ /d)
0.008	0.6912

6.1.3. Modelo de cálculo

A continuación, se presenta el modelo de cálculo para dimensionar el humedal.

- **Eficiencia del sistema:** Según el Informe técnico de la calidad fisicoquímica de las aguas residuales domésticas de la concesión Túnel Abura Oriente S.A, realizado por G-LIMA, la DBO en el efluente del pozo séptico, que será el afluente del humedal, presenta la siguiente concentración:

Tabla 4. Resultado muestreo en efluente del pozo séptico.

Parámetro	Resultado (mg/l)
DBO ₅	175.88

Debido a que dicha concentración puede variar, se considera un factor de seguridad del 15% (Romero,2000).

Por lo tanto, la DBO₅ en el afluente del humedal, se obtiene con la ecuación 1:

$$C_0 = C + (C * f)$$

Ecuación 1. Eficiencia del sistema séptico.

Donde:

C_o : DBO efluente pozo séptico / afluente del humedal (mg/l)

C : DBO afluente pozo séptico (mg/l)

f : factor de seguridad

De esta manera, la DBO_5 en el afluente del humedal es:

$$C_o = 175.88 \frac{mg}{L} O_2 + \left(175.88 \frac{mg}{L} O_2 * 15\% \right)$$

$$C_o = 202 \frac{mg}{L} O_2$$

Ahora, para hallar la DBO_5 efluente del sistema de tratamiento (pozo séptico + humedal) se utiliza la ecuación 2.

$$C_n = C - (C * \varepsilon)$$

Ecuación 2. DBO_5 del efluente del sistema.

Donde:

C_n : DBO efluente del sistema (pozo séptico + humedal) (mg/l)

C : DBO afluente pozo séptico (mg/l)

ε : Eficiencia remoción DBO del sistema (pozo séptico + humedal) (mg/l)

$$C_n = 300 \frac{mg}{L} O_2 - \left(300 \frac{mg}{L} O_2 * 80\% \right)$$

$$C_n = 60 \frac{mg}{L} O_2$$

6.1.4. Tiempo de detención hidráulica

Para conocer el tiempo de detención hidráulico que garantiza la eficiencia esperada en el humedal subsuperficial, se parte de la ecuación 3.

$$TDH = [1/(C_n/C_o)^{(1/n)} - 1]$$

Ecuación 3. Tiempo de detención hidráulico

Donde:

THD: Tiempo de detención hidráulico (día).

n: Número de reactores de mezcla completa en serie.

C_n: DBO efluente del sistema (pozo séptico + humedal) (mg/L)

C_o: DBO efluente pozo séptico / afluente del humedal (mg/l).

K_o: Constante global de la tasa de remoción de DBO, corregida para la temperatura de ubicación del proyecto.

Para obtener K_o:

$$K_o(x) = K_o(20) * 1.02^{x-20}$$

Ecuación 4. Constante global de la tasa de remoción de DBO.

Donde:

X: Temperatura promedio del sitio (20°C)

Entonces:

$$K_O(20) = K_O(20) * 1.02^{20-20}$$

$$K_O(20) = 1.0/día$$

Contemplando un (1) reactor de mezcla completa y reemplazando en la ecuación 3 los valores obtenidos anteriormente, se tiene que el TDH en el humedal es:

$$TDH = [1/(60/202)^{(1/1)} - 1]$$

$$TDH = 2.37 \text{ días}$$

6.1.5. Dimensiones

Para conservar el TDH requerido, el volumen del humedal se determina con la ecuación 5.

$$V = Q * TDH$$

Ecuación 5. Volumen del humedal (m³)

Donde:

V: Volumen humedal subsuperficial (m³)

Q: Caudal de diseño (m³/d)

TDH: Tiempo de detención hidráulico (día)

$$V = 0.6912 \frac{m^3}{d} * 2.37 \text{ días}$$

$$V = 1.64 m^3$$

Por facilidad constructiva, se plantea que el humedal sea construido en poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), como se muestra en la figura 3.

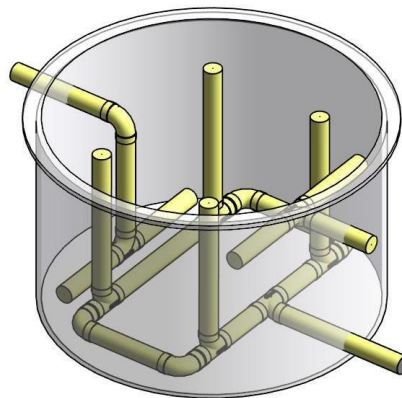


Figura 3. Bandeja en PRFV para humedal subsuperficial.

Asumiendo una geometría cilíndrica para evitar formación de zonas muertas, el área del humedal es:

$$A = \frac{V_o}{H}$$

Ecuación 6. Área del humedal (m²)

Donde:

A: Área del humedal (m²).

V_o: Volumen del humedal subsuperficial (m³).

H: Profundidad de la lámina de agua (m).

Considerando la profundidad H máxima de 0.80 m (Romero, 2000), se tiene que:

$$A = \frac{1.64 \text{ m}^3}{0.80 \text{ m}}$$

$$A = 2.05 \text{ m}^2$$

De esta manera, con la ecuación 7, se halla el diámetro:

$$\varnothing = \frac{\sqrt{4 * A}}{\pi}$$

Ecuación 7. Diámetro de la unidad

Donde:

\varnothing : Diámetro de la unidad (m).

A: Área de cada bandeja de humedal (m²)

$$\varnothing = \frac{\sqrt{4 * (2.05 \text{ m}^2)}}{\pi}$$

$$\varnothing = 1.62 \text{ m}$$

Se propone un (1) humedal subsuperficial de 2,00 m de diámetro, dado que es una medida comercial que proporciona las condiciones indicadas en el diseño. De esta manera, el sistema queda distribuido como se presenta en la figura 4 y en la figura 5.

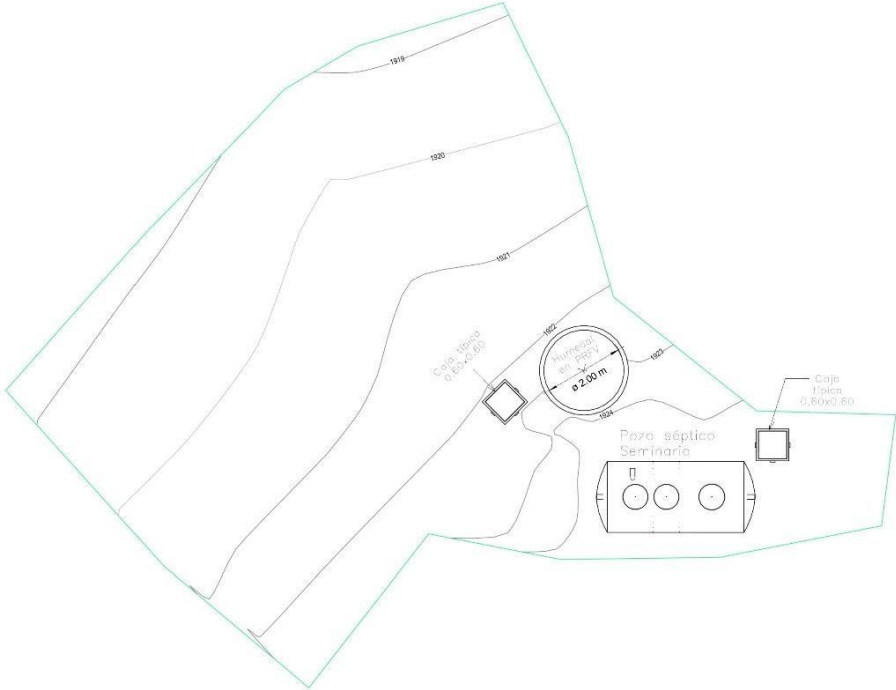


Figura 4. Vista en planta de sistema de tratamiento con humedal subsuperficial.

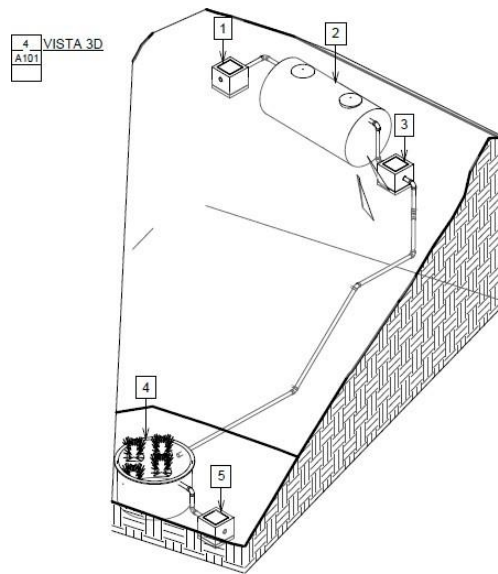


Figura 5. Vista 3D de sistema de tratamiento con humedal subsuperficial.

6.1.6. Plantas emergentes (Vetier)

El vetiver es esencial en los humedales de tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad para absorber grandes cantidades de nutrientes y contaminantes, su alta tasa de transpiración y su resistencia a condiciones adversas. Estas características permiten que el vetiver mejore significativamente la calidad del agua al eliminar sedimentos, nutrientes excesivos y metales pesados. Además, su sistema de raíces profundas y densas (Figura 6) estabiliza el suelo y reduce la erosión, facilitando un entorno más saludable y sostenible para el tratamiento del agua (Truong & Danh, 2015).



Figura 6. Vetiver, sistema de raíces masivas, penetrantes y profundas. Tomado de: Truong, P., & Danh, L. (2015). El sistema vetiver para mejorar la calidad del agua.

Debido a los beneficios de esta planta emergente, se selecciona una densidad de 9 plantas/m² para el humedal subsuperficial. El número total de plantas, según el área, es hallado con la ecuación 8.

$$N. \text{ plantas} = A * D * N. \text{ bandejas}$$

Ecuación 8. Número de plantas para el humedal.

Donde:

N.plantas: Número de vetiver (und).

A: Área del humedal (m²)

D: Densidad de las plantas (plantas/m²).

N. Bandejas: Número de humedales

$$A = \pi * \frac{d^2}{4} = 3,14 \text{ m}^2$$

$$N.plantas = 3,14 m^2 * \frac{9 plantas}{m^2} * 1$$

$$N.plantas = 28 plantas$$

El humedal debe contar con 28 plantas Vetiver.

6.1.7. Lechos de soporte

El lecho de grava en los humedales de flujo subsuperficial cumple múltiples funciones, incluyendo la filtración física, el soporte estructural para la vegetación emergente y proporcionando una superficie para que prosperen los biofilms microbianos (Metcalf & Eddy, Inc, 2003).

Por otra parte, la tierra negra es quién principalmente propicia un ambiente adecuado para las plantas.

Según los lechos utilizados (gravas estratificadas y tierra negra), el volumen que ocupa cada uno en el humedal, se halla con la ecuación 9:

$$V_{Lecho} = A_s * H_{Lecho}$$

Ecuación 9. Volumen del lecho de grava.

Donde:

V_{Lecho} : Volumen del lecho (m^3).

A_s : Área superficial del humedal (m^2).

H_{Lecho} : Altura del lecho (m).

Posteriormente, con la densidad de cada lecho y su respectivo volumen, con la ecuación 10 se halla la cantidad necesaria de cada uno de estos en Kg; así:

$$Cantidad\ del\ lecho\ en\ Kg = densidad\ lecho \frac{Kg}{m^3} * V_{Lecho} m^3$$

Ecuación 10. Cantidad del lecho en Kg.

Finalmente, se obtiene que la masa en kg de cada lecho en cada bandeja del humedal es la presentada en la tabla 5.

Tabla 5. Estratificación, altura y peso de lechos de soporte y tierra negra.

Lecho	Altura (m)	Densidad (kg/m^3)	Masa (kg)
Tierra negra	0.30	750	706.9
Grava 1"x 3/4"	0.20	1500	942.5
Grava 1/2"x 1/4"	0.20	1500	942.5
Grava 5"x3"	0.30	1500	1413.7
TOTAL	1,00	-	-

De esta manera, los lechos quedan distribuidos como se presenta en la figura 7.

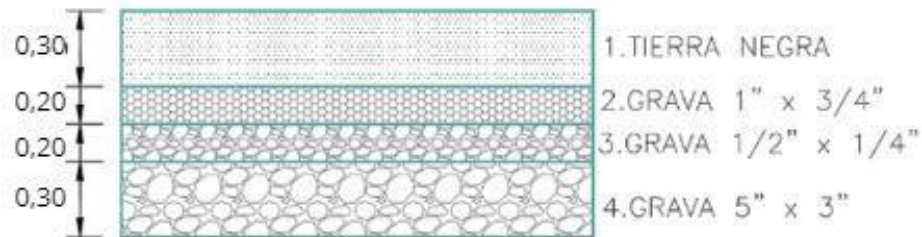


Figura 7. Estratificación lechos de soporte y tierra negra.

6.2.Recomendaciones para el proceso de construcción del humedal subsuperficial.

Para realizar la instalación del humedal, considere las siguientes recomendaciones y en este orden:

- Elija un área que garantice el área superficial requerida por el humedal y que se encuentre aguas abajo del pozo séptico.
- Instale una caja de reparto aguas arriba del humedal y una caja de salida aguas abajo del humedal.
- Realice una excavación según la profundidad y área requerida por el humedal, permitiendo que se pueda instalar correctamente la bandeja en PRFV.
- Instale la bandeja PRFV con su respectiva instalación hidráulica de entrada y salida del agua residual.
- Realice los canales perimetrales necesario para evitar la entrada de aguas de escorrentía al sistema.
- Proceda con el lleno de la grava estratificada en la bandeja de PRFV, poniendo siempre en el fondo los de mayor diámetro.
- Llene el humedal con agua limpia (libre de cloro).

- Siembre las plantas (vetiver) sobre el área superficial del humedal, conservando una densidad de 9 plantas/m² y permita que crezcan durante por lo menos 2 semanas antes del ingreso del ARD.
- Proceda con el ingreso de ARD si después del tiempo recomendado observa que las plantas (vetiver) se están desarrollando



Figura 8. Modelación teórica de la construcción del humedal artificial subsuperficial en el Peaje Seminario.

6.3.Puesta en marcha, operación y mantenimiento del humedal subsuperficial.

6.3.1. Operación del humedal subsuperficial.

Un humedal no requiere algún tipo de operación específica como regulación de válvulas o actividades rutinarias de limpieza; sin embargo, se debe hacer una inspección constante (por lo menos 2 veces al mes), para verificar que no exista crecimiento de algas u otro tipo de especies acuáticas perjudiciales para el sistema.

6.3.2. Mantenimiento del humedal subsuperficial.

El mantenimiento constante garantiza que el agua no haga cortocircuito o se devuelva por ramas caídas, basura o diques hechos por castores, bloqueando la salida del humedal. Es posible que se deba podar o cortar la vegetación de vez en cuando (TILLEY et al. 2018). El mantenimiento del sistema de tratamiento podrá ser realizado por una persona que adquiera conocimientos básicos sobre las actividades que deben ejecutarse y son explicadas a continuación.

- **Caja de reparto y caja de salida**

Tabla 7. Mantenimiento caja de reparto y caja de salida.

ACTIVIDAD	FRECUENCIA	OBSERVACIÓN
Verifique que la caja de reparto no se encuentre llena de ARD	Dos (2) veces por mes.	Esto indica que hay taponamiento en las tuberías del humedal.
Retire solidos o material grueso que puedan encontrarse en las entradas y salidas de las cajas.	Dos (2) veces por mes o cada que se requiera.	Remueva limos u otros materiales que puedan generar taponamientos en la tubería de distribución. Además, verifique que no se encuentren cuerpos extraños o solidos de gran tamaño que ya debieron ser retenidos en el proceso anterior; en este caso, haga inspección en el pozo séptico.
Lave las paredes de las cajas solo con agua a presión o manguera, con el fin de retirar materia orgánica adherida.	Una (1) vez por año.	No utilice detergente, jabones u otro aditivo químico

- **Humedal subsuperficial**

Tabla 8. Mantenimiento humedal subsuperficial.

ACTIVIDAD	FRECUENCIA	OBSERVACIÓN
Verificar que el humedal no presente reboses	Todos los días.	Si esto sucede, compruebe que no estén ingresado aguas de escorrentía o las tuberías de salida del ARD se encuentre taponadas.
Retire solidos acumulados en la superficie del humedal, como: hojas, ramas, residuos sólidos, entre otros diferentes al vetiver.	Una (1) vez por mes.	Estos pueden causar taponamientos en el sistema y/o perjudicar el desarrollo de las plantas.
Pode el vetiver para mantener una densidad adecuada (9 plantas/m ²).	Una (1) vez por mes o cada que se requiera.	Su sobrepoblación puede causar que las raíces se estrechen y perjudiquen su hábitat entre ellas. Por otra parte, si observa que alguna de ellas muere, retírela y haga su reemplazo.
Inspeccione que el medio poroso no se encuentre colmatado.	Cada 1-2 años o cada que se requiera.	Realice limpieza del medio poroso con agua limpia (sin presencia de cloro) a presión, o en caso de ser necesario, reemplace el medio totalmente.
Realice la extracción de lodos con ayuda de una unidad de bombeo y las tuberías dispuestas en el humedal para esta actividad.	Cada 2-3 años.	Realice la disposición final de los lodos en un punto autorizado.

- **Otros equipos.**

En general, todas las unidades que componen el sistema deben ser verificadas para cerciorarse de que no se estén deteriorando y no afecten el correcto funcionamiento.

Tabla 9. Mantenimiento de otros equipos.

EQUIPO	ACTIVIDAD	FRECUENCIA	OBSERVACIÓN
Bandeja PRFV	Verificación de fisuras en la estructural del PRFV	Una (1) vez por año o cuando observe que el terreno alrededor del humedal presenta encharcamientos.	Repare de inmediato en caso de percibir fugas.
Tubería PVC	Revisar si presenta características de cristalización o fugas.	Cada vez que se realice reemplazo o mantenimiento del medio poroso o cada que se requiera.	En caso tal, se debe reemplazar la tubería que este afectada o realizar un recubrimiento con pintura coraza.
Válvulas	Revisar fugas en los empaques.	Una (1) vez por mes.	Lubricar con aceite las roscas de las válvulas y corregir fugas en empaques.

7. Conclusiones

1. La implementación del sistema integrado, compuesto por un pozo séptico con filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) y un humedal subsuperficial, demostró ser una solución eficiente para la remoción de contaminantes como la DBO₅ y DQO, alcanzando niveles que cumplen con los parámetros de vertimiento establecidos en la Resolución 0631 de 2015. Esto valida la viabilidad técnica de los humedales subsuperficiales como tecnología de tratamiento complementaria.
2. El diseño y puesta en marcha del humedal subsuperficial en el Peaje Seminario resalta la importancia de integrar tecnologías sostenibles en entornos privados. Este proyecto no solo contribuye al manejo adecuado de las aguas residuales, sino que también minimiza el impacto ambiental, protegiendo los recursos hídricos locales.
3. La metodología aplicada en este proyecto garantizó el diseño, la construcción y la operación inicial del sistema cumpliendo con los lineamientos establecidos por el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y la normativa ambiental vigente, lo que respalda la calidad técnica del trabajo realizado.
4. El proyecto contribuye al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, relacionado con el acceso a saneamiento seguro y la protección de los recursos hídricos, demostrando que la ingeniería sanitaria puede ser una herramienta clave para abordar desafíos ambientales en diversos contextos.

8. Bibliografía

1. Grupo de Investigación y Laboratorio de Monitoreo Ambiental G-LIMA. (2024). Informe técnico de la calidad fisicoquímica de las aguas residuales domésticas de la concesión Túnel Aburra Oriente S.A. Medellín.
2. Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento y Reutilización (4ta Edición ed.). Nueva York, EE.UU: McGraw-Hill.
3. Metcalf & Edyy. (1995). Ingeniería de aguas residuales; Tratamiento, vertido y reutilización. Madrid: McGraw-Hill.
4. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución No. 0631. Bogotá.
5. Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento técnico de agua potable y saneamiento básico – RAS, Sección II, TITULO E. Bogotá.
6. Ministerio de Vivienda, C. y. (2021). Resolución 0799 “Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017”. Bogotá.
7. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS - Resolución número 0330. Bogotá.
8. Romero, J. A. (2000). Tratamiento de aguas residuales; teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería.
9. Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., y Zurbrügg, C. (2018): Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. Dübendorf (Suiza): Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática (Eawag), 2da. edición revisada.
10. Truong, P., & Danh, L. (2015). El sistema vetiver para mejorar la calidad del agua.
11. Carlos A. Arias, Ismael Leonardo Vera, & Tatiana Rodríguez Chaparro. (2023). *Soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales*. IWA PUBLISHING.

12. Campo Usuga, J. F. (2022). *Estado del arte de los sistemas sépticos para el tratamiento del agua residual en zonas rurales* [Tesis, Universidad de Antioquia].
13. Aparecida Bezerra Pereira, M., Gonçalves Faria de Bessa, N., Araújo de Freitas, G., Santana da Silva Carneiro Antônio, J., Martins dos Santos, C., Agrônoma, E., em Produção Vegetal, M., & Assistente, P. (2018). *Eficiência de fossa séptica biodigestora no tratamento de esgoto doméstico no assentamento Vale Verde, Tocantins* *Efficiency of biodigester septic tank in the treatment of domestic sewage in Vale Verde settlement, in Tocantins* (Issue 1).
14. García Acevedo, R., García Rodríguez, E., & Pérez Amezcua, N. E. (2023). Remoción de contaminantes del agua en humedales artificiales de flujo subsuperficial, utilizando *Typha domingensis*, tezontle y grava triturada y su relación con la conductividad hidráulica. *Ciencia Nicolaita*, 87.
15. Gomes Colares, C. J., & Sandri, D. (2014). Eficiência do tratamento de esgoto com tanques sépticos seguidos de leitos cultivados com diferentes meios de suporte. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3), 445–458.
16. Garcia Botero, T. (2005). Diseño, construcción y evaluación preliminar de un humedal de flujo subsuperficial. Universidad de los Andes.