

DISEÑO DE HUMEDAL DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA PONTIFICIA
UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI

CARLOS BURBANO

GIAN MARCO PANTOJA

JUAN CAMILO MONTES

JUAN CAMILO SÁNCHEZ

JUAN CAMILO ZÚÑIGA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
DISEÑO II
10 DE DICIEMBRE DE 2024

Tabla de contenido

| | |
|---|-----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 9 |
| 2. ANTECEDENTES | 11 |
| 3. JUSTIFICACIÓN | 13 |
| 4. OBJETIVOS | 14 |
| 4.1. Objetivo general..... | 14 |
| 4.2. Objetivos específicos | 14 |
| 5. METODOLOGÍA | 15 |
| 5.1. Alternativas de diseño de humedales..... | 15 |
| 5.1.1. Humedal de flujo superficial..... | 15 |
| 5.1.2. Humedal de flujo horizontal | 21 |
| 5.1.3. Humedal de flujo vertical tipo francés..... | 23 |
| 6. DISEÑO | 30 |
| 6.1. Intento preliminar..... | 30 |
| 6.1.1. Localización del humedal | 30 |
| 6.1.2. Aforo de consumo de agua potable..... | 31 |
| 6.1.3. Visitas técnicas..... | 35 |
| 6.1.4. Diseño Aliviadero | 36 |
| 6.1.5. Diseño de humedales | 39 |
| 6.2. Intento final..... | 60 |
| 6.2.1. Justificación nueva ubicación del humedal..... | 60 |
| 6.2.2. Aforo de consumo de agua potable..... | 60 |
| 6.2.3. Estudio de suelos..... | 61 |
| 6.2.4. Levantamiento Topográfico | 62 |
| 6.2.5. Diseño de humedales | 65 |
| 6.3. Matriz de decisión..... | 98 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 101 |
| REFERENCIAS..... | 103 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Eficiencias de tratamiento para diferentes contaminantes | 15 |
| Tabla 2. Concentraciones de fondo para varios contaminantes (HFS - KC) | 17 |
| Tabla 3. Valores de K20 y θ | 17 |
| Tabla 4. Valores de K20 y θ para varios contaminantes (HFSS-KC*) | 19 |
| Tabla 5. Valores de KT, C*, θ y PTIS para varios contaminantes (HFSS – PKC*) | 20 |
| Tabla 6. Características típicas de los medios para humedales horizontales | 21 |
| Tabla 7. Valores de KT y θ para varios contaminantes | 22 |
| Tabla 8. Valores de KT y θ para varios contaminantes | 22 |
| Tabla 9. Valores de KT, C*, θ y PTIS para varios contaminantes | 23 |
| Tabla 10. Cargas máximas de diseño para el diseño clásico de humedales de FV tipo francés ... | 26 |
| Tabla 11. Valores de mediciones en micromedidores y caudales. | 34 |
| Tabla 12. Coeficiente de retorno de aguas residuales domésticas | 35 |
| Tabla 13. Caudal y diámetro full..... | 38 |
| Tabla 14. Dimensionamiento aliviadero 1 | 38 |
| Tabla 15. Dimensionamiento aliviadero 2 | 39 |
| Tabla 16. Iteraciones método KC..... | 41 |
| Tabla 17. Cálculo de carga contaminante (EMCALI EICE ESP)..... | 45 |
| Tabla 18. Iteraciones método KC..... | 48 |
| Tabla 19. Caudales de diseño..... | 51 |
| Tabla 20. Cargas Místicas..... | 52 |
| Tabla 21. Efluente y concentraciones | 52 |
| Tabla 22. Área superficial requerida..... | 53 |
| Tabla 23. Capas filtro primera etapa | 53 |
| Tabla 24. Alimentación Cargas por día..... | 53 |
| Tabla 25. Duración pulsos..... | 54 |
| Tabla 26. Diseño segunda etapa..... | 54 |
| Tabla 27. Área superficial segunda etapa..... | 55 |
| Tabla 28. Capas filtro segunda etapa | 55 |
| Tabla 29. Contaminantes eliminados segunda etapa..... | 55 |
| Tabla 30. Resumen dimensionamiento caudal 1 | 56 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 31. Resumen dimensionamiento caudal 2..... | 57 |
| Tabla 32. Aforos Nueva ubicación..... | 61 |
| Tabla 33. Coeficientes agua residual | 61 |
| Tabla 34. Caudal agua residual | 61 |
| Tabla 35. Mediciones topográficas | 64 |
| Tabla 36. Características típicas de los medios para humedales HFSS | 66 |
| Tabla 37. Iteraciones método KC..... | 67 |
| Tabla 38. Características típicas de los medios para humedales HFSS | 72 |
| Tabla 39. Iteraciones método KC..... | 72 |
| Tabla 40. Resumen dimensionamiento Nueva ubicación | 76 |
| Tabla 41. Dimensionamiento nuevo humedal..... | 79 |
| Tabla 42. Características de cada lote de alimentación..... | 92 |
| Tabla 43. Presupuesto total | 97 |
| Tabla 44. Matriz de decisión..... | 100 |

Lista de ilustraciones

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. Vista en planta PUJ y edificaciones de interés..... | 10 |
| Ilustración 2. Humedales existentes en el campus..... | 12 |
| Ilustración 3. Humedal Flujo Libre..... | 16 |
| Ilustración 4. Humedal Flujo Horizontal | 21 |
| Ilustración 5. Humedal Flujo Vertical Tipo Francés | 24 |
| Ilustración 6. Esquema operativo de la primera etapa del sistema francés..... | 25 |
| Ilustración 7. Filtro primera Etapa | 27 |
| Ilustración 8. Filtro segunda Etapa | 28 |
| Ilustración 9. Planta Phragmites sp | 29 |
| Ilustración 10. Localización preliminar del humedal de tratamiento de aguas residuales en la PUJ Cali..... | 31 |
| Ilustración 11. Vista en campo de la ubicación preliminar del humedal de tratamiento de aguas residuales PUJ Cali | 31 |
| Ilustración 12. Edificio Acacias | 32 |
| Ilustración 13. Micromedidor Acacias | 32 |
| Ilustración 14. Edificio Centro de bienestar | 33 |
| Ilustración 15. Micromedidor Centro de bienestar | 33 |
| Ilustración 16. Toma de muestras de agua residual. | 36 |
| Ilustración 17. Ubicación cajas de aguas residuales | 37 |
| Ilustración 18. Ubicación aliviadero | 38 |
| Ilustración 19. Humedal flujo vertical Tipo francés | 59 |
| Ilustración 20. Caja residual de interés | 60 |
| Ilustración 21. Apique 1 | 62 |
| Ilustración 22. Toma de puntos de interés..... | 63 |
| Ilustración 23. Medición área #1 | 78 |
| Ilustración 24. Medición área #2 | 78 |
| Ilustración 25. Vista perfil humedal de flujo vertical tipo francés..... | 82 |
| Ilustración 26. Impermeabilización | 82 |
| Ilustración 27. Sistema de drenaje | 83 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 28. Chimenea de ventilación..... | 83 |
| Ilustración 29. Sistema de distribución..... | 84 |
| Ilustración 30. Distribución humedal vista en planta..... | 84 |
| Ilustración 31. Llenado del tanque..... | 85 |
| Ilustración 32. Sifón sumergido..... | 86 |
| Ilustración 33. Detalles de la celda..... | 86 |
| Ilustración 34. Perfil terreno..... | 87 |
| Ilustración 35. Vista en planta humedal de flujo vertical tipo francés..... | 88 |
| Ilustración 36. Trazado de tubería en Civil 3D..... | 89 |
| Ilustración 37. Perfil tubería Civil 3D..... | 90 |
| Ilustración 38. Información nodo 1 y tramo de tubería 1..... | 91 |
| Ilustración 39. Verificación de diámetro seleccionado..... | 91 |
| Ilustración 40. Tanque de almacenamiento para alimentar el humedal..... | 93 |
| Ilustración 41. Vista en planta y terreno derivación de arroyo..... | 94 |
| Ilustración 42. Geobags..... | 95 |
| Ilustración 43. Vista en planta y perfil de tubería de tanque..... | 95 |

RESUMEN

El proyecto tiene como objetivo el diseño de un humedal de tratamiento de aguas residuales dentro de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, el cual recogerá las aguas residuales de Villa Javier, el Laboratorio de Nutrición y Casa Ceibas, con el fin de ser tratadas y reutilizadas para diferentes servicios del campus. Para llevar a cabo este proyecto se hace uso de las Normativas del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico (RAS), además del libro *Humedales de tratamiento: alternativa de tratamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*, para poder examinar las políticas de ejecución en esta área y realizar una valoración para el uso eficiente de las aguas residuales y aguas lluvias.

Se realizan diferentes alternativas de diseño de humedales de tratamiento de aguas residuales para saber cuál traerá la mayor eficiencia de saneamiento. De esta forma se busca la máxima reducción de contaminantes posibles, logrando depurar el agua al igual que filtrar los desechos en un espacio reducido y controlado.

Palabras clave: humedal de tratamiento, valoración, saneamiento, reducción de contaminantes.

ABSTRACT

The project aims to design a wastewater treatment wetland within the Pontificia Universidad Javeriana de Cali, which will collect wastewater from Villa Javier, the Nutrition Laboratory and Casa Ceibas, to be treated and reused. for different Campus services. The Drinking Water and Basic Sanitation Sector Technical Regulations (RAS) were used, in addition to the book *Treatment Wetlands: wastewater treatment alternative applicable in Latin America*, to examine implementation policies in this area and carry out an assessment for the efficient use of wastewater and stormwater.

Different design alternatives for wastewater treatment wetlands are analyzed to know which one will bring the greatest sanitation efficiency. In this way, the maximum possible reduction of contaminants is sought, managing to purify the water by filtering waste in a small and controlled space.

Keywords: Treatment wetland, Assessment, Sanitation, Pollutant reduction.

1. INTRODUCCIÓN

La Pontificia Universidad Javeriana Cali no cuenta actualmente con un sistema propio de tratamiento de aguas residuales, lo que obliga a verter las aguas sin tratamiento en la red local de alcantarillado. Esta situación representa no solo una pérdida de las ventajas que el tratamiento de estas aguas podría ofrecer, sino también una oportunidad para mejorar la gestión ambiental dentro del campus. El vertido directo de las aguas residuales en el alcantarillado impide su reutilización o aprovechamiento. En este contexto, surge la necesidad de diseñar un humedal de tratamiento de agua residual como una alternativa sostenible, eficiente y ecológica para manejar las aguas residuales generadas en determinados edificios de la universidad.

El objetivo principal de este proyecto es diseñar un humedal que trate las aguas residuales provenientes de un conjunto de edificaciones del campus. Las edificaciones específicas se determinarán a medida que avance el documento, seleccionando aquellas que ofrezcan mayores beneficios a través de su intervención. Inicialmente, se consideraron los edificios de Acacias y el Centro de Bienestar para el intento preliminar de diseño. Sin embargo, dicho intento preliminar fue descartado por la imposibilidad de construir el humedal en la zona prevista. Como resultado, se plantea un diseño final que abarca los edificios de Casa Ceibas, Villa Javier y el Laboratorio de Nutrición, una vista en planta del campus e imágenes de referencia de estos edificios se encuentran en la Ilustración 1.

Este diseño final incluye la evaluación de tres tipos de humedales: flujo libre, flujo horizontal y flujo vertical tipo francés. Cada uno será analizado bajo distintos criterios para determinar cuál es la opción más adecuada para el campus. Además, se considerarán los beneficios ambientales y paisajísticos, dado que un humedal no solo trata el agua residual, sino que también integra la naturaleza al entorno universitario. Así, el proyecto busca aportar un componente estético y "verde" que complemente la infraestructura de la universidad. La elección de un humedal como tecnología de tratamiento se fundamenta en su simplicidad constructiva y las ventajas operativas que ofrece frente a otros sistemas de tratamiento de aguas residuales. Aunque no existen estudios previos sobre el uso de humedales en esta universidad, la Pontificia Universidad Javeriana Cali cuenta con una planta de tratamiento de agua potable, lo que refleja un interés institucional por el manejo del recurso hídrico. Asimismo, el artículo proporcionado por la profesora Dr. Ing. Sandra Galarza, titulado **“Hacia un sistema humedal-construido/tanque-regulador para el**

aprovechamiento de aguas lluvias en una cuenca experimental de Colombia” del cual es autora, analiza la implementación de un humedal para aguas lluvias en la sede Bogotá. Si bien el principal objetivo de este proyecto en la sede Cali es el tratamiento de aguas residuales, dicho artículo constituye un referente valioso para el desarrollo de esta propuesta.

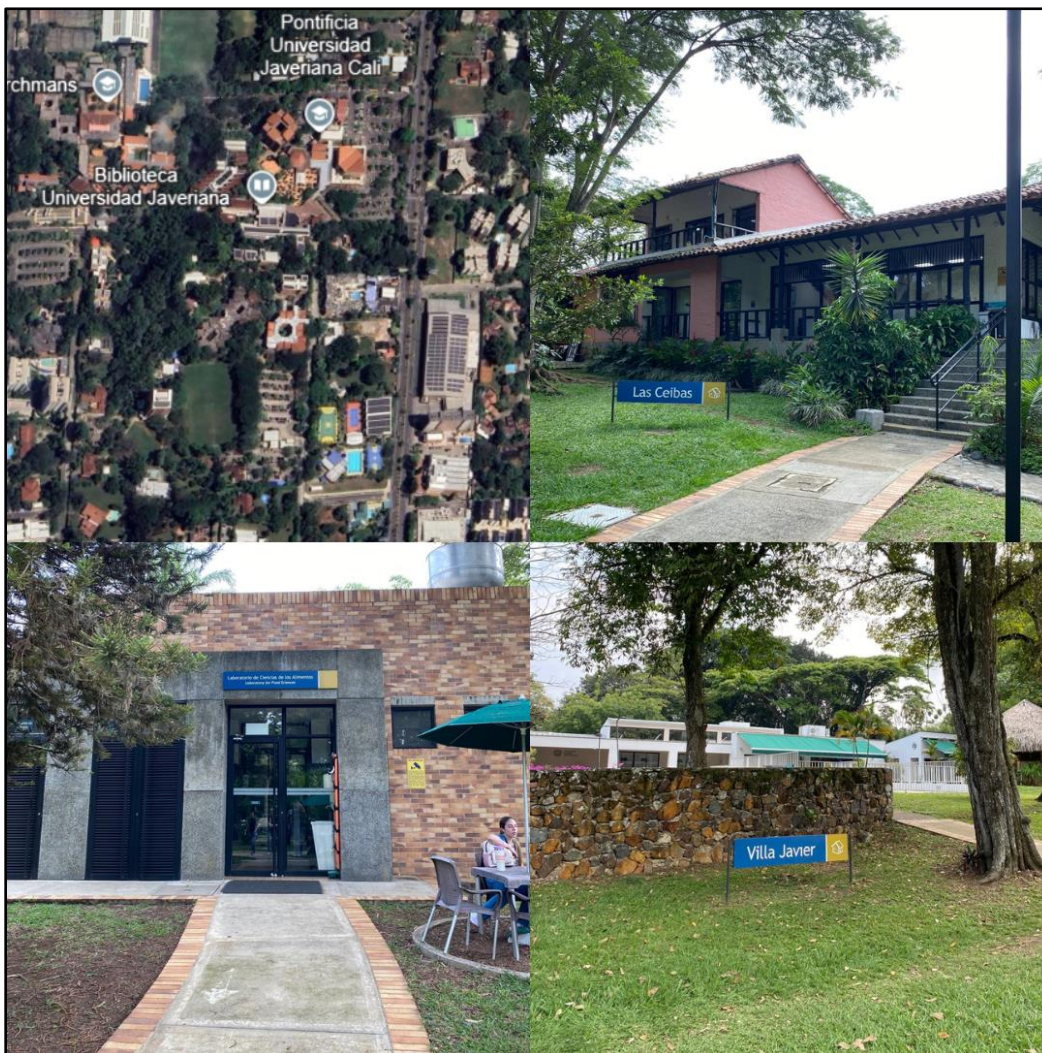


Ilustración 1. Vista en planta PUJ y edificaciones de interés

2. ANTECEDENTES

La Pontificia Universidad Javeriana Cali ha estado concientizada con el cuidado del recurso hídrico, para preservar el agua mediante acciones encaminadas al aprovechamiento eficiente del mismo y a su tratamiento correcto para diversos usos. Lo anterior se plantea para que la comunidad universitaria tenga las condiciones óptimas para aprovechar los recursos naturales y generar conciencia para que la comunidad Javeriana se involucre en estos procesos y se pueda generar una apropiada cultura ambiental. La Universidad se sitúa en el área del Rio Pance, en la vertiente oriental de la Cordillera occidental, las derivaciones No 4 y 5 del Rio Pance pasan por el campus, con una longitud de 1190 metros, siendo una de las numerosas acequias de esta cuenca, la cual se constituye como el principal abastecedor de aguas para predios. La Pontificia Universidad Javeriana Cali cuenta con cuatro lagos o reservorios, con un área total de 31.439 m² que sirven como reguladores hídricos y hoy están catalogados por la Autoridad Ambiental como humedales, dichos humedales pueden ser observados en la Ilustración 2; según la Resolución 4133.0.21.055 de 2018 “por medio de la cual se actualiza la red hídrica de las comunas 18, 19, 20 y 22 de la zona urbana del Municipio de Santiago de Cali, se actualiza el inventario de humedales de toda la zona urbana y se dictan otras disposiciones”.

Actualmente dentro de la universidad se encuentra un programa de gestión de recursos hídricos el cual incluye los subprogramas de:

- Manejo de concesión de aguas de la universidad gestión de recursos, la Universidad Javeriana debido a la concesión reglamentada por el DAGMA la cual es la autoridad ambiental de la ciudad cuenta con un abastecimiento de aguas, cuyo trazado antiguamente era para abastecer a las fincas ganaderas que existieron antes en este sector, previo al proceso de urbanización. Este subprograma aborda el manejo de las acequias, monitoreo de caudales para la prevención de inundaciones, manejo de los humedales alimentados por una de las acequias internas y el que se forma gracias al rebose del acueducto, implementación de infraestructuras como desarenadores, sensores de turbidez y automatización de compuertas. Se propone la incorporación de filtros, lechos de secado, cloración, sistemas de medición y automatización para garantizar un abastecimiento eficiente y sostenible del agua todo siendo parte del proyecto de acueducto universitario.

- Subprograma de aguas lluvias, la mayor parte de los techos, terrazas y plazoletas que se encuentran dentro de la universidad cuentan con instalaciones para la captación y conducción de aguas lluvias. Para que a futuro se pueda construir gradualmente un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias, que pueda utilizarse para riego de campos y jardines, y si se presenta escasez de agua, esta alimenta el agua a tratarse en el acueducto.
- Subprograma de manejo de aguas residuales, este abarca los proyectos de monitoreo de aguas grises y negras donde se pretende reemplazar o sustituir jabones líquidos y sólidos por productos ecológicos de limpieza, además de la actualización de tuberías el cual abarca la separación de aguas grises y aguas negras, separación de aguas lluvias y aguas residuales, manejo de aguas de laboratorios y plantas de tratamiento de aguas residuales del campus (PTARS).

Siguiendo los lineamientos de sostenibilidad de la universidad, se propone implementar un proyecto piloto de humedal artificial de tratamiento de aguas residuales que trataría las aguas desembocadas por los edificios de acacias y el centro de bienestar, con el fin de remover sus contaminantes y poderse reutilizar (Pontificia Universidad Javeriana Cali, s.f.).



Ilustración 2. Humedales existentes en el campus

3. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto busca optimizar la infraestructura de saneamiento en la Pontificia Universidad Javeriana Cali, de modo que se pueda aliviar la carga de contaminantes sobre el sistema de alcantarillado antes de que se descarguen a los cuerpos de agua, reduciendo los impactos negativos al ecosistema y la salud humana. Dicha optimización sería una solución natural que promueve el desarrollo sostenible, eliminando contaminantes y mejorando la calidad del agua. Además, permitiría una reutilización del agua tratada para fines no potables, como el riego a áreas verdes, la limpieza de espacios comunes, etc., la cual reduciría la demanda de agua potable, que en tiempos de fenómeno del niño se torna escasa, promoviendo así la sostenibilidad ambiental dentro del campus universitario. Adicionalmente, habría un aporte estético a la universidad, puesto que los humedales pueden llegar a tener un componente paisajístico atractivo para la comunidad javeriana.

Desde un enfoque educativo, la implementación de este humedal también podría servir como un recurso didáctico y de investigación para estudiantes y profesores de áreas afines a la ingeniería, el medio ambiente y la gestión del agua. La construcción de un humedal de tratamiento proporcionaría una herramienta tangible para el estudio de procesos ecológicos, hidrológicos y ambientales, favoreciendo la generación de nuevo conocimiento en torno a tecnologías sostenibles. Por lo tanto, este proyecto no solo responde a una necesidad funcional, sino que también ofrece múltiples beneficios a nivel académico, ambiental y social.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Diseñar un humedal como sistema de tratamiento primario para reducir la carga contaminante del agua residual de las edificaciones de Villa Javier, Laboratorio de Nutrición y Casa Ceibas, para su posible reutilización previa a la disposición final.

4.2. Objetivos específicos

- Hacer el levantamiento y realizar el diagnóstico del estado actual del sistema de alcantarillado de Villa Javier, el Laboratorio de Nutrición y Casa Ceibas.
- Caracterizar la calidad del agua residual del sistema de alcantarillado.
- Estimar el caudal de agua residual del sistema y su variación en el tiempo.
- Modelar el comportamiento del humedal planteado en EPA SWMM.
- Definir presupuesto para la construcción o futura construcción del humedal.

5. METODOLOGÍA

En esta sección se presentarán las metodologías empleadas para el diseño de distintas alternativas de humedales de tratamiento de agua residual. Estas alternativas incluyen el humedal de flujo libre o superficial, caracterizado por permitir el movimiento del agua sobre la superficie del sustrato; el humedal de flujo horizontal, donde el agua fluye de manera subterránea a través del medio filtrante; y el humedal de flujo vertical tipo francés, reconocido por su capacidad para manejar mayores cargas hidráulicas y su diseño en múltiples etapas para optimizar la eficiencia del tratamiento.

5.1. Alternativas de diseño de humedales

Para el diseño del humedal artificial se tuvo presente la información proporcionada en el capítulo 5 del libro “Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América latina”. Este capítulo presenta una descripción general de los humedales artificiales, sus características, tipos y procesos de tratamiento. Adicionalmente del libro “Soluciones basadas en la naturaleza (SBN) para tratamiento de aguas residuales” se extraen los porcentajes de eficiencia de tratamiento para cada uno de los métodos, dichos porcentajes de eficiencia se mostrarán en la Tabla 1.

Tabla 1. Eficiencias de tratamiento para diferentes contaminantes

| Tipo humedal | DQO | DBO5 | NT | N-NH4 | PT | SST |
|---|--------|------|--------|--------|--------|------|
| Flujo libre efluente | 41-90% | 54% | 30-80% | 73% | 27-60% | - |
| Flujo horizontal efluente | 60-80% | 65% | 30-50% | 20-40% | 10-50% | >75% |
| Flujo vertical tipo francés efluente | >90% | 93% | 20-60% | 60-90% | 10-22% | >90% |

5.1.1. Humedal de flujo superficial

Los humedales de flujo superficial efluente son un tipo de humedal artificial usado para tratar las aguas residuales, que se introducen en el humedal de un extremo al otro fluyendo libremente por la superficie del humedal. Estos funcionan mediante una serie de procesos biológicos que ocurren en el agua y en el suelo del humedal como lo serían la Filtración, Oxidación y Absorción por las plantas macrófitos.

De las eficiencias mostradas en la Tabla 1 se deberá escoger el contaminante dependiendo de cuál sea aquel que predomina en el agua a tratar para obtener la concentración de efluente necesaria para los cálculos del humedal, este tipo de humedal cuenta con tres métodos para el cálculo los cuales son KC, KC* y PKC* (el origen de estas siglas fue atribuido por los autores Kadlec, R.H. and Knight, R.L. en 1996) donde son necesarios datos como la concentración del efluente ya mencionada, la concentración de afluente que será obtenida del análisis de agua residual, la concentración de fondo para diferentes contaminantes, la porosidad del sustrato filtrante, la profundidad de la lámina de agua y el caudal. Una imagen de referencia del humedal de flujo libre efluente se puede observar en la Ilustración 3.

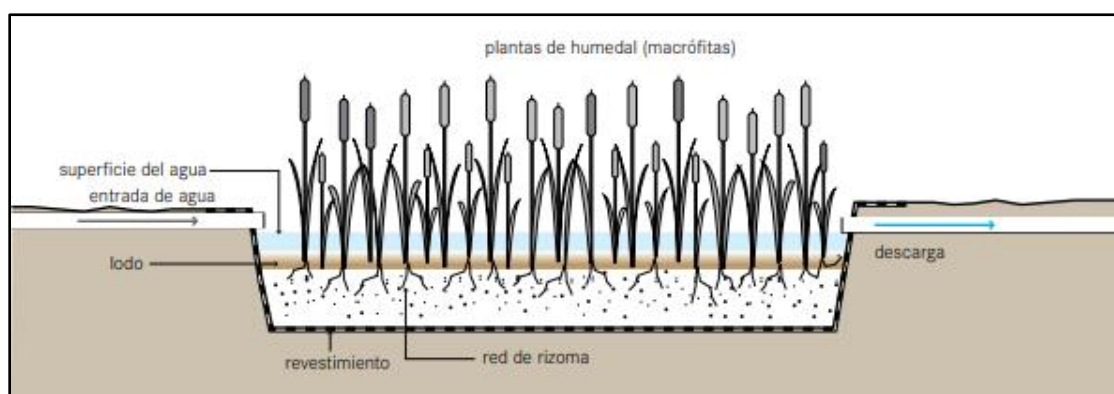


Ilustración 3. Humedal Flujo Libre [1]

5.1.1.1. Método KC

Este método sigue una cinética de primer orden, involucra una constante de reacción que depende de la temperatura, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\ln \frac{C_a}{C_e} = K_t * TRH$$

Dónde:

- C_a : Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- C_e : Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- K_t : Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹
- TRH : tiempo de retención hidráulico, d

Se debe tener en cuenta que los detritos de las plantas y otras sustancias orgánicas presentes de manera natural contribuyen con DBO5 y nutrientes al sistema, por lo que existe una concentración de fondo por debajo de la cual no se deben diseñar estos sistemas. En la Tabla 2 se encuentran los valores guía de dichas concentraciones de fondo

Tabla 2. Concentraciones de fondo para varios contaminantes (HFS - KC)

| Contaminante | Concentración de fondo (mg/l) | |
|--------------|-------------------------------|--------|
| | Rango | Típico |
| DBO5 | 2-8 | 5,0 |
| NH4 | 0,2-1,5 | 1,0 |
| NO3 | <0,1 | <0,1 |

$$K_t = K_{20} * \theta^{(T-20)}$$

Dónde

- K_{20} : Constante de reacción de primer orden a 20°C, d⁻¹
- θ : Coeficiente de temperatura, adimensional
- T: temperatura del agua, °C

Las constantes K_t y θ para varios contaminantes se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de K20 y θ

| Contaminante | K20 | θ |
|--------------|--------|----------|
| DBO5 | 0.678 | 1.06 |
| NH4+ | 0.2187 | 1.048 |
| NO3- | 1 | 1.15 |

El Tiempo de retención hidráulico del sistema se calcula con la siguiente ecuación:

$$TRH = \frac{L * W * y * n}{Q}$$

Dónde:

- L: Longitud de la celda de humedal, m

- W: Ancho de la celda de humedal, m
- y: Profundidad de la lámina de agua, m
- n: Porosidad del sustrato filtrante, expresado como decimal.
- Q: Caudal promedio del sistema, m³/d.

El caudal de entrada al sistema puede variar con respecto al de salida debido a factores como las pérdidas por evapotranspiración y las ganancias por precipitación. Por esta razón, es aconsejable determinar el caudal promedio del sistema utilizando datos recopilados de forma local. Sin embargo, para un diseño inicial, se puede asumir que el caudal de entrada y el de salida son equivalentes.

Por lo tanto, se puede establecer una ecuación que facilite el cálculo del área superficial requerida para un humedal de flujo libre.

$$A_s = \frac{\ln\left(\frac{C_a}{C_e}\right) \cdot Q}{K_T \cdot y \cdot n}$$

Dónde:

- A_s : Área superficial del humedal, m²

5.1.1.2. Método KC*

Este método, propuesto por Kadlec y Knight en 1996, se diferencia del anterior al considerar tanto la concentración de contaminantes presentes como aquellos generados dentro del humedal. Debido a esto, establece concentraciones mínimas por debajo de las cuales no es posible mejorar la calidad del agua residual tratada. Además, el enfoque incluye constantes de reacción por unidad de superficie, las cuales, en el caso de ciertos contaminantes, están influenciadas por la temperatura. La fórmula general del modelo es la siguiente:

$$\ln\left(\frac{C_e - C^*}{C_a - C^*}\right) = \frac{-K_T}{q}$$

Dónde:

- q = Carga hidráulica, m/d
- K_T : Constante de reacción de primer orden, m/año

- C_a : Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- C_e : Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- C^* : Concentración de fondo del contaminante, mg/l o UFC/100ml

Para el caso de los SST y la DBO5 se recomienda utilizar las siguientes ecuaciones para calcular la concentración de fondo en función de la concentración afluente al sistema:

$$\text{Para DBO}_5: C^* = 3.5 + 0.053 * C_a$$

$$\text{Para SST: } C^* = 5.1 + 0.16 * C_a$$

En la Tabla 4 se presentan los valores de K_T y θ para los contaminantes.

Tabla 4. Valores de K20 y θ para varios contaminantes (HFSS-KC*)

| Contaminante | K20 | θ |
|--------------|------|----------|
| DBO5 | 34 | 1.00 |
| SST | 1000 | 1.00 |
| NT | 22 | 1.09 |

5.1.1.3. Método PKC*

Este enfoque, desarrollado en 2009, combina un modelo hidráulico de tanques en serie (TIS) con la variable PTIS y una cinética de primer orden basada en el modelo KC*. En este contexto, PTIS representa el número aparente de tanques donde una mezcla de contaminantes se degrada más lentamente que los contaminantes individuales. Este valor es menor que el número N del modelo TIS, que está relacionado con la hidráulica del sistema y el tiempo de retención hidráulico, ya que los compuestos orgánicos se desplazan más despacio que el agua residual dentro del humedal. El modelo general de diseño se presenta en la siguiente ecuación:

$$\frac{(C_e - C^*)}{(C_a - C^*)} = \frac{1}{(1 + k / (PTISq))^P}$$

Dónde:

- C_e : concentración en el efluente del humedal, mg/l
- C_a : concentración en el afluente, mg/l
- C^* : concentración de fondo, mg/l

- k : constante de tasa superficial de primer orden, m/d
- $PTIS$: numero aparente de tanques en serie
- q : Carga hidráulica, m/d

Reorganizando la ecuación se puede obtener una expresión para calcular el área necesaria de humedal de tratamiento para conseguir una determinada concentración de un contaminante en el efluente del sistema:

$$A_s = \frac{Q * PTIS}{k} \left[\left(\frac{C_a - C^*}{C_e - C^*} \right)^{\frac{1}{PTIS}} - 1 \right]$$

Dónde:

- A_s : Área superficial del humedal, m²
- Q : Caudal, m³/d

Posteriormente, se procede con el cálculo de la constante de reacción de primer orden (K_T : m/año) que se obtiene con la siguiente fórmula:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali y el K_{20} que se obtiene de la Tabla 5.

Tabla 5. Valores de K_T , C^* , θ y $PTIS$ para varios contaminantes (HFSS – PKC*)

| Contaminante | K_{20} (m/año) | θ | C^* | $PTIS$ |
|--------------------|---------------------|----------|-------|--------|
| DBO5 (3-30mg/l) | 33 | 0.985 | 2 | 1 |
| DBO5 (30-100mg/l) | 41 | 0.985 | 5 | 1 |
| DBO5 (100-200mg/l) | 36 | 0.985 | 10 | 1 |
| DBO5 (>200mg/L) | 189 | 0,985 | 20 | 1 |

Posteriormente, teniendo presentes los valores de K_T y $PTIS$ se indexan en la fórmula de área superficial mencionada anteriormente para conocer dicho valor.

5.1.2. Humedal de flujo horizontal

Estos humedales son un tipo de humedal artificial para el tratamiento de las aguas residuales, similar al descrito anteriormente, a excepción de que el agua en este caso fluye de un extremo al otro de forma horizontal a través del sustrato del humedal. En los humedales de flujo horizontal se tiene valores de eficiencia diferentes al de flujo libre, aunque su diseño sea semejante. Con los porcentajes mostrados en la Tabla 1 se calculará la concentración de efluente y de manera similar al humedal de flujo libre se calculará el área del humedal mediante los mismos métodos y las mismas variables que el anterior tipo de humedal. una imagen representativa se puede observar en la Ilustración 4

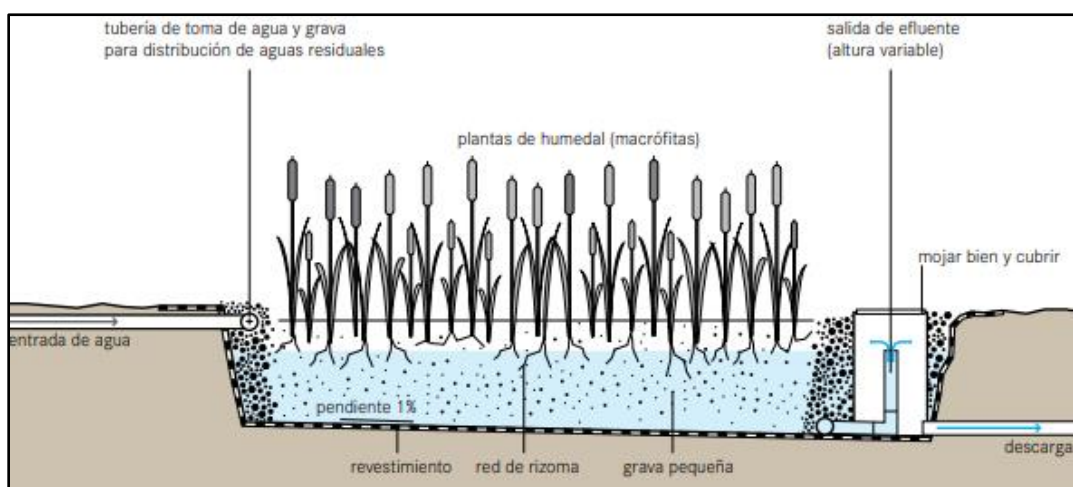


Ilustración 4. Humedal Flujo Horizontal [2]

Paralelamente, el humedal de flujo horizontal se basa en los mismos métodos de diseño expuestos anteriormente para el humedal de flujo libre, a excepción de unas variaciones que se mostrarán a continuación.

5.1.2.1. Método KC

La única diferencia entre este método y el del humedal de flujo libre es la magnitud de la porosidad (n) y de la constante KT , en este tipo de humedales la porosidad varía con el tipo de relleno usado y puede ser medida por los procedimientos ya estipulados y puede ser observada en la Tabla 6.

Tabla 6. Características típicas de los medios para humedales horizontales

| Tipo de material | Tamaño efectivo D10 (mm) | Porosidad, n (%) | Conductividad hidráulica, ks (m ³ /m ² /d) |
|------------------|--------------------------|------------------|--|
| Arena gruesa | 2 | 28-32 | 100-1000 |
| Arena gravosa | 8 | 30-35 | 500-5000 |
| Grava fina | 16 | 35-38 | 1000-10000 |
| Grava media | 32 | 36-40 | 10000-50000 |
| Roca gruesa | 128 | 38-45 | 50000-250000 |

En cuanto a la constante de reacción se puede obtener a partir de la Tabla 7.

Tabla 7. Valores de KT y θ para varios contaminantes

| Contaminante | K20 | θ |
|--------------|----------------------------|----------|
| DBO5 | 1,104 | 1,06 |
| NH4 | 0,01854 + 0,3922 rz 2,6077 | 1,048 |
| NO3 | 1 | 1,15 |

Donde:

- rz: Profundidad del lecho ocupada por la rizosfera, expresado como decimal.

5.1.2.2. Método KC*

Este método para los humedales de flujo subsuperficial es similar al presentado para los humedales de flujo libre, la diferencia radica en la constante de reacción KT, los valores de θ y de C*. En la Tabla 8 se presentan los valores de KT y θ para varios contaminantes.

Tabla 8. Valores de KT y θ para varios contaminantes

| Contaminante | K20 (m/año) | θ |
|--------------|-------------|----------|
| DBO5 | 180a | 1.00a |
| SST | 3000a | 1.065a |
| NT | 27a | 1.05a |

Para el caso de los SST se recomienda utilizar la siguiente ecuación en función de la concentración afluente al sistema:

$$\text{Para SST: } C^* = 7.8 + 0.063 * C_a$$

5.1.2.3. Método PKC*

Este método para los humedales de flujo horizontal es similar al presentado para los humedales de flujo libre, la diferencia está en la constante de reacción KT , los valores de θ y de C^* . En la Tabla 9 se presentan los valores de KT y θ para varios contaminantes.

Tabla 9. Valores de KT , C^* , θ y $PTIS$ para varios contaminantes

| Contaminante | K_{20} (m/año) | θ | C^* | $PTIS$ |
|--------------------|---------------------|----------|-------|--------|
| DBO5 (3-30mg/l) | 86 | 0.981 | 1 | 3 |
| DBO5 (30-100mg/l) | 37 | 0.981 | 5 | 3 |
| DBO5 (100-200mg/l) | 25 | 0.981 | 10 | 3 |
| DBO5 (>200mg/L) | 66 | 0,981 | 15 | 3 |

Con la información contenida en la anterior tabla se puede obtener el área necesaria de humedal de flujo subsuperficial para lograr una determinada concentración del contaminante objetivo (DBO, NTK o CF) empleando la ecuación de área superficial expuesta en el método PKC* del humedal de flujo libre.

5.1.3. Humedal de flujo vertical tipo francés

Los humedales de flujo vertical de tipo francés son una variante de los humedales de flujo vertical. Se diferencian en que el agua residual se introduce en el humedal de forma intermitente, en lugar de forma continua. Este método de alimentación intermitente permite que el sustrato se oxigene adecuadamente, lo que es importante para la actividad de los microorganismos que degradan los contaminantes, una imagen representativa de este humedal se puede observar en la Ilustración 5.

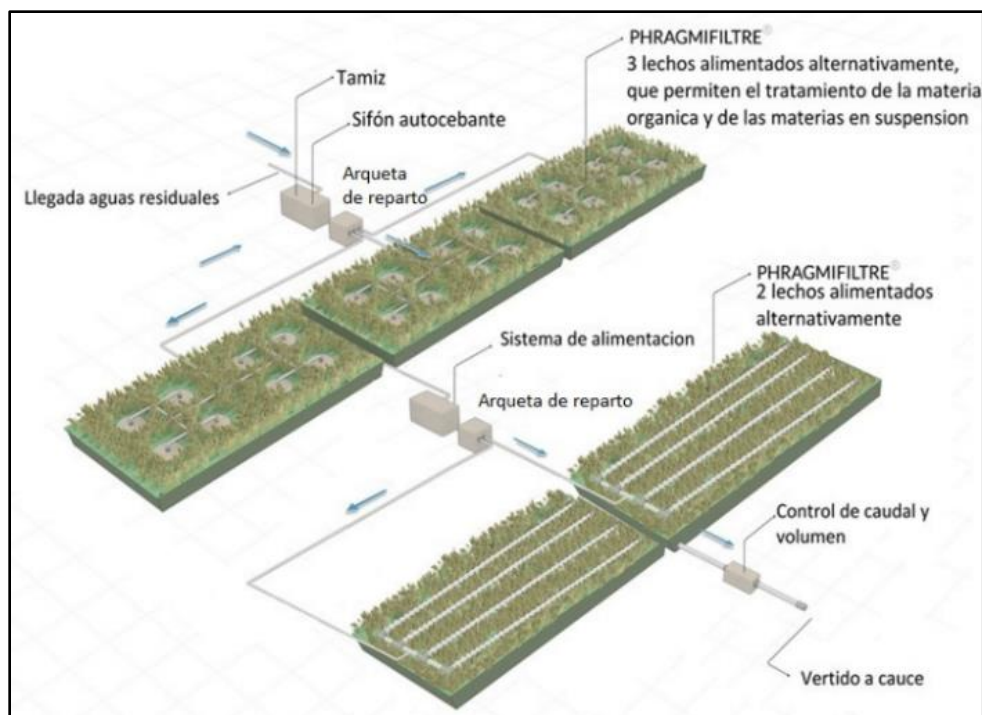


Ilustración 5. Humedal Flujo Vertical Tipo Francés [3]

En Francia, se han introducido y aplicado con éxito humedales de FV para el tratamiento de aguas residuales crudas. Estos sistemas tratan los lodos y las aguas residuales en un solo paso. Los humedales de FV tipo francés se componen de dos etapas, y cada etapa contiene celdas que operan alternadamente. En una primera etapa se realiza el tratamiento de los lodos, la retención de sólidos, la eliminación parcial de materia orgánica y nitrificación. En la segunda etapa, se produce la eliminación final de materia orgánica y nitrificación. El lodo tratado de la primera etapa se acumula a una tasa de aproximadamente dos a tres cm por año cuando el sistema funciona con la carga de diseño. La capa retenida en la superficie debe retirarse una vez alcance una profundidad aproximada de 20 cm, que en la práctica suele ser cada 10 a 15 años. La capa de depósito puede acumularse más lentamente en sistemas que no reciben la carga de diseño completa al inicio de la operación.

Para el diseño de este humedal en los siguientes apartados de este informe se tendrá en cuenta el Capítulo 5 *Humedales de flujo vertical tipo francés* de la literatura “Humedales Para Tratamiento” que expone todos los parámetros de diseño de este. Considerando en primer lugar que un aspecto importante del sistema es su simplicidad. Aparte de la malla y los filtros en las dos etapas, no existen otras unidades de tratamiento: no hay tanques para tratamientos primarios o

anaerobios, no hay otro tratamiento biológico, no hay tanques de sedimentación secundarios o unidades similares y no hay unidades de tratamiento de lodos.

En los humedales de flujo vertical tipo francés, los filtros operan de forma alterna, alternando entre alimentación y descanso, lo que es esencial para su correcto funcionamiento. Esta alternancia controla el crecimiento de biomasa en la superficie del medio filtrante, mantiene condiciones aerobias dentro del lecho y facilita la mineralización de la materia orgánica acumulada en la primera etapa. Generalmente, los filtros de la primera etapa se alimentan por 3,5 días y descansan por 7 días, mientras que los de la segunda etapa se alimentan y descansan por igual tiempo (3,5 días), un esquema de este sistema de alternancia en la primera etapa puede visualizarse en la Ilustración 6. Este patrón requiere visitas del operador al menos dos veces por semana para cambiar la alimentación y garantizar el buen funcionamiento del sistema, aunque la automatización con un controlador lógico programable podría reducir estas visitas.

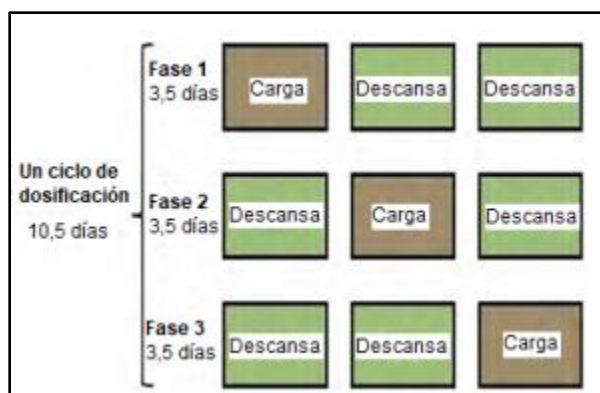


Ilustración 6. Esquema operativo de la primera etapa del sistema francés. [4]

5.1.3.1. Dimensionamiento humedal de flujo vertical tipo francés

El diseño está basado en cargas máximas de contaminantes e hidráulicas, que se expresan por m^2 de filtro en funcionamiento por día, como se puede observar en la Tabla 10. Para situaciones típicas en Francia, este diseño lleva a un requisito de área de $0,4 m^2/hab\text{-}eq$ para cada celda de filtro, o en otras palabras, $1,2 m^2/hab\text{-}eq$ para la primera etapa (con tres celdas) y $0,8 m^2/hab\text{-}eq$ para la segunda etapa (con dos celdas). La carga diaria de una $hab\text{-}eq$ se define como 150 L de aguas residuales, 157 g DQO, 60 g DBO₅, 72 g SST, 11,5 g N-NH₄, y 2,1 g PT.

Tabla 10. Cargas máximas de diseño para el diseño clásico de humedales de FV tipo francés

| Etapa de tratamiento | HLR (m ³ /m ² *d) | DQO (g/m ² *d) | DBO5 (g/m ² *d) | TSS (g/m ² *d) | NTK (g/m ² *d) |
|----------------------|---|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Primera etapa | 0,37 | 350 | 150 | 150 | 30 |
| Eliminación | | 0,80 * Mi | 0,90 * Mi | 0,90 * Mi | 1,1128 * Mi ^{0,8126} |
| Segunda etapa | 0,37 | 70 | 20 | 30 | 15 |
| Eliminación | | 0,75 * Mi | 0,80 * Mi | 0,80 * Mi | 1,194 * Mi ^{0,8622} |

Las tasas de carga especificadas son para un filtro en funcionamiento. Al comparar las tasas de carga aplicadas en otros sistemas de tratamiento, estos valores deben dividirse por tres en la primera etapa y por dos en la segunda etapa para tener en cuenta toda el área de tratamiento. Los sistemas tratan las aguas residuales domésticas cribadas por rejillas para retener gruesos. Los filtros de la primera etapa son eficaces para la eliminación de materia orgánica y SST. Los filtros de la segunda etapa tienen un efecto de pulido para DQO, DBO5 y SST. Diseñar y operar humedales dentro de las características de diseño recomendadas da como resultado sistemas que pueden garantizar concentraciones finales de efluentes de 90 mg DQO/L, 20 mg DBO5/L, 15 mg SST/L, y 15 mg NTK/L. Mientras que los compuestos orgánicos y los sólidos en suspensión siguen una tendencia de eliminación lineal, las eficiencias de eliminación de NTK son más complejas. Las ecuaciones proporcionadas permiten calcular las eficiencias de eliminación estimadas al operar los filtros dentro de las recomendaciones de diseño

5.1.3.2. Sistema de alimentación intermitente

La dosificación alternada en humedales de flujo vertical tipo francés es crucial para su correcto funcionamiento. Permite la descomposición de la materia orgánica, mantiene condiciones aerobias y evita el estrés hídrico en las plantas. Se realiza con un programa de alimentación específico y puede ser manual o automatizada con un controlador lógico programable (PLC).

Para asegurar que cada celda reciba agua de manera periódica, mientras que las otras celdas reposan es necesario de un:

- Tanque de alimentación: Almacena el agua residual pretratada.

- Bomba: Impulsa el agua residual desde el tanque de alimentación hacia las tuberías de distribución.
- Tuberías de distribución: Conducen el agua residual a cada celda del humedal.
- Válvulas: Controlan el flujo de agua residual hacia cada celda, permitiendo la dosificación alternada.
- Sensores de nivel: Monitorean el nivel del agua en cada celda y activan las válvulas para iniciar o detener la alimentación.

5.1.3.3. Tuberías de distribución

La distribución del afluente es diferente para las celdas de la primera y segunda etapa:

Primera Etapa:

- Se usan tuberías de gran diámetro para distribuir el agua residual.
- Al menos un punto de alimentación por cada 50 m².
- Diámetros de tuberías para una velocidad de flujo > 0.7 m/s y no menor a 90 mm para evitar bloqueos.
- Las tuberías están suspendidas para permitir la acumulación de lodos.
- Se necesita un flujo mínimo de 0.5 m³/h·m² por bache.

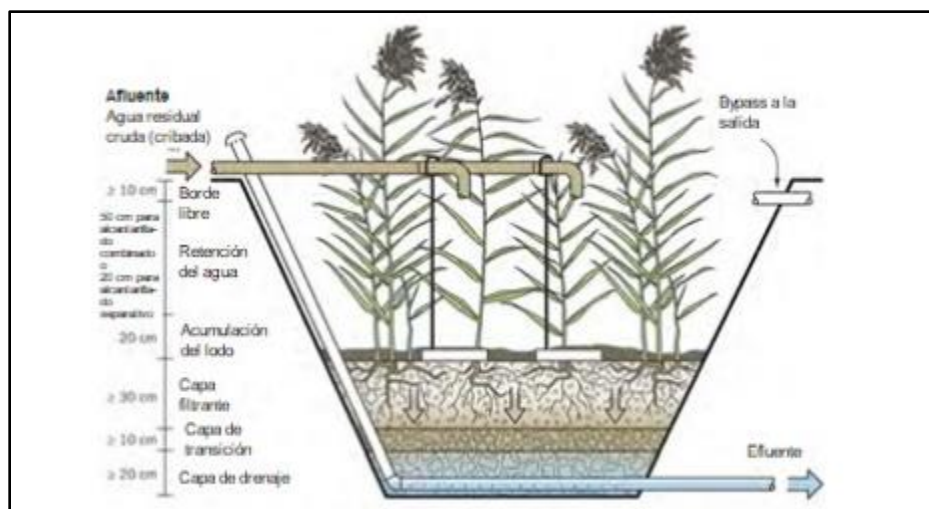


Ilustración 7. Filtro primera Etapa [5]

Segunda Etapa:

- Se alimentan con tuberías instaladas directamente sobre el filtro de la superficie.
- Al menos una perforación cada 2 m² de superficie filtrante.
- Diámetros de tuberías y perforaciones para limitar las diferencias de flujo < 10 %.
- Altura de chorro de al menos 25 cm en las perforaciones.
- Altura de chorro > 30 cm en los orificios más alejados.
- Oxigenación pasiva del fondo del filtro para mantener condiciones aerobias.

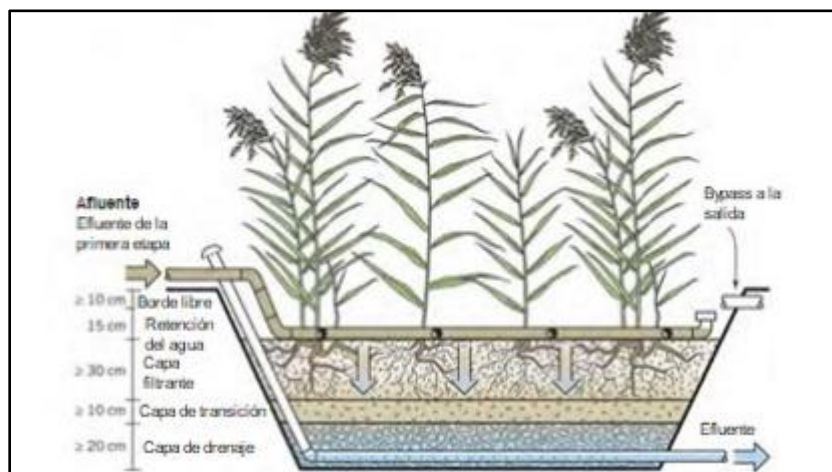


Ilustración 8. Filtro segunda Etapa [6]

Tuberías de Drenaje:

- Diámetro mínimo de 125 mm.
- Ranuras por cada 25 cm de longitud de tubería.
- Las ranuras deben tener una longitud de 1/3 de la circunferencia y aberturas > 8 mm.

5.1.3.4. Medio filtrante

Primera Etapa:

- Capa principal de 2-6 mm de grava para prevenir bloqueos y permitir la formación de una capa de lodo.
- Capa de transición de grava más grande (5-15 mm) para evitar el lavado de partículas finas hacia la capa de drenaje.

- Capa de drenaje de grava gruesa (20-60 mm) instalada a lo largo de las tuberías de

Segunda Etapa:

- Capa principal de arena con especificaciones ($0.25 < d_{10} < 0.4$; coeficiente de uniformidad < 5 ; menos de 3% de finos).
- Se requiere una capa adicional de arena si las especificaciones no cumplen con los criterios indicados.
- Capa de transición de grava (3-12 mm) y capa de drenaje de grava gruesa (20-60 mm) siguiendo la regla de Terzaghi ($D_{15}/d_{85} \leq 4$) y criterio de permeabilidad ($D_{15}/d_{15} \geq 4$) para mantener la permeabilidad y evitar disminuciones locales de porosidad.

5.1.3.5. Tipo de planta

Este sistema se basa en un buen establecimiento de las plantas, en particular, *Phragmites* sp, la cual puede ser observada en la Ilustración 9. A medida que se desarrolla la capa de materia orgánica en el depósito, las plantas desempeñan un papel esencial. Cuando los tallos de las plantas son movidos por el viento, contribuyen a abrir vías en la capa superior del lecho, lo que es crucial para mantener la capacidad de filtración y favorecer la aireación pasiva del filtro. Es de vital importancia evaluar si estas pueden cumplir con esta función y resistir períodos sin flujo de aguas residuales.



Ilustración 9. Planta *Phragmites* sp. [7]

6. DISEÑO

6.1. Intento preliminar

6.1.1. Localización del humedal

Inicialmente, se había planificado el diseño del humedal en una ubicación específica destinada a tratar las aguas residuales provenientes del área de Acacias. Sin embargo, durante la etapa de evaluación del sitio, se identificó la presencia de un grupo significativo de guaduas (*Bambusoideae*), una especie vegetal protegida por la normativa colombiana. La legislación vigente impide la tala de estas plantas debido a su importancia ecológica y ambiental. La conservación de estas guaduas es prioritaria y, por lo tanto, se decidió no proceder con el diseño del humedal en la ubicación inicial.

Este intento preliminar del humedal de tratamiento de aguas residuales se localizará en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, teniendo en cuenta una zona específica que, según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), debería ser en un terreno plano, con pendiente suave, preferiblemente natural para facilitar el flujo. También se requiere una ubicación cercana al punto que conecta las aguas residuales de los edificios de Acacias y Centro de Bienestar que son los edificios contemplados en este intento para hacer el respectivo tratamiento de sus aguas residuales, además se debe considerar el volumen de agua residual, ya que de éste dependerá el tamaño del humedal y la facilidad del transporte de materiales y equipos. Finalmente, se necesita que dicha localización tenga un equilibrio entre el desarrollo del proyecto y la protección ambiental, buscando soluciones que no impliquen la tala de árboles o la destrucción de hábitats. La localización previa en el plano e imágenes se presentan en la Ilustración 10 e Ilustración 11.

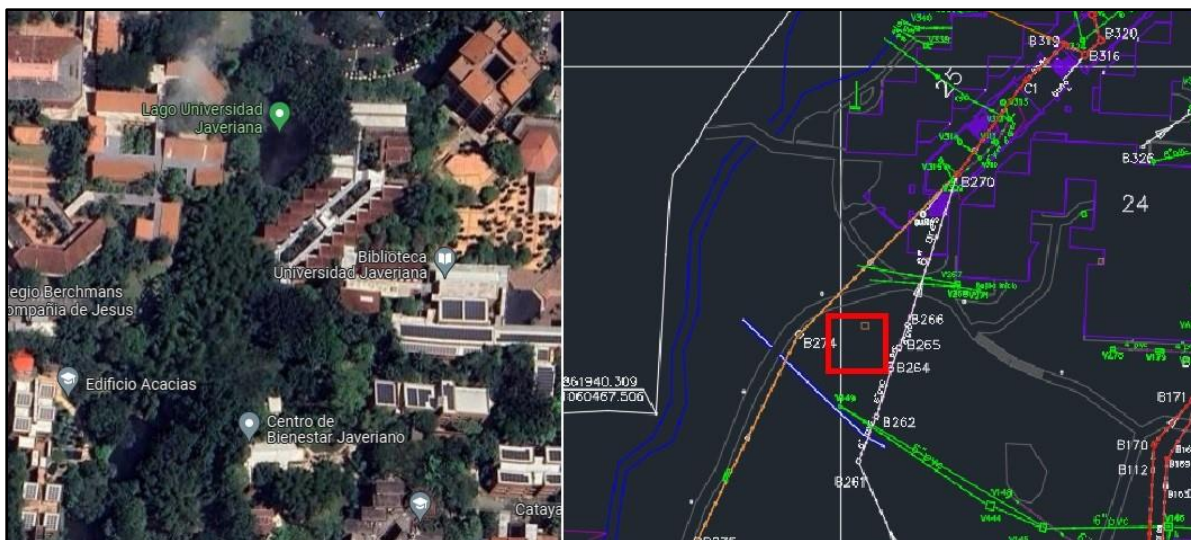


Ilustración 10. Localización preliminar del humedal de tratamiento de aguas residuales en la PUJ Cali



Ilustración 11. Vista en campo de la ubicación preliminar del humedal de tratamiento de aguas residuales PUJ Cali

6.1.2. Aforo de consumo de agua potable

El flujo de agua residual que transita por el sistema de alcantarillado se calcula usando el volumen de agua potable consumida como referencia. Estos datos pueden recolectarse mediante observación directa o lectura de los medidores instalados en los edificios de estudio dentro del Campus, que tienen una precisión de 0.02 metros cúbicos. Por ende, de manera preliminar, se

determinaron los contadores correspondientes a los edificios de Acacias y Centro de bienestar. Se identificó que el contador de Acacias hace referencia al consumo del restaurante Juan Tapas, además del restaurante Petete's salad & wraps y del edificio Acacias, una imagen del edificio se puede observar en la Ilustración 12 y una imagen del micromedidor del edificio se puede encontrar en la Ilustración 13.



Ilustración 12. Edificio Acacias



Ilustración 13. Micromedidor Acacias

Por otro lado, se tiene el contador del Centro de Bienestar el cual abarca a la cafetería Garittea, al edificio Los Guadales, y el edificio del Centro de Bienestar, los cuales pueden ser observados en la Ilustración 14 e Ilustración 15.



Ilustración 14. Edificio Centro de bienestar



Ilustración 15. Micromedidor Centro de bienestar

Al realizar los aforos del consumo de agua potable, se obtienen datos precisos sobre la cantidad de agua utilizada en el campus universitario. Estos datos de aforo resultan esenciales para calcular el caudal de agua residual que posteriormente será tratado por el humedal. De esta manera, con el caudal de agua residual definido, se posibilita dimensionar adecuadamente el humedal y diseñar un sistema de tratamiento que pueda ser gestionado de manera eficaz. Para lograrlo, resulta fundamental conocer la carga de contaminantes que el agua a tratar lleva consigo, aspecto que será evaluado mediante pruebas de laboratorio del agua residual. La obtención de los datos de consumo de agua en la universidad se llevó a cabo mediante el empleo de diversas metodologías.

Los datos presentados a continuación se consideran confiables, respaldados por registros de consumo de agua potable obtenidos de los contadores identificados como "Acacias" y "Centro de Bienestar". Estos registros fueron tomados durante una semana completa, excluyendo los lunes, sábados y domingo. Las mediciones se realizaron tanto en la mañana como en la tarde, con el propósito de garantizar la consistencia y precisión de los datos recopilados. Los aforos se realizaron en la semana del 19 de marzo del 2024 al 22 de marzo del 2024, esto para el edificio del Centro de bienestar en conjunto con el café Garittea, y para el edificio Acacias en conjunto con el restaurante Juan Tapas. Tomando como base los consumos hallados en campo se obtiene el caudal de agua potable diario de los edificios de interés, el valor de los aforos y los datos obtenidos de los mismos, al igual que los caudales calculados se pueden encontrar en la Tabla 11.

Tabla 11. Valores de mediciones en micromedidores y caudales.

| Valor de medición en el micromedidor (m3) | | | | | | | | |
|---|------------|------------------|------------|------------------|------------|----------------|------------|-------------|
| Edificio/Fecha | 19-mar | | 20-mar | | 21-mar | | 22-mar | |
| | Martes | | Miércoles | | Jueves | | Viernes | |
| Hora | 7:00 a. m. | 12:00 p. m. | 9:00 a. m. | 12:00 p. m. | 8:00 a. m. | 1:00 p. m. | 9:00 a. m. | 12:00 p. m. |
| Centro de Bienestar | 982.2 | 982.3 | 982.3 | 982.4 | 982.5 | 982.5 | 982.6 | x |
| Acacias | 1547.00 | 1547.4 | 1548.2 | 1548.5 | 1549.3 | 1549.7 | 1550.6 | x |
| Valor de medición de caudales aforados (m3/h) | | | | | | | | |
| Edificio | Martes | Martes-Miércoles | Miércoles | Miércoles-Jueves | Jueves | Jueves-Viernes | Max | |
| Centro de Bienestar | 0.02 | 0 | 0.0333 | 0.005 | 0 | 0.005 | 0.0333 | |
| Acacias | 0.08 | 0.04 | 0.1 | 0.04 | 0.08 | 0.04 | 0.1 | |

Después de saber los resultados, se hace un enfoque en el caudal de dotación de agua potable de mayor valor que en este caso es el del edificio Acacias, entonces se procede a realizar el caudal de aguas residuales de este sector. Se tiene en cuenta la siguiente norma de coeficiente de retorno evidenciada en la Tabla 12 de aguas residuales domesticas mencionadas en el RAS, de igual manera el valor de F debe de ser mayor o igual a 1.4 (D.3.3.5.1) y un coeficiente de retorno $Cr = 0.85$.

Tabla 12. Coeficiente de retorno de aguas residuales domésticas

| Nivel de Complejidad del Sistema | Coeficiente de retorno |
|----------------------------------|------------------------|
| Bajo y Medio | 0,8 |
| Medio Alto y Alto * | 0,85 |

Teniendo en cuenta la dotación de agua potable igual a $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ y los coeficientes de retorno y de mayoración, se procede a hallar el caudal de agua residual el cual tiene un valor de $0.12 \text{ m}^3/\text{h}$. Después de realizar todos los procesos para hallar el caudal de agua residual para propósitos del diseño del humedal, el valor de dicho caudal es el siguiente.

$$Residual = 0.12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 2.856 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} = 0.033 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Haciendo referencia al caudal residual hallado previamente haciendo uso de los aforos hechos en campo, se puede decir que el caudal residual en los dos puntos de la universidad (Acacias y Centro de Bienestar), no llegan al caudal mínimo de diseño mencionado en el RAS de 1.5 l/s . Entonces debido a que el valor del caudal es uno muy por debajo (0.027 l/s), comparado con el caudal mínimo de diseño (1.5 l/s), se decide utilizar un porcentaje de este caudal mínimo de diseño.

6.1.3. Visitas técnicas

Se realizaron dos (2) visitas técnicas al lugar del proyecto el cual es la Pontificia Universidad Javeriana Cali, en donde se procede a obtener la información y ubicación exacta de la red de tuberías de aguas residuales, las cajas de alcantarillado correspondientes a los edificios de Acacias y Centro de Bienestar y la ubicación de los medidores de agua potable para los edificios mencionados anteriormente. En la primera visita técnica en compañía de Julio, encargado de la planta de tratamiento de la universidad, se hace un recorrido donde se establece la ubicación exacta

de las cajas de agua residual de interés, así como de los contadores de agua potable y se recibe una capacitación acerca de cómo tomar la lectura de los datos de estos.

Consecuentemente, en la segunda visita teniendo clara la ubicación de las cajas de agua residual correspondientes a los edificios de Acacias y Centro de Bienestar, se procede a tomar muestras del agua de dos (2) cajas de aguas residuales en cuatro (4) recipientes diferentes (como se puede apreciar en la Ilustración 16), 2 de vidrio y 2 de plástico en los cuales uno de ellos contenía una pequeña cantidad de Ácido Nítrico (HNO_3) como preservante. Estas muestras se llevaron al laboratorio HIDROAMBIENTAL S.A.S de la ciudad de Cali donde le realizaron el respectivo análisis de contaminantes.



Ilustración 16. Toma de muestras de agua residual.

6.1.4. Diseño Aliviadero

Para que el caudal que ingresara al humedal fuera el requerido, se incluyó un aliviadero o vertedero de excesos. Este tipo de estructura es un conducto que permite la salida controlada de los caudales excedentes provenientes de un embalse o canalización, evitando así sobrecargas indeseadas en el sistema. Para poder saber las dimensiones del vertedero de excesos, se tomó información de las cajas de aguas residuales, su ubicación, sus cotas, la longitud de las tuberías entre ellas y el diámetro de estas, al igual que su pendiente.

Para poder realizar esto fue necesario hacer uso del anexo 12- Avance sanitario 2023, el cual es un levantamiento topográfico que incluye el sistema de alcantarillado y la ubicación de las

cajas de agua residual que se encuentran en la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Las Cajas de estudio son las de las Caja B275 a Caja B274 que se pueden evidenciar a continuación en la Ilustración 17. **Ubicación cajas de aguas residuales**

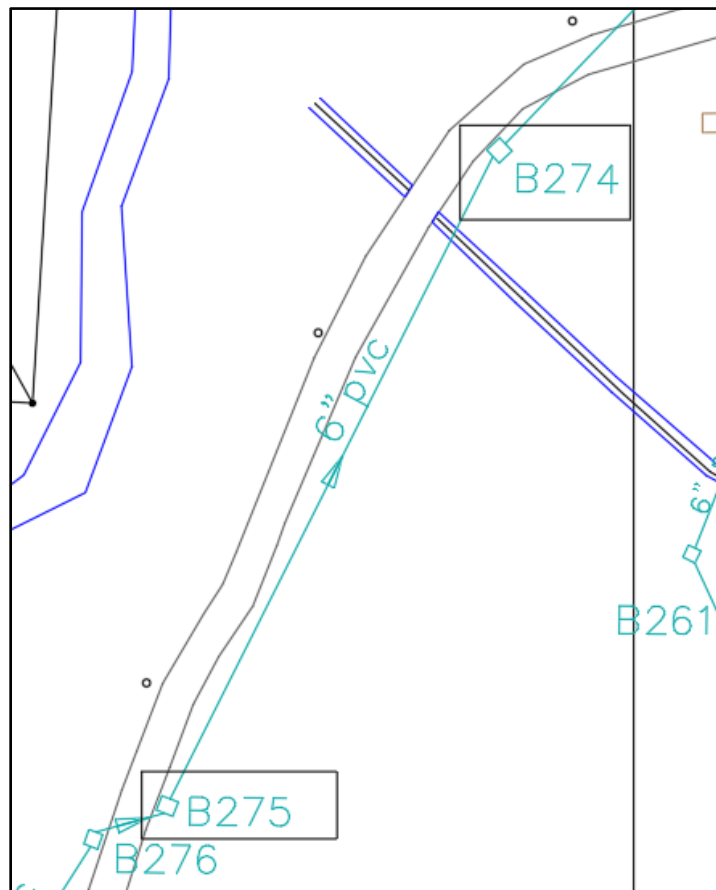


Ilustración 17. Ubicación cajas de aguas residuales

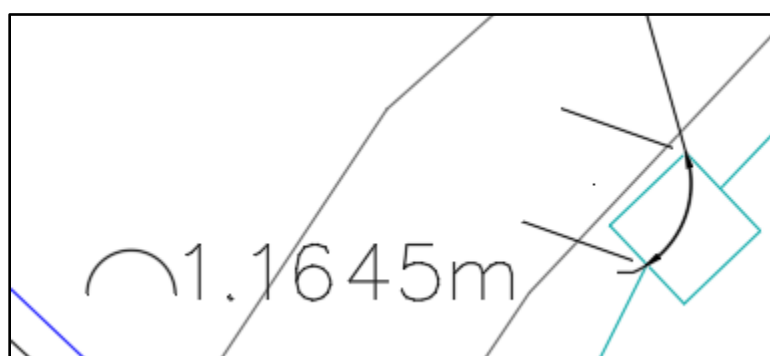
La cota de la Caja B275 es de 1013.40 msnm y el de la Caja B274 es de 1012.87 con una distancia de 38.840 metros, dando como resultado una pendiente de 1.36%. Dentro de los planos se especifica que el tubo de PVC es de 6" lo cual equivale a 0.152 metros. Para dicha tubería de 0.152 metros, se tienen los siguientes valores de caudal máximo y de diámetro máximo expuestos en la Tabla 13. **Caudal y diámetro full** que se calculan con las siguientes formulas donde el número de Manning correspondiente a una tubería en PVC es de $n: 0.009$.

$$D_{full} = \left(\frac{Q n 4^{5/3}}{k_n \pi S^{1/2}} \right)^{3/8} \quad Q_{full} = \frac{k_n \pi}{n 4^{5/3}} D_{real}^{8/3} S^{1/2}$$

Tabla 13. Caudal y diámetro full

| n | Qfull | Qfull | Dfull |
|----------|------------------------|--------------|--------------|
| | m³/s | L/s | m |
| 0.009 | 0.02680497 | 26.80 | 0.1524 |

El aliviadero debe de ir dentro de la caja B274, por lo que se decide colocarlo en forma de arco, el cual facilitará el desvío de las aguas residuales hacia la ubicación preliminar del humedal como se puede ver a continuación en la Ilustración 18. **Ubicación aliviadero**

**Ilustración 18. Ubicación aliviadero**

La longitud del aliviadero será de 1.1645 metros, por lo que continuando con el dimensionamiento del vertedero de excesos y sabiendo ya las cotas, la longitud de las tuberías, el diámetro, su Qfull, y teniendo los caudales de interés, los cuales son el 10% y 20% del caudal mínimo de diseño, se procede a hallar el Yn para dichos caudales, para poder determinar la altura del vertedero donde se utilizó la siguiente ecuación.

$$Q = CLH_{vert}^{3/2}$$

Para el 10% del Caudal mínimo de diseño se obtuvieron los siguientes valores para el aliviadero observados en la Tabla 14. **Dimensionamiento aliviadero 1**

Tabla 14. Dimensionamiento aliviadero 1

| | Q (m³/s) | y(m) | L(m) | Q/C*L | Hvert (m) |
|-----------------|----------------------------|-------------|-------------|--------------|------------------|
| Qall-Qar | 0.00135 | 0.03 | 1.165 | 0.000798 | 0.01 |
| QAR | 0.00015 | 0.01 | | | |

Para el 20% del Caudal mínimo de diseño se obtuvieron los siguientes valores para el aliviadero observados en la Tabla 15. **Dimensionamiento aliviadero 2:**

Tabla 15. Dimensionamiento aliviadero 2

| | Q (m3/s) | y(m) | L(m) | Q/C*L | Hvert(m) |
|-----------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|-----------------|
| Qall-Qar | 0.0012 | 0.03 | 1.165 | 0.000711 | 0.01 |
| QAR | 0.0003 | 0.01 | | | |

6.1.5. Diseño de humedales

Para el diseño de los tres humedales mencionados en la metodología se tuvieron en cuenta los siguientes factores, el primero, que debido a que caudal de agua residual aforado de 0.33 l/s era mucho menor que el caudal mínimo de 1,5 l/s de la norma de RAS; por recomendación fue mejor utilizar un 10% y 20% del caudal mínimo de diseño, para llevar a cabo el diseño del humedal no fueron utilizados porcentajes para no sobre diseñarlos y que de esta manera no se obtuvieran áreas muy grandes.

Porcentajes Caudal de diseño:

$$10\% * 1.5 \text{ l/s} = 0.15 \text{ l/s}$$

$$20\% * 1.5 \text{ l/s} = 0.3 \text{ l/s}$$

6.1.5.1. Diseño de humedal Flujo Superficial

Para el humedal de Flujo Superficial es necesario un pre tratamiento que ayude a limpiar el agua y sobre todo eliminar los sólidos debido a que este tipo de humedal por sus características no puede hacer esta remoción, este proceso se hará por medio de un desbaste de gruesos o un pozo séptico los cuales como se mencionó principalmente ayudaran a remover partículas sólidas dando así el correcto funcionamiento para el humedal, las dimensiones del humedal se determinarán para diferentes contaminantes por lo tanto se debe usar el contaminante de mayor existencia en el agua para diseñar este tipo de humedal. Para este tipo de humedales se utilizan los métodos KC, KC* Y PKC* expuestos en la metodología.

Método KC

El método involucra una constante de reacción que depende de la temperatura, concentraciones de los contaminantes, caudal, profundidad y la porosidad del sustrato filtrante, el área superficial en este método se ve regida por la siguiente ecuación:

$$As = \frac{\ln\left(\frac{Ca}{Ce}\right) \cdot Q}{K_T \cdot y \cdot n}$$

donde:

- Q: Caudal de entrada, m³/d
- Ca: Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- Ce: Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- K_T: Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹
- y: Profundidad de la lámina de agua, m
- n: Porosidad del sustrato filtrante, expresado como decimal.

Se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal Promedio del Sistema(m³/d): 25.92
- DBO5 Afluente (mg/l) (Ca): 143.99
- DBO5 Efluente (mg/l) (Ce): 66,23

El cálculo de la constante de reacción de primer orden dependiendo de la temperatura (K_T: d⁻¹) se obtiene con la siguiente fórmula:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali (Weather Spark) la cual es de 27°C y los valores de K₂₀ y θ se obtienen a partir de la Tabla 3 expuesta en la metodología.

Obteniendo así:

- K₂₀: 0.678
- θ: 1.06
- T (°C): 27
- K_T: 1.0195

Para la porosidad del sustrato filtrante en la literatura sugiere que para este tipo de humedales se utilicen valores entre el rango de 0.65 a 0.75 sugiriendo que permitan espacio para los tallos y residuos de la vegetación y que los valores más bajos de n serían utilizados para vegetación madura y densa obteniendo así un valor de n : 0.7. Posteriormente se realizan iteraciones variando la profundidad desde 0.1 m hasta 0.5 m como lo sugiere el método y se obtendrían los siguientes valores de área observados en la Tabla 16. **Iteraciones método KC:**

Tabla 16. Iteraciones método KC

| Iteración por profundidad | Prof. Lamina agua (m) | Área Superficial Humedal (m2) (As) |
|----------------------------------|------------------------------|---|
| Iteración 1 | 0,1 | 282 |
| Iteración 2 | 0,2 | 141 |
| Iteración 3 | 0,3 | 94 |
| Iteración 4 | 0,4 | 70,5 |
| Iteración 5 | 0,5 | 56,4 |

Determinada el área superficial, se calculará cual va a ser su largo y ancho con la siguiente ecuación:

$$L = \left(\frac{As * y^{\frac{8}{3}} * m^{\frac{1}{2}} * 86400}{a * Q} \right)^{2/3}$$

Donde:

- L: Largo máximo de la celda del humedal, m
- As: Área superficial del humedal, m²
- Q: Caudal entrada m³/d
- a : Factor de resistencia s*m^{1/6}
- m: pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal
- y: profundidad del agua en el humedal, m

Aquí se tuvo en cuenta m: 0.05, 5% de la pérdida de carga disponible, un a de 1,6 que corresponde a la profundidad escogida de 0.3m debido a que este humedal tendrá una vegetación moderada de donde se calcula L que da un total de 146,13 m con esta limitante se puede escoger

un largo de 11 m y un ancho de 9 metros los cuales arrojan una nueva As de 99 m² con la cual se procede a calcular la concentración de efluente con la siguiente formula:

$$C_e = C_a * e^{-Kt * \frac{L * W * y * n}{Q}}$$

Arrojando un valor de efluente real de 63,68 mg/L de DBO5 siendo este un valor menor al esperado en los datos de entrada.

Método KC*

Este método tiene en cuenta la concentración de contaminantes presentes y/o generados por el propio humedal. La ecuación general para hallar el área superficial se describe así

$$A_s = \frac{365 \cdot Q}{K_T} \ln \left(\frac{C_a - C^*}{C_e - C^*} \right)$$

dónde:

- Q: Caudal de entrada, m³/d
- Ca: Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- Ce: Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- K_T: Constante de reacción de primer orden, m/año
- C*: Concentración de fondo del contaminante, mg/l o UFC/100ml

Se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal Promedio del Sistema(m³/d): 25.92
- DBO5 Afluente (mg/l) (Ca): 143.99
- DBO5 Efluente (mg/l) (Ce): 66,23

El cálculo de la constante de reacción de primer orden (KT: m/año) se obtiene con la siguiente fórmula:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali (Weather Spark) la cual es de 27°C y los valores de K₂₀ y θ se obtienen a partir de la Tabla 4:

Obteniendo:

- K20:34
- θ : 1.00
- T (°C): 27
- KT: 34

El cálculo de la concentración de fondo del contaminante DBO5 (C^* :mg/l) se realiza así:

$$C^* = 3.5 + 0.053Ca$$

$$C^* = 3.5 + 0.053 * 143.99 = 11,13$$

Con esto se obtiene área superficial de 244.9 metros cuadrados, y se procede a obtener el largo máximo del humedal de igual manera que en el método KC:

$$L = \left(\frac{As * y^{\frac{8}{3}} * m^{\frac{1}{2}} * 86400}{a * Q} \right)^{2/3}$$

Obteniendo así un valor L de 276,64 m de aquí se escoge un largo de 17m y un ancho de 15m que dará un área de 255 m² y una relación largo- ancho de 1,13 que esta entre 1 y 3 como lo sugiere la literatura.

Con este nuevo valor se procede a calcular la concentración de efluente de la siguiente manera:

$$Ce = C^* + (Ca - C^*)e^{-\frac{KT*As}{365*Q}}$$

Que arrojaría un valor de 64,55 mg/L de DBO5 con este método.

Método PKC*

Este método maneja una combinación de tanques en serie (TIS) que incluye la variable PTIS con una cinética de primer orden basada en el modelo KC*. En este modelo PTIS representa el número aparente de tanques donde se van a tratar los contaminantes. La ecuación general para hallar el área superficial se describe así:

$$As = \frac{Q * PTIS}{k} \left[\left(\frac{Ca - C^*}{Ce - C^*} \right)^{\frac{1}{PTIS}} - 1 \right]$$

Donde:

- Q: Caudal de entrada, m³/d
- Ca: Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- Ce: Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- k: constante de tasa superficial de primer orden, m/d
- C*: concentración de fondo, mg/l
- PTIS: número aparente de tanques en serie

Se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal Promedio del Sistema(m³/d): 25.92
- DBO5 Afluente (mg/l) (Ca): 143.99
- DBO5 Efluente (mg/l) (Ce): 66,23

El cálculo de la constante de reacción de primer orden (KT: m/año) se obtiene con la siguiente fórmula:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali (Weather Spark) la cual es de 27°C y el K20 que se hallan a partir de la Tabla 5.

Con estos valores se obtiene un K20 de 189, un θ de 0,985 C* de 20 y PTIS (Tanques en serie) de 1. De aquí se calcula el valor de KT de la formula anteriormente mencionada que arroja un valor de 0,467. Con estos valores se puede calcular el As de este método que arroja un área de 1024,3 m² lo cual es un valor bastante grande mostrando un método que no es viables y poco eficiente por cuestiones de disponibilidad de espacio en el campus.

6.1.5.2. Diseño de humedal Flujo Horizontal

El humedal de flujo horizontal es usado para un tratamiento secundario de las aguas residuales, por lo que necesita de un tratamiento primario el cual se hará por medio de un desbaste de gruesos y/o un poso séptico, el cual ayudará a remover partículas sólidas y que el humedal tenga un correcto funcionamiento sin tener el riesgo de colmatarse. El humedal de flujo horizontal puede ser usado para remover diferentes tipos de contaminantes, pero el contaminante objetivo (contaminante con mayor concentración) será el que determine las dimensiones finales del humedal; al cual se le hará un análisis de eficiencia a través de la concentración obtenida en el

efluente. Los contaminantes encontrados en aguas residuales de la Universidad Javeriana se presentan a continuación en la Tabla 17:

Tabla 17. Cálculo de carga contaminante (EMCALI EICE ESP)

| CARACTERISTICAS DEL VERTIMIENTO | PUNTO 1 | PUNTO 2 |
|--|----------------|----------------|
| Caudal Promedio Vertido (l/s) | 346 | 422 |
| Concentración Promedio del Vertimiento | | |
| DBOs (mg/l) | 254 | 157.4 |
| SST (mg/l) | 240 | 58 |

Tratamiento primario

El tratamiento primario puede ser realizado mediante dos opciones, que son los pozos sépticos o tanques Imhoff. El criterio de elección entre ambos se determina por el número de habitantes. Normalmente los pozos sépticos son usados para poblaciones menores de 200 he (Habitante efectivo) mientras que los tanques Imhoff para poblaciones entre 200 y 500 he según Guía práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Por otro lado, haciendo uso del 10% del caudal de 1.5 L/S, resulta una población de 85 personas, dato con el cual será diseñado este pozo séptico.

Por medio de este sistema primario se espera obtener una eficiencia media de remoción de solidos suspendidos y demanda biológica de oxígeno superior al 30% partiendo desde el punto de entrada del pozo séptico hasta el punto de salida del sistema. En cuanto al diseño del pozo séptico, se debe determinar el volumen mínimo que ocupará el agua y los lodos, teniendo en cuenta que el caudal a tratar es de 0.15 L/S, que equivale a 12.96 m³/día. Se tiene:

$$V(m^3) = 0.75(12.96) + 4.5 = 14.22 m^3$$

Con base en la guía se tiene que el tiempo de retención hidráulica (TRH) mayores a 10 m³ son 2 días por lo que:

$$12.96 \frac{m^3}{dia} \times 2 dia = 25.92 m^3$$

Posteriormente, se debe determinar el volumen de lodos, que a su vez dependen de la tasa de acumulación y periodo entre vaciados. Según la guía, se cuenta con una tasa de acumulación estándar de 0.5 L/hab Dia, donde se tiene que:

$$V_{\text{lodos(annual)}} = 0.5 \frac{L}{\text{hab} \times \text{dia}} \times 85 \text{ hab} \times 365 \text{ dia} \times \frac{1\text{m}}{1000 L} = 15.51 \text{ m}^3$$

Consecuente a lo anterior, el volumen total es la suma de agua y los lodos por lo que:

$$V_{\text{total}} = 25.92 \text{ m}^3 + 15.51 \text{ m}^3 = 41.43 \text{ m}^3$$

Si bien la altura útil del agua es de 1m, se decide usar una altura del agua de 1.5m por lo que $\frac{25.92\text{m}^3}{1.5\text{m}^3} = 17.28 \text{ m}^2$, lo que hace referencia al área de superficie, además, seleccionando una relación de longitud/ancho de 3:1 se tiene que:

$$17.28 \text{ m}^2 = 3 \times A^2, \text{ Se tiene que } A = 2.4 \text{ m aprox } 2.5\text{m}$$

Recopilando los datos anteriores, se tienen las dimensiones y áreas de la fosa séptica:

$$L = 3 \times 2.5\text{m} = 7.5\text{m} \quad A = 2.5\text{m} \quad \& \quad \text{Superficie } T = 18.75 \text{ m}^2$$

Ahora, determinando la altura que van a tener los lodos será:

$$\frac{15.51\text{m}^3}{18.75\text{m}^2} = 0.83\text{m}$$

Añadiendo un resguardo de 0.3m, la profundidad total del estanque será:

$$H = 1.5\text{m} + 0.83\text{m} + 0.3\text{m} = 2.63\text{m aprox} = 2.7\text{m}$$

Finalmente, el pozo séptico tiene un volumen de:

$$V_{\text{pozo}} = 2.7\text{m} \times 7.5\text{m} \times 2.5\text{m} = 52.63\text{m}^3$$

Para el dimensionamiento del humedal horizontal se tomaron en cuenta 3 métodos que se describirán a continuación:

Método KC

Este método sigue una cinética de primer orden, involucra una constante de reacción que depende de la temperatura, por lo que el área superficial del humedal se describe así:

$$A_s = \frac{\ln\left(\frac{C_a}{C_e}\right) \cdot Q}{K_T \cdot y \cdot n}$$

donde:

- Q: Caudal de entrada, m³/d
- Ca: Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- Ce: Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- K_T: Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹
- y: Profundidad de la lámina de agua, m
- n: Porosidad del sustrato filtrante, expresado como decimal.

Se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal Promedio del Sistema(m³/d): 25.92
- DBO5 Afluente (mg/l) (Ca): 143.99
- DBO5 Efluente (mg/l) (Ce): 21.60

El cálculo de la constante de reacción de primer orden dependiendo de la temperatura (K_T: d⁻¹) se obtiene con la siguiente fórmula:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali (Weather Spark) la cual es de 27°C y los valores de K₂₀ y θ se obtienen a partir de la Tabla 7:

Obteniendo:

- K₂₀: 1.104
- θ: 1.06
- T (°C): 27
- K_T: 1.66

Posteriormente se eligió un relleno de grava fina, por su tratabilidad y disponibilidad en la región el cual viene asociado a una porosidad (n), tamaño efectivo de partículas y una conductividad hidráulica como se presenta en la Tabla 6:

Obteniendo:

- n: 0.35

Se hizo la iteración para varias profundidades de la lámina de agua obteniendo lo siguiente, dichas iteraciones se consignan en la Tabla 18:

Tabla 18. Iteraciones método KC

| Iteración por profundidad | Prof Lamina agua (m) | Area Superficial Humedal (m2) (As) |
|---------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Iteración 1 | 0,4 | 211,6 |
| Iteración 2 | 0,5 | 169,3 |
| Iteración 3 | 0,6 | 141,1 |

Una vez obtenido el área superficial, se determina cual va a ser su largo y ancho con la siguiente ecuación:

$$W = \frac{1}{y} \left(\frac{Q * As}{m * Ks} \right)^{0.5}$$

Donde:

- W: Ancho de una celda del humedal, m
- As: Área superficial del humedal, m2
- L: Longitud de la celda de humedal, m
- m: pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal
- y: profundidad del agua en el humedal, m
- Ks: Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo, m3/m2/d

Para los valores de m y Ks se tuvo en cuenta lo siguiente:

- m: 0.05, 5% de la pérdida de carga disponible
- Ks: 3000, menos de 1/3 del valor máximo para grava fina
- y: 0.6 m, lámina de agua que obtiene menor área superficial

Obteniendo así un ancho de 9 metros y un largo de 18 metros. Con las dimensiones establecidas se halla finalmente la concentración del efluente así:

$$C_e = C_a * e^{-Kt * \frac{L * W * y * n}{Q}}$$

Obteniendo finalmente una concentración de salida de 16.5 miligramos por litro de DBO5.

Método KC*

Este método a diferencia del anterior tiene en cuenta la concentración de contaminantes presentes y/o generados por el propio humedal. Por lo tanto, se tienen unas concentraciones mínimas, por debajo de las cuales no es posible mejorar la calidad de las aguas residuales efluentes del sistema. El método considera constantes de reacción por unidad de superficie, que para algunos contaminantes dependen de la temperatura. La ecuación general para hallar el área superficial se describe así:

$$A_s = \frac{365 \cdot Q}{K_T} \ln \left(\frac{C_a - C^*}{C_e - C^*} \right)$$

donde:

- Q: Caudal de entrada, m³/d
- Ca: Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- Ce: Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- K_T: Constante de reacción de primer orden, 0 m/año
- C*: Concentración de fondo del contaminante, mg/l o UFC/100ml

Se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal Promedio del Sistema(m³/d): 25.92
- DBO5 Afluente (mg/l) (Ca): 143.99
- DBO5 Efluente (mg/l) (Ce): 21.60

El cálculo de la constante de reacción de primer orden (KT: m/año) se obtiene con la siguiente fórmula:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali (Weather Spark) la cual es de 27°C y los valores de K₂₀ y θ se obtienen a partir de la Tabla 8:

Obteniendo:

- K₂₀:180
- θ: 1.00

- T (°C): 27
- KT: 180

El cálculo de la concentración de fondo del contaminante DBO5 (C^* :mg/l) se realiza de la siguiente manera:

$$C^* = 3.5 + 0.053Ca$$

$$C^* = 3.5 + 0.053 * 143.99 = 14.40$$

Con esto se obtiene área superficial de 133.6 metros cuadrados, y se procede a obtener el largo y ancho del humedal así:

$$W = \frac{1}{y} \left(\frac{Q * As}{m * Ks} \right)^{0.5}$$

Obteniendo un ancho de 9 metros y un largo de 17 metros, para el cual se tomó la profundidad de lámina del agua del anterior método (0.6 metros). Con las dimensiones establecidas se halla finalmente la concentración del efluente de la siguiente manera:

$$Ce = C^* + (Ca - C^*)e^{-\frac{KT*As}{365*Q}}$$

Obteniendo finalmente una concentración de salida de 22 miligramos por litro de DBO5.

Método PKC*

Este método es la combinación de un modelo hidráulico de tanques en serie (TIS) que incluye la variable PTIS con una cinética de primer orden basada en el modelo KC*. En este modelo PTIS representa el número aparente de tanques en el que en el que una mezcla de contaminantes se degrada más lentamente que los contaminantes individuales. La ecuación general para hallar el área superficial se describe así:

$$As = \frac{Q * PTIS}{k} \left[\left(\frac{Ca - C^*}{Ce - C^*} \right)^{\frac{1}{PTIS}} - 1 \right]$$

Donde:

- Q: Caudal de entrada, m³/d
- Ca: Concentración del contaminante en el afluente, mg/l

- Ce: Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- k: constante de tasa superficial de primer orden, m/d
- C*: concentración de fondo, mg/l
- PTIS: número aparente de tanques en serie

Se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal Promedio del Sistema(m³/d): 25.92
- DBO5 Afluente (mg/l) (Ca): 143.99
- DBO5 Efluente (mg/l) (Ce): 21.60

El cálculo de la constante de reacción de primer orden (KT: m/año) se obtiene con la siguiente fórmula:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali (Weather Spark) la cual es de 27°C y los valores de K₂₀ y θ se obtienen a partir de la Tabla 9. Con ello se halla un área superficial de 830 metros cuadrados con 3 tanques de 277 metros cuadrados. Ya que el área es bastante grande y no se acomoda a las necesidades del proyecto, este método se descarta.

6.1.5.3. Diseño de humedal Flujo Vertical Tipo Francés

A continuación, se procede con el diseño del humedal de flujo vertical tipo francés para esta alternativa preliminar, teniendo en cuenta el dimensionamiento expuesto en la metodología.

Dimensionamiento humedal de flujo vertical tipo Frances

Los caudales para los cuales se va a diseñar el humedal se presentan a continuación en la Tabla 19:

Tabla 19. Caudales de diseño

| Porcentaje | 1.5 | l/s |
|------------|------|-----|
| 10% | 0.15 | l/s |
| 20% | 0.3 | l/s |

Nota: El procedimiento es el mismo para el 10% y 20% del caudal de diseño). El primer paso para el diseño del humedal tipo francés es definir el afluente y las concentraciones de los

contaminantes observados en la Tabla 21 y la carga másica observada en la Tabla 20 que se presentan a continuación.

Tabla 20. Cargas Másicas

| | | | |
|-----------------|-------------|--|--------------|
| PE | 85 | GENERACIÓN PROMEDIO DE AGUAS RESIDUALES | |
| | | 150 | L/d hab - eq |
| OBJETIVO | | CARGAS MÁSCAS DIARIAS PROMEDIO POR HAB-EQ | |
| 90 | (mg) DQO/L | 150 | (g) DQO |
| 20 | (mg) DBO5/L | 60 | (g) DBO5 |
| 15 | (mg) SST/L | 70 | (g) SST |
| 15 | (mg) NKT/L | 15 | (g) NKT |

Tabla 21. Efluente y concentraciones

| | | | | | | | |
|--|------|-----------|-----------|---|-------|----------|----------|
| CARGA DE DBO5 DE ENTRADA Mi | | | | CARGA DE DQO DE ENTRADA Mi | | | |
| Mi | 5100 | g*DBO5/d | | Mi | 12750 | g*DQO/d | |
| CONCENTRACIÓN DE DBO5 DE ENTRADA Ci | | | | CONCENTRACIÓN DE DQO DE ENTRADA Ci | | | |
| Ci | 400 | g*DBO5/m3 | mg*DBO5/L | Ci | 1000 | g*DQO/m3 | mg*DQO/L |
| CARGA DE SST DE ENTRADA Mi | | | | CARGA DE NTK DE ENTRADA Mi | | | |
| Mi | 5950 | g*SST/d | | Mi | 1275 | g*NTK/d | |
| CONCENTRACION DE SST DE ENTRADA Ci | | | | CONCENTRACION DE NTK DE ENTRADA Ci | | | |
| Ci | 467 | g*SST/m3 | mg*SST/L | Ci | 100 | g*NTK/m3 | mg*NTK/L |

Luego se pasa a calcular las áreas requeridas en función de las tasas de carga de superficie másica e hidráulicas recomendadas observada en la Tabla 22.

Tabla 22. Área superficial requerida

| Área superficial requerida de un filtro basado en un HLR de | | | Área superficial requerida de un filtro basado en una tasa de carga de masa de superficie de DBO5 | | | Área superficial requerida de un filtro basado en una tasa de carga de masa de superficie de SST de | | | Área superficial requerida de un filtro basado en una tasa de carga de masa de superficie de DQO de | | | Área superficial requerida de un filtro basado en una tasa de carga de masa de superficie de NTK de | | |
|---|----|----|---|-----|--------|---|-----|--------|---|-----|--------|---|----|--------|
| A1 | 34 | m2 | Mi | 150 | g/m2*d | Mi | 150 | g/m2*d | Mi | 350 | g/m2*d | Mi | 30 | g/m2*d |
| | | | A1 | 34 | m2 | A1 | 40 | m2 | A1 | 36 | m2 | A1 | 43 | m2 |

Paso 3, las capas de filtro seguirán las especificaciones francesas observados en la Tabla 23, con valores intermedios de los rangos de altura para cada capa. La altura de las capas será la misma que las de la primera etapa, a excepción del borde libre que será menor a 0.30m.

Tabla 23. Capas filtro primera etapa

| | | | |
|--------------------------------|------|---|---------------------|
| Borde libre | 0.5 | m | |
| Capa principal | 0.5 | m | (2-6 mm de grava) |
| Capa de transicion | 0.15 | m | (5-15 mm de grava) |
| Capa de drenaje | 0.25 | m | (20-60 mm de grava) |
| Altura total del filtro | 1.4 | m | |

Paso 4, para determinar las características de cada lote de alimentación se debe de tener en cuenta el nivel de agua que cubrirá el filtro durante cada lote este corresponde al volumen de cada lote dividido por la superficie del filtro en funcionamiento. Las recomendaciones para humedales de FV franceses son una capa líquida de entre 2 y 5 cm, se consideró 3 cm para la carga del lote de alimentación como se puede observar en la Tabla 24.

Tabla 24. Alimentación Cargas por día

| | | |
|---------------------------------|------|-----------|
| Capa liquida | 0.03 | m |
| Volumen por lote | 1.5 | m3/lote |
| Numero de cargas por día | 9 | lotes/día |

Para calcular el caudal de aguas residuales durante el lote, se utiliza el HLR instantáneo mínimo de 0.5 m³/m²*h observado en la Tabla 25.

Tabla 25. Duración pulsos

| CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES DURANTE EL LOTE | | |
|---|-------------|-----------------------------------|
| HLR instantáneo mínimo | 0.5 | m ³ /m ² *h |
| Flujo por lotes | 24.5 | m ³ /h |
| | 26 | m ³ /h |
| | 0.433333333 | m ³ /min |
| Duración de cada pulso | 3.4 | minutos |

Paso 5, la calidad del efluente de la primera etapa es necesaria para utilizarla como afluente en los filtros de la segunda etapa, el diseño de la segunda etapa se presenta a continuación observado en la Tabla 26.

Tabla 26. Diseño segunda etapa

| | | |
|--|-----|------------------------|
| DBO ELIMINADA EN LA PRIMERA ETAPA | 108 | gDBO/m ² *d |
| Carga orgánica DBO | 12 | gDBO/m ² *d |
| FLUJO MASICO EFLUENTE | 510 | g*DBO/d |
| Carga orgánica superficial diaria | 40 | mg*DBO/L |

| | | |
|--|------|------------------------|
| DQO ELIMINADA EN LA PRIMERA ETAPA | 240 | gDQO/m ² *d |
| Carga orgánica DQO | 60 | gDQO/m ² *d |
| FLUJO MASICO EFLUENTE | 2550 | g*DQO/d |
| Carga orgánica superficial diaria | 200 | mg*DQO/L |

| | | |
|--|-----|------------------------|
| SST ELIMINADA EN LA PRIMERA ETAPA | 126 | gSST/m ² *d |
| Carga organica SST | 14 | gSST/m ² *d |
| FLUJO MASICO EFLUENTE | 595 | g*SST/d |
| Carga organica superficial diaria | 47 | mg*SST/L |

| | | |
|--|---------------|------------------------|
| NTK ELIMINADA EN LA PRIMERA ETAPA | 1.764.923.349 | gNTK/m ² *d |
| Carga organica NTK | 1.235.076.651 | gNTK/m ² *d |
| FLUJO MASICO EFLUENTE | 5.249.075.768 | g*NTK/d |
| Carga organica superficial diaria | 41 | mg*NTK/L |

El área superficial requerida para los filtros de la segunda etapa (Tabla 27), las capas de filtro de la segunda etapa (Tabla 28) y los contaminantes eliminados en la segunda etapa (Tabla 29) se presenta a continuación:

Tabla 27. Área superficial segunda etapa

| Área superficial requerida de un filtro basado en un HLR de | | | Área superficial requerida de un filtro basado en una tasa de carga de masa de superficie de DBO5 | | | Área superficial requerida de un filtro basado en una tasa de carga de masa de superficie de SST de | | | Área superficial requerida de un filtro basado en una tasa de carga de masa de superficie de DQO de | | | Área superficial requerida de un filtro basado en una tasa de carga de masa de superficie de NTK de | | |
|---|----|----|---|------|--------|---|----|--------|---|----|--------|---|----|--------|
| A1 | 34 | m2 | Mi | 20 | g/m2*d | Mi | 70 | g/m2*d | Mi | 30 | g/m2*d | Mi | 15 | g/m2*d |
| | | | A1 | 25,5 | m2 | A1 | 36 | m2 | A1 | 20 | m2 | A1 | 35 | m2 |

Tabla 28. Capas filtro segunda etapa

| | | | |
|--------------------------------|------|---|--|
| Borde libre | 0.3 | m | (arena de 0.25 mm<d10<0.4 mm y d60/d10<5) (3-12 mm de grava) (20-60 mm de grava) |
| Capa principal | 0.5 | m | |
| Capa de transicion | 0.15 | m | |
| Capa de drenaje | 0.25 | m | |
| Altura total del filtro | 1.2 | m | |

Tabla 29. Contaminantes eliminados segunda etapa

| | | |
|--|------|-----------|
| DBO ELIMINADA EN LA SEGUNDA ETAPA | 11.2 | gDBO/m2*d |
| Carga organica DBO | 2.8 | gDBO/m2*d |
| FLUJO MASICO EFLUENTE | 102 | g*DBO/d |
| Carga organica superficial diaria | 8 | mg*DBO/L |

| | | |
|--|-------|-----------|
| DQO ELIMINADA EN LA SEGUNDA ETAPA | 52.5 | gDQO/m2*d |
| Carga organica DQO | 17.5 | gDQO/m2*d |
| FLUJO MASICO EFLUENTE | 637.5 | g*DQO/d |
| Carga organica superficial diaria | 50 | mg*DQO/L |

| | | |
|--|---------------|------------------------|
| SST ELIMINADA EN LA SEGUNDA ETAPA | 1.306.666.667 | gSST/m ² *d |
| Carga organica SST | 3.266.666.667 | gSST/m ² *d |
| FLUJO MASICO EFLUENTE | 119 | g*SST/d |
| Carga organica superficial diaria | 9 | mg*SST/L |

| | | |
|--|---------------|------------------------|
| NTK ELIMINADA EN LA SEGUNDA ETAPA | 1.191.199.053 | gNTK/m ² *d |
| Carga organica NTK | 2.497.237.071 | gNTK/m ² *d |
| FLUJO MASICO EFLUENTE | 90.970.779 | g*NTK/d |
| Carga organica superficial diaria | 7 | mg*NTK/L |

Resumen del dimensionamiento para el 10% del caudal de diseño observado en la Tabla 30.

Tabla 30. Resumen dimensionamiento caudal 1

| VARIABLE | PRIMERA ETAPA | SEGUNDA ETAPA |
|------------------------|---------------|---------------|
| Borde Libre (m) | 0.5 | 0.3 |
| Capa principal (m) | 0.5 | 0.5 |
| Capa de transición (m) | 0.15 | 0.15 |
| Capa de drenaje (m) | 0.25 | 0.25 |

| VARIABLE | CAUDAL | DBO5 | DQO | SST | NTK |
|---|--------|------|-----|-----|-----|
| Area Primera Etapa | 34 | 34 | 36 | 40 | 43 |
| Caudal (m ³ /d) y Concentraciones despues de 1 | 12.75 | 40 | 200 | 47 | 41 |
| Area Segunda Etapa | 34 | 25.5 | 36 | 20 | 35 |
| Caudal (m ³ /d) y Concentraciones despues de 2 | 12.75 | 8 | 50 | 9 | 7 |

| Area | Filtro 1 (m ²) | Filtro 2 (m ²) | Filtro 3 (m ²) | Total (m ²) |
|---------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Primera ETAPA | 49 | 49 | 49 | 147 |
| Segunda ETAPA | 42.25 | 42.25 | - | 84.5 |
| | | | Atotal (m²) | 232 |

Resumen del dimensionamiento para el 20% del caudal de diseño observado en la Tabla 31.

Tabla 31. Resumen dimensionamiento caudal 2

| VARIABLE | PRIMERA ETAPA | SEGUNDA ETAPA |
|------------------------|---------------|---------------|
| Borde Libre (m) | 0.5 | 0.3 |
| Capa principal (m) | 0.5 | 0.5 |
| Capa de transición (m) | 0.15 | 0.15 |
| Capa de drenaje (m) | 0.25 | 0.25 |

| VARIABLE | CAUDAL | DBO5 | DQO | SST | NTK |
|--|--------|------|-----|-----|-----|
| Area Primera Etapa | 69 | 68 | 73 | 79 | 85 |
| Caudal (m3/d) y Concentraciones despues de 1 | 25.5 | 40 | 200 | 47 | 41 |
| Area Segunda Etapa | 69 | 51 | 73 | 40 | 70 |
| Caudal (m3/d) y Concentraciones despues de 2 | 25.5 | 8 | 50 | 9 | 7 |

| Area | Filtro 1 (m2) | Filtro 2 (m2) | Filtro 3 (m2) | Total (m2) |
|---------------|---------------|---------------|--------------------|------------|
| Primera ETAPA | 90.25 | 90.25 | 90.25 | 271 |
| Segunda ETAPA | 81 | 81 | - | 162 |
| | | | Atotal (m2) | 433 |

Desbaste de gruesos

- Canal de desbaste de gruesos

En comunidades reducidas, como los usuarios del edificio de Acacias en la universidad, el desbaste inicial suele ser el paso primordial en el tratamiento de aguas residuales. Aquí, se emplea un canal especializado para esta tarea, donde los sólidos son capturados por rejillas diseñadas para partículas de mayor tamaño. Para este ejercicio se asumirá un ancho de canal de 0.6 m.

- Rejilla de gruesos

Se dimensionará una reja con barrotes de 20 mm de ancho, 50 mm de luz entre barrotes y un grado de colmatación de 30%.

A partir del ancho de canal de 0.6 asumido en el apartado anterior, se calculará el ancho útil de paso de mediante la siguiente ecuación.

$$W_u = (A_c - n \cdot A_b) \cdot \left(1 - \frac{G}{100}\right)$$

Dónde:

W_u = ancho útil de paso (m)

A_c = ancho de canal (m)

n = número de barros

A_b = ancho de barros (m)

G = grado de colmatación (normalmente se utiliza un valor de 30%)

$$W_u = (0.6 - 9 \cdot 0.02) \cdot \left(1 - \frac{30}{100}\right)$$

$$W_u = 0.294 \text{ m}$$

Con la siguiente ecuación se calcula la altura necesaria para el grado de colmatación establecido, el caudal máximo horario y se asume una velocidad de paso de 0.2 m/s.

$$h = \frac{Q}{v} \cdot \frac{1}{W_u}$$

h = altura (m)

Q = caudal de paso (m³/s)

v = velocidad de aproximación (m/s)

$$h = \frac{0.00015}{0.2} \cdot \frac{1}{0.294}$$

$$h = 0.0025 \text{ m}$$

Como se ha obtenido un valor tan bajo, se toma como valor h = 0.3 m.

Se calcula la longitud del canal considerando un tiempo de retención de 10 segundos y una velocidad de flujo del agua de 0,2 metros por segundo. Al aplicar la siguiente ecuación, se obtiene el siguiente resultado.

6.2. Intento final

6.2.1. Justificación nueva ubicación del humedal

Como se mencionaba anteriormente, la ubicación que se tenía preliminarmente no era una alternativa posible debido a la gran cantidad de flora que se iba a ver afectada. En vista de esta situación, se llevó a cabo una reevaluación de posibles sitios alternativos. Finalmente, al hacer un barrido de las posibles áreas donde se podría ubicar el humedal se determinó que la mejor opción es el área detrás del lago de la PTAP (Planta de tratamiento de agua potable), debido a que este lugar cuenta con buena pendiente que será de importancia para que las aguas residuales se conduzcan por gravedad y aunque el espacio disponible es limitado se puede realizar el diseño del humedal. De igual manera, los edificios a tratar sus aguas residuales son los correspondientes a Casa Ceibas, Laboratorio de Nutrición y Villa Javier.

6.2.2. Aforo de consumo de agua potable

Se realizó el aforo del agua potable para poder saber cuál es el caudal de agua residual en la nueva zona de interés, para poder obtener dicho caudal, se tomó registro de la dotación de agua potable en los edificios de Villa Javier, el Laboratorio de Nutrición y Casa Ceibas. El lugar donde confluyen las aguas provenientes de dichos lugares se presenta a continuación en la Ilustración 20.

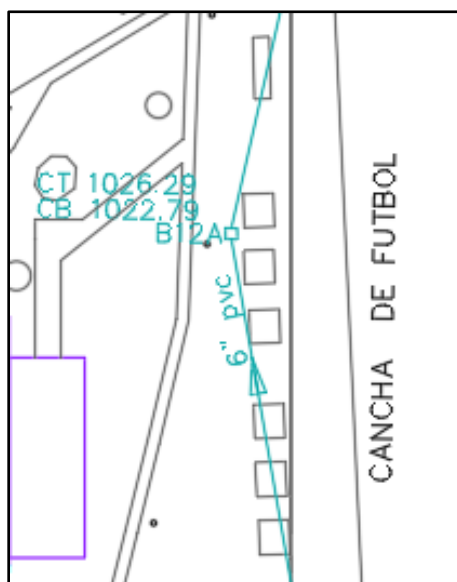


Ilustración 20. Caja residual de interés

La caja de agua residual B12A recibe aguas residuales provenientes de Villa Javier, el Laboratorio de Nutrición y de Casa Ceibas. El caudal se determinó a partir del aforo realizado por

el grupo de diseño del semestre 2023 a cargo de Laura Martínez, garantizando así la precisión y relevancia de los datos obtenidos. Los aforos de la nueva ubicación (Tabla 32), los coeficientes del agua residual (Tabla 33) y el caudal de agua residual (Tabla 34) se presentan a continuación.

Tabla 32. Aforos Nueva ubicación

| Edificio | Aforo | | Consumo | |
|----------------------|------------|------------|--------------|------------|
| | 6:00:00 AM | 6:00:00 PM | (m3/día) | (m3/h) |
| Casa ceibas | 293.82 | 297.76 | 3.94 | 0.32833333 |
| Lab nutrición | 78.18 | 78.5 | 0.32 | 0.02666667 |
| Villa Javier | 9617.24 | 9625.02 | 7.78 | 0.64833333 |
| | | | Total | 1.00333333 |

Tabla 33. Coeficientes agua residual

| | |
|-------------------------------|------|
| Coeficiente de retorno | 0.85 |
| Factores | 1.4 |

Tabla 34. Caudal agua residual

| | |
|------------------------|------------|
| Potable (m3/h) | 1.00333333 |
| Residual (m3/h) | 1.19 |

$$Residual = 1.19 \frac{m^3}{h} = 28.65 \frac{m^3}{dia} = 0.3316 \frac{L}{s}$$

El caudal residual hallado previamente no llega al caudal mínimo de diseño de 1.5 l/s mencionado en el RAS. Se opta por trabajar con el 20% del cual mínimo de diseño, el cual es 0.30 l/s, debido a que se acomoda al área de trabajo delimitada.

6.2.3. Estudio de suelos

Para llevar a cabo un eficiente diseño del humedal, es indispensable conocer cuál es el estado del suelo en el cual se piensa implementar este sistema de tratamiento natural, saber esto derivará en su óptimo funcionamiento. Además, es de vital importancia considerar la estabilidad del suelo, puesto que trabajar con un suelo inestable puede comprometer el colapso del sistema o un mal funcionamiento debido al asentamiento desigual. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó la investigación pertinente sobre distintos estudios geotécnicos realizados previamente en el

plantel y específicamente en la localización de estudio, obteniendo como único resultado un estudio geotécnico elaborado por la profesora Ing. Alejandra María Gómez Jiménez titulado **“ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA LA REFORMA Y CONSTRUCCIÓN DE AULAS DE CLASE EN EL CENTRO DE BIENESTAR DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI”**. que se realizó a una distancia de 70 metros del área de interés, lo que permite considerar sus resultados relevantes para este proyecto.

Fueron realizados dos apiques, el primero de ellos excavado manualmente con herramientas hasta una profundidad de 1,50 m, a partir de esta profundidad hasta los 1,85 m se realizó la exploración con pala holladora y desde este punto hasta los 2,05 m se utilizó un barreno natural tipo auger, la descripción de los materiales se puede ver representada en la Ilustración 21.

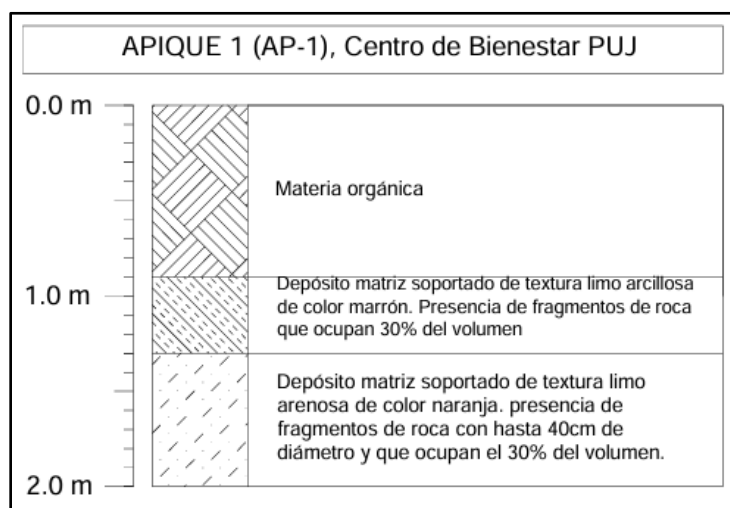


Ilustración 21. Apique 1 [8]

6.2.4. Levantamiento Topográfico

Se decidió realizar un levantamiento topográfico (Ilustración 22) para conocer las elevaciones del terreno y considerar las pendientes en el diseño del humedal de flujo tipo vertical francés. Este levantamiento se llevó a cabo utilizando una estación total tipo GPS, lo que permitió obtener datos precisos y detallados sobre la topografía del área de estudio, asegurando así un diseño óptimo y eficiente del humedal.



Ilustración 22. Toma de puntos de interés.

Se tomaron 33 puntos de la zona de interés utilizando una estación total, con el objetivo de garantizar la obtención de datos precisos y detallados. Este procedimiento no solo permitió obtener datos de elevación, sino también coordenadas exactas en los ejes este y norte observados en la Tabla 35. Esta información es crucial para el diseño adecuado del humedal de flujo tipo vertical francés, ya que conocer las elevaciones y pendientes del terreno permite una planificación más eficiente y precisa, asegurando que el sistema funcione correctamente y cumpla con sus objetivos ecológicos y de tratamiento de aguas.

Tabla 35. Mediciones topográficas

| Punto | Norte | Este | Altura Ort |
|--------------|--------------|-------------|-------------------|
| 1 | 861781.512 | 1061135.44 | 1068.993 |
| 2 | 861770.881 | 1061126.43 | 1069.777 |
| 3 | 861748.587 | 1061119.67 | 1069.677 |
| 4 | 861735.063 | 1061125.15 | 1069.313 |
| 5 | 861734.914 | 1061126.22 | 1068.855 |
| 6 | 861747.904 | 1061128.5 | 1069.098 |
| 7 | 861750.69 | 1061100.96 | 1070.901 |
| 8 | 861747.141 | 1061087.42 | 1070.65 |
| 9 | 861754.402 | 1061078.66 | 1071.57 |
| 10 | 861760.697 | 1061077.21 | 1070.72 |
| 11 | 861759.917 | 1061078.2 | 1070.481 |
| 12 | 861774.661 | 1061079.15 | 1070.037 |
| 13 | 861796.922 | 1061073.38 | 1069.881 |
| 14 | 861806.312 | 1061074.31 | 1068.588 |
| 15 | 861810.132 | 1061063.51 | 1064.868 |
| 16 | 861815.954 | 1061063.2 | 1065.077 |
| 17 | 861820.728 | 1061063.71 | 1065.271 |
| 18 | 861807.908 | 1061058.75 | 1065.592 |
| 19 | 861804.62 | 1061059.31 | 1066.027 |
| 20 | 861813.039 | 1061060.62 | 1065.238 |
| 21 | 861823.274 | 1061058.25 | 1066.698 |
| 22 | 861810.551 | 1061082.03 | 1068.489 |
| 23 | 861805.669 | 1061090.99 | 1069.322 |
| 24 | 861818.365 | 1061084.84 | 1068.963 |
| 25 | 861826.701 | 1061089.36 | 1068.878 |
| 26 | 861837.33 | 1061096.8 | 1069.056 |
| 27 | 861842.968 | 1061105.93 | 1068.579 |
| 28 | 861843.701 | 1061120.78 | 1066.941 |
| 29 | 861844.57 | 1061126.52 | 1067.04 |
| 30 | 861836.126 | 1061128.52 | 1068.138 |
| 31 | 861821.966 | 1061134.31 | 1067.639 |
| 32 | 861809.622 | 1061141.2 | 1069.801 |
| 33 | 861794.454 | 1061134.99 | 1070.521 |

Estos puntos fueron posteriormente cargados a AutoCAD, lo que permitió modelar con exactitud los puntos dentro del plano de interés. Esta modelación detallada facilitó la creación de un bosquejo preliminar, mediante el cual se evaluó la viabilidad del diseño del humedal de flujo tipo vertical francés en la ubicación propuesta. Este proceso fue esencial para asegurar que las condiciones topográficas del terreno fueran óptimas para la implementación del humedal, permitiendo así un diseño eficiente y funcional que cumple con los requisitos ecológicos y de tratamiento de aguas necesarios.

6.2.5. Diseño de humedales

6.2.5.1. Diseño de humedal de flujo superficial

Para el dimensionamiento del humedal de flujo libre se utilizan 3 diferentes métodos que se describirán a continuación:

Método KC

Este método sigue una cinética de primer orden, involucra una constante de reacción que depende de la temperatura, concentración de contaminante, caudal, profundidad y porosidad del sustrato filtrante por lo que el área superficial del humedal se describe así:

$$A_s = \frac{\ln\left(\frac{C_a}{C_e}\right) \cdot Q}{K_T \cdot y \cdot n}$$

donde:

- Q: Caudal de entrada, m³/d
- Ca: Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- Ce: Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- K_T: Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹
- y: Profundidad de la lámina de agua, m
- n: Porosidad del sustrato filtrante, expresado como decimal.

Se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal Promedio del Sistema(m³/d): 25.92
- DBO5 Afluente (mg/l) (Ca): 213.99
- DBO5 Efluente (mg/l) (Ce): 98.44

El cálculo de la constante de reacción de primer orden dependiendo de la temperatura (K_T : d^{-1}) se obtiene con la siguiente fórmula:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali (Weather Spark) la cual es de 27°C y los valores de K_{20} y θ se obtienen a partir de la Tabla 3.

Obteniendo:

- K_{20} : 0,678
- θ : 1.06
- T (°C): 27
- K_T : 1.019

Posteriormente se eligió un relleno de grava fina, por su tratabilidad y disponibilidad en la región el cual viene asociado a una porosidad (n), tamaño efectivo de partículas y una conductividad hidráulica como se presenta a continuación en la Tabla 36.

Tabla 36. Características típicas de los medios para humedales HFSS

| Tipo de material | Tamaño efectivo D10 (mm) | Porosidad, n (%) | Conductividad hidráulica, k_s ($m^3/m^2/d$) |
|------------------|--------------------------|------------------|---|
| Arena gruesa | 2 | 28-32 | 100-1.000 |
| Arena gravosa | 8 | 30-35 | 500-5.000 |
| Grava fina | 16 | 35-38 | 1.000-10.000 |
| Grava media | 32 | 36-40 | 10.000-50.000 |
| Roca gruesa | 128 | 38-45 | 50.000-250.000 |

Obteniendo:

- n : 0.35

Se hizo la iteración para varias profundidades de la lámina de agua obteniendo las siguientes áreas superficiales, dichas iteraciones se consignan en la Tabla 37.

Tabla 37. Iteraciones método KC

| Iteración por profundidad | Prof Lamina agua (m) | Area Superficial Humedal (m2) (As) |
|---------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Iteración 1 | 0,1 | 564,1 |
| Iteración 2 | 0,5 | 112,8 |
| Iteración 3 | 0,3 | 188,0 |

Una vez obtenido el área superficial de tamaño medio que permite una vegetación medianamente densa en una profundidad de 0.3 m, en este caso de 188.0 metros cuadrados, se determina cual va a ser su largo y ancho con la siguiente ecuación:

$$L = \left(\frac{As * y^{\frac{8}{3}} * m^{\frac{1}{2}} * 86400}{a * Q} \right)^{2/3}$$

Donde:

- As: Área superficial del humedal, m²
- L: Longitud de la celda de humedal, m
- m: pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal
- y: profundidad del agua en el humedal, m

Para los valores de m y a se tuvo en cuenta lo siguiente:

- m: 0.05, 5% de la pérdida de carga disponible
- a: 1.6 s*m^{1/6} para vegetación densa con profundidad de agua de y=0.3m

Obteniendo así un ancho de 10 metros y un largo de 19 metros. Con las dimensiones establecidas se halla finalmente la concentración del efluente así:

$$C_e = C_a * e^{-Kt * \frac{L * W * y * n}{Q}}$$

Obteniendo finalmente una concentración de salida de 98,39 miligramos por litro de DBO5.

Método KC*

Este método a diferencia del anterior tiene en cuenta la concentración de contaminantes presentes y/o generados por el propio humedal. Por lo tanto, se tienen unas concentraciones

mínimas, por debajo de las cuales no es posible mejorar la calidad de las aguas residuales efluentes del sistema. El método considera constantes de reacción por unidad de superficie, que para algunos contaminantes dependen de la temperatura. La ecuación general para hallar el área superficial se describe así:

$$As = \frac{365 \cdot Q}{K_T} \ln \left(\frac{Ca - C^*}{Ce - C^*} \right)$$

donde:

- Q: Caudal de entrada, m³/d
- Ca: Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- Ce: Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- K_T: Constante de reacción de primer orden, m/año
- C*: Concentración de fondo del contaminante, mg/l o UFC/100ml

Se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal Promedio del Sistema(m³/d): 25.92
- DBO5 Afluente (mg/l) (Ca): 213.99
- DBO5 Efluente (mg/l) (Ce): 98,435

El cálculo de la constante de reacción de primer orden (K_T: m/año) se obtiene con la siguiente fórmula: $K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali (Weather Spark) la cual es de 27°C y los valores de K₂₀ y θ se obtienen a partir de la Tabla 4.

Obteniendo:

- K₂₀:34
- θ: 1.00
- T (°C): 27
- K_T: 34

El cálculo de la concentración de fondo del contaminante DBO5 (C*:mg/l) se realiza de la siguiente manera:

$$C^* = 3.5 + 0.053Ca$$

$$C^* = 3.5 + 0.053 * 213.99 = 14.84$$

Con esto se obtiene área superficial de 241,6 metros cuadrados, y se procede a obtener el largo y ancho del humedal así:

$$L = \left(\frac{As * y^{\frac{8}{3}} * m^{\frac{1}{2}} * 86400}{a * Q} \right)^{2/3}$$

Obteniendo un largo de 16,7 metros y un ancho de 16.5 metros, con los mismos valores de y , a y m que en el anterior método. Con las dimensiones establecidas se halla finalmente la concentración del efluente de la siguiente manera:

$$Ce = C^* + (Ca - C^*)e^{-\frac{KT*As}{365*Q}}$$

Con lo que se tiene una concentración de salida de 89,246 miligramos por litro de DBO5.

Método PKC*

Este método es la combinación de un modelo hidráulico de tanques en serie (TIS) que incluye la variable PTIS con una cinética de primer orden basada en el modelo KC*. En este modelo PTIS representa el número aparente de tanques en el que en el que una mezcla de contaminantes se degrada más lentamente que los contaminantes individuales. La ecuación general para hallar el área superficial se describe así:

$$As = \frac{Q * PTIS}{k} \left[\left(\frac{Ca - C^*}{Ce - C^*} \right)^{\frac{1}{PTIS}} - 1 \right]$$

Donde:

- Q: Caudal de entrada, m³/d
- Ca: Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- Ce: Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- k: constante de tasa superficial de primer orden, m/d
- C*: concentración de fondo, mg/l
- PTIS: número aparente de tanques en serie

Se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal Promedio del Sistema(m³/d): 25.92
- DBO5 Afluente (mg/l) (Ca): 213.99
- DBO5 Efluente (mg/l) (Ce): 98.435

El cálculo de la constante de reacción de primer orden (KT: m/año) se obtiene con la siguiente fórmula:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali (Weather Spark) la cual es de 27°C y los valores de K20 y θ se obtienen a partir de la Tabla 5.

Obteniendo:

- K20: 189
- θ : 0.985
- T (°C): 27
- KT: 0,466
- PTSI: 1
- C*: 20

Con ello se halla un área superficial de 506,1 metros cuadrados con un solo tanque para este humedal.

6.2.5.2. Diseño de Humedal de Flujo Horizontal

Para el dimensionamiento del humedal horizontal se tomaron en cuenta 3 métodos que se describirán a continuación:

Método KC

Este método sigue una cinética de primer orden, involucra una constante de reacción que depende de la temperatura, por lo que el área superficial del humedal se describe así:

$$As = \frac{\ln\left(\frac{Ca}{Ce}\right) \cdot Q}{K_T \cdot y \cdot n}$$

donde:

- Q: Caudal de entrada, m³/d
- Ca: Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- Ce: Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- K_T: Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹
- y: Profundidad de la lámina de agua, m
- n: Porosidad del sustrato filtrante, expresado como decimal.

Se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal Promedio del Sistema(m³/d): 25.92
- DBO5 Afluente (mg/l) (Ca): 213.99
- DBO5 Efluente (mg/l) (Ce): 21.40

El cálculo de la constante de reacción de primer orden dependiendo de la temperatura (K_T: d⁻¹) se obtiene con la siguiente fórmula:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali (Weather Spark) la cual es de 27°C y los valores de K₂₀ y θ se obtienen a partir de la Tabla 7.

Obteniendo:

- K₂₀:1.104
- θ: 1.06
- T (°C): 27
- K_T: 1.66

Posteriormente se eligió un relleno de grava fina, por su tratabilidad y disponibilidad en la región el cual viene asociado a una porosidad (n), tamaño efectivo de partículas y una conductividad hidráulica como se presenta a continuación en la Tabla 38:

Tabla 38. Características típicas de los medios para humedales HFSS

| Tipo de material | Tamaño efectivo D10 (mm) | Porosidad, n (%) | Conductividad hidráulica, ks (m ³ /m ² /d) |
|------------------|--------------------------|------------------|--|
| Arena gruesa | 2 | 28-32 | 100-1.000 |
| Arena gravosa | 8 | 30-35 | 500-5.000 |
| Grava fina | 16 | 35-38 | 1.000-10.000 |
| Grava media | 32 | 36-40 | 10.000-50.000 |
| Roca gruesa | 128 | 38-45 | 50.000-250.000 |

Obteniendo:

- n: 0.35

Se hizo la iteración para varias profundidades de la lámina de agua obteniendo las siguientes áreas superficiales, dichas iteraciones se consignan en la Tabla 39:

Tabla 39. Iteraciones método KC

| Iteración por profundidad | Prof Lamina agua (m) | Area Superficial Humedal (m2) (As) |
|---------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Iteración 1 | 0,4 | 256,8 |
| Iteración 2 | 0,5 | 205,4 |
| Iteración 3 | 0,6 | 171,2 |

Una vez obtenido el área superficial de menor tamaño, en este caso de 171.2 metros cuadrados, se determina cual va a ser su largo y ancho con la siguiente ecuación:

$$W = \frac{1}{y} \left(\frac{Q * As}{m * Ks} \right)^{0.5}$$

Donde:

- W: Ancho de una celda del humedal, m
- As: Área superficial del humedal, m2
- L: Longitud de la celda de humedal, m
- m: pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal
- y: profundidad del agua en el humedal, m

- K_s : Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo, $m^3/m^2/d$

Para los valores de m y K_s se tuvo en cuenta lo siguiente:

- m : 0.05, 5% de la pérdida de carga disponible
- K_s : 3000, menos de 1/3 del valor máximo para grava fina
- y : 0.6 m, lámina de agua que obtiene menor área superficial

Obteniendo así un ancho de 10 metros y un largo de 19 metros. Con las dimensiones establecidas se halla finalmente la concentración del efluente así:

$$C_e = C_a * e^{-Kt * \frac{L * W * y * n}{Q}}$$

Obteniendo finalmente una concentración de salida de 16.8 miligramos por litro de DBO5.

Método KC*

Este método a diferencia del anterior tiene en cuenta la concentración de contaminantes presentes y/o generados por el propio humedal. Por lo tanto, se tienen unas concentraciones mínimas, por debajo de las cuales no es posible mejorar la calidad de las aguas residuales efluentes del sistema. El método considera constantes de reacción por unidad de superficie, que para algunos contaminantes dependen de la temperatura. La ecuación general para hallar el área superficial se describe así:

$$A_s = \frac{365 \cdot Q}{K_T} \ln \left(\frac{C_a - C^*}{C_e - C^*} \right)$$

donde:

- Q : Caudal de entrada, m^3/d
- C_a : Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- C_e : Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- K_T : Constante de reacción de primer orden, $m/año$
- C^* : Concentración de fondo del contaminante, mg/l o UFC/100ml

Se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal Promedio del Sistema(m³/d): 25.92
- DBO5 Afluente (mg/l) (Ca): 213.99
- DBO5 Efluente (mg/l) (Ce): 21.40

El cálculo de la constante de reacción de primer orden (KT: m/año) se obtiene con la siguiente fórmula: $K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali (Weather Spark) la cual es de 27°C y los valores de K20 y θ se obtienen a continuación en la Tabla 8:

Obteniendo:

- K20:180
- θ : 1.00
- T (°C): 27
- KT: 180

El cálculo de la concentración de fondo del contaminante DBO5 (C*:mg/l) se realiza de la siguiente manera:

$$C^* = 3.5 + 0.053Ca$$

$$C^* = 3.5 + 0.053 * 213.99 = 14.84$$

Con esto se obtiene área superficial de 180 metros cuadrados, y se procede a obtener el largo y ancho del humedal así:

$$W = \frac{1}{y} \left(\frac{Q * As}{m * Ks} \right)^{0.5}$$

Obteniendo un ancho de 9.5 metros y un largo de 19.5 metros, para el cual se tomó la profundidad de lámina del agua del anterior método (0.6 metros). Con las dimensiones establecidas se halla finalmente la concentración del efluente de la siguiente manera:

$$Ce = C^* + (Ca - C^*)e^{-\frac{KT*As}{365*Q}}$$

Con lo que se tiene una concentración de salida de 22 miligramos por litro de DBO5.

Método PKC*

Este método es la combinación de un modelo hidráulico de tanques en serie (TIS) que incluye la variable PTIS con una cinética de primer orden basada en el modelo KC*. En este modelo PTIS representa el número aparente de tanques en el que en el que una mezcla de contaminantes se degrada más lentamente que los contaminantes individuales. La ecuación general para hallar el área superficial se describe así:

$$A_s = \frac{Q * PTIS}{k} \left[\left(\frac{C_a - C^*}{C_e - C^*} \right)^{\frac{1}{PTIS}} - 1 \right]$$

Donde:

- Q: Caudal de entrada, m³/d
- Ca: Concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- Ce: Concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- k: constante de tasa superficial de primer orden, m/d
- C*: concentración de fondo, mg/l
- PTIS: número aparente de tanques en serie

Se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal Promedio del Sistema(m³/d): 25.92
- DBO5 Afluente (mg/l) (Ca): 213.99
- DBO5 Efluente (mg/l) (Ce): 21.40

El cálculo de la constante de reacción de primer orden (KT: m/año) se obtiene con la siguiente fórmula:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Donde se utiliza la temperatura promedio del agua de Cali (Weather Spark) la cual es de 27°C y los valores de K20 y θ se obtienen a partir de la Tabla 9:

Obteniendo:

- K20: 66
- θ : 0.981

- T (°C): 27
- KT: 57.71
- PTSI: 3
- C*: 15

Con ello se halla un área superficial de 405 metros cuadrados dividido en 3 tanques de 135 metros cuadrados.

6.2.5.3. Diseño de humedal Flujo Vertical Tipo Francés

Después de haber determinado el caudal que se va a tratar en el humedal que proviene de Villa Javier, Casa Ceibas y el Laboratorio de Nutrición el cual es de 0.3 l/s, se procedió a realizar el correspondiente dimensionamiento del humedal. Este proceso fue llevado a cabo siguiendo la metodología previamente establecida para humedal de flujo vertical tipo francés. A continuación, en la Tabla 40, se presenta el resumen del dimensionamiento del humedal en la nueva ubicación.

Tabla 40. Resumen dimensionamiento Nueva ubicación

| VARIABLE | PRIMERA ETAPA | SEGUNDA ETAPA |
|------------------------|---------------|---------------|
| Borde Libre (m) | 0.5 | 0.3 |
| Capa principal (m) | 0.5 | 0.5 |
| Capa de transición (m) | 0.15 | 0.15 |
| Capa de drenaje (m) | 0.25 | 0.25 |

| Variable | Caudal | DBO5 | DQO | SST | NTK |
|--|--------|------|-----|-----|-----|
| Área Primera Etapa | 69 | 68 | 73 | 79 | 85 |
| Caudal (m3/d) y Concentraciones después de 1 | 25.5 | 40 | 200 | 47 | 41 |
| Área Segunda Etapa | 69 | 51 | 73 | 40 | 70 |
| Caudal (m3/d) y Concentraciones después de 2 | 25.5 | 8 | 50 | 9 | 7 |

| Área | Filtro 1 (m2) | Filtro 2 (m2) | Filtro 3 (m2) | Total (m2) |
|----------------------|---------------|---------------|--------------------|------------|
| Primera ETAPA | 90.25 | 90.25 | 90.25 | 271 |
| Segunda ETAPA | 81 | 81 | | 162 |
| | | | Atotal (m2) | 433 |

Tras colocar el caudal de las aguas residuales de interés, se procedió a dimensionar el tamaño del humedal vertical tipo francés. Este proceso resultó en la configuración de tres filtros, cada uno con una superficie de 90.25 metros cuadrados, en la primera etapa, sumando un total de 271 metros cuadrados. La segunda etapa se estructuró con dos filtros de 81 metros cuadrados cada uno, acumulando un total de 162 metros cuadrados. En conjunto, el humedal proyectado abarca una superficie total de 433 metros cuadrados.

Una vez determinada esta área total del humedal, resulta imperativo evaluar si las mediciones del área de interés son óptimas y adecuadas para albergar el humedal diseñado. Esta evaluación asegura que las dimensiones propuestas se integren de manera efectiva y eficiente dentro del espacio disponible, garantizando así la viabilidad y funcionalidad del sistema de tratamiento de aguas residuales proyectado.

Mediciones nueva localización humedal

Para evaluar la factibilidad del sitio con respecto al dimensionamiento del humedal, se decidió realizar una serie de mediciones precisas utilizando un decámetro como se observa en la Ilustración 23. Se midieron detalladamente las dimensiones de base y altura de la nueva ubicación para asegurar una evaluación precisa del espacio disponible (Ilustración 24). Además, se examinó cuidadosamente el terreno, no solo para identificar las características físicas, sino también para asegurar de que no hubiera ninguna vegetación significativa en el área que pudiera verse afectada por la construcción del humedal. Esto se llevó a cabo con el objetivo de minimizar el impacto ambiental y preservar el ecosistema local, asegurando que nuestra intervención sea sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

A partir de los datos obtenidos de estas mediciones y evaluaciones, se determinó que el espacio disponible no era suficiente para dimensionar completamente el humedal en su totalidad según el diseño inicial. No obstante, se determinó que el área era adecuada para la implementación

de la primera etapa del humedal de tipo francés. Este enfoque escalonado permite iniciar el proyecto.



Ilustración 23. Medición área #1



Ilustración 24. Medición área #2

Definición dimensiones humedal

Después de realizar la medición de las dimensiones de la zona de interés, se evidenció que el dimensionamiento previamente realizado en Excel no permitía acomodar en su totalidad las dos

etapas del humedal vertical tipo francés. Sin embargo, la primera etapa, que comprende tres filtros con dimensiones de 9.5 metros por lado, sí podía ser implementada dentro de los límites espaciales disponibles. Ante esta circunstancia, se decidió que la opción más viable era proceder únicamente con la instalación de la primera etapa.

En consecuencia, en la tabla que se presenta a continuación (Tabla 41), se detallan las áreas de los filtros, los contaminantes que son tratados en esta primera etapa y las concentraciones residuales de cada uno de estos contaminantes después de haber pasado por los filtros. Este análisis permite evaluar la eficacia de la primera etapa en el tratamiento de los contaminantes específicos, proporcionando una visión clara de su rendimiento y los beneficios esperados en la mejora de la calidad del agua tratada.

Tabla 41. Dimensionamiento nuevo humedal

| | | | |
|-----------------|-------------|---|--------------|
| PE | 170 | GENERACIÓN PROMEDIO DE AGUAS RESIDUALES | |
| | | 150 | L/d hab - eq |
| OBJETIVO | | CARGAS MÁXICAS DIARIAS PROMEDIO POR HAB-EQ | |
| 90 | (mg) DQO/L | 150 | (g) DQO |
| 20 | (mg) DBO5/L | 60 | (g) DBO5 |
| 15 | (mg) SST/L | 70 | (g) SST |
| 15 | (mg) NKT/L | 15 | (g) NKT |

| | | | | | | | |
|--|-------|-----------|-----------|---|-------|----------|----------|
| CARGA DE DBO5 DE ENTRADA Mi | | | | CARGA DE DQO DE ENTRADA Mi | | | |
| Mi | 10200 | g*DBO5/d | | Mi | 25500 | g*DQO/d | |
| CONCENTRACIÓN DE DBO5 DE ENTRADA Ci | | | | CONCENTRACIÓN DE DQO DE ENTRADA Ci | | | |
| Ci | 400 | g*DBO5/m3 | mg*DBO5/L | Ci | 1000 | g*DQO/m3 | mg*DQO/L |
| CARGA DE SST DE ENTRADA Mi | | | | CARGA DE NTK DE ENTRADA Mi | | | |
| Mi | 11900 | g*SST/d | | Mi | 2550 | g*NTK/d | |
| CONCENTRACION DE SST DE ENTRADA Ci | | | | CONCENTRACION DE NTK DE ENTRADA Ci | | | |
| Ci | 467 | g*SST/m3 | mg*SST/L | Ci | 100 | g*NTK/m3 | mg*NTK/L |

| Área superficial requerida de un filtro basado en un HLR de | | | Área superficial requerida de un filtro basado en una tasa de carga de masa de superficie de DBO5 | | | Área superficial requerida de un filtro basado en una tasa de carga de masa de superficie de DQO de | | | Área superficial requerida de un filtro basado en una tasa de carga de masa de superficie de SST de | | | Área superficial requerida de un filtro basado en una tasa de carga de masa de superficie de NTK de | | |
|---|----|----|---|-----|--------|---|-----|--------|---|-----|--------|---|----|--------|
| A1 | 69 | m2 | Mi | 150 | g/m2*d | Mi | 350 | g/m2*d | Mi | 150 | g/m2*d | Mi | 30 | g/m2*d |
| | | | A1 | 68 | m2 | A1 | 73 | m2 | A1 | 79 | m2 | A1 | 85 | m2 |

SE ESCOGE EL MAYOR ENTRE LOS 5

| | | |
|---|----|----|
| A | 85 | m2 |
|---|----|----|

| | | | |
|---|-----|---|-----|
| W | 9,2 | m | 9,5 |
|---|-----|---|-----|

| | | |
|------------|-------|----|
| Área nueva | 90,25 | m2 |
|------------|-------|----|

VOLUMENES

| Volumen de apoyo de material | | | Volumen de apoyo de material *N de celdas | | |
|------------------------------|---------|----|---|---------|----|
| Capa principal | 45,125 | m3 | Capa principal | 135,375 | m3 |
| Capa de transición | 13,5375 | m3 | Capa de transición | 40,6125 | m3 |
| Capa de drenaje | 22,5625 | m3 | Capa de drenaje | 67,6875 | m3 |

| CARACTERISTICAS DE CADA LOTE DE ALIMENTACION | | |
|--|------|-----------|
| Capa liquida | 0,03 | m |
| Volumen por lote | 2,7 | m3/lote |
| Numero de cargas por día | 9 | lotes/día |

| CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES DURANTE EL LOTE | | |
|--|--------------|---------|
| HLR instantáneo mínimo | 0,5 | m3/m2*h |
| Flujo por lotes | 45,125 | m3/h |
| | 47 | m3/h |
| | 0,7833333333 | m3/min |
| Duración de cada pulso | 3,5 | minutos |

| | | |
|--|------|------------------------|
| DBO ELIMINADA EN LA PRIMERA ETAPA | 108 | gDBO/m ² *d |
| Carga orgánica DBO | 12 | gDBO/m ² *d |
| Flujo másico efluente | 1020 | g*DBO/d |
| Carga orgánica superficial diaria | 40 | mg*DBO/L |

| | | |
|--|------|------------------------|
| DQO ELIMINADA EN LA PRIMERA ETAPA | 240 | gDQO/m ² *d |
| Carga orgánica DQO | 60 | gDQO/m ² *d |
| Flujo másico efluente | 5100 | g*DQO/d |
| Carga orgánica superficial diaria | 200 | mg*DQO/L |

| | | |
|--|------|------------------------|
| SST ELIMINADA EN LA PRIMERA ETAPA | 126 | gSST/m ² *d |
| Carga orgánica SST | 14 | gSST/m ² *d |
| Flujo másico efluente | 1190 | g*SST/d |
| Carga orgánica superficial diaria | 47 | mg*SST/L |

| | | |
|--|---------|------------------------|
| NTK ELIMINADA EN LA PRIMERA ETAPA | 17,65 | gNTK/m ² *d |
| Carga orgánica NTK | 12,35 | gNTK/m ² *d |
| Flujo másico efluente | 1049,82 | g*NTK/d |
| Carga orgánica superficial diaria | 41,17 | mg*NTK/L |

| Variable | Caudal | DBO5 | DQO | SST | NTK |
|--|--------|------|-----|-----|-----|
| Área Primera Etapa | 69 | 68 | 73 | 79 | 85 |
| Caudal (m ³ /d) y Concentraciones después de 1 (mg/L) | 25,5 | 40 | 200 | 47 | 41 |

Parámetros humedal

Excavación e impermeabilización

Para el diseño y construcción del humedal, que adoptará una forma cuadrada, se ha determinado una relación de longitud a ancho (L/A) de 1:1 en ambas orientaciones, horizontales y verticales. Este diseño simétrico facilita tanto la excavación como la optimización del espacio disponible. En términos de impermeabilización, se utilizarán materiales para asegurar la funcionalidad y durabilidad del humedal. Se empleará un geotextil con un gramaje que oscila entre

150 y 300 g/m², garantizando una adecuada filtración y protección del sustrato subyacente, un esquema del perfil del humedal se observa en la Ilustración 25. Adicionalmente, se instalará una lámina de polietileno de alta densidad (PEAD) como se observa en la Ilustración 26 con un espesor mínimo de 2 mm. Esta lámina actuará como barrera impermeable, previniendo cualquier infiltración no deseada y asegurando que el agua se mantenga dentro del sistema de tratamiento.

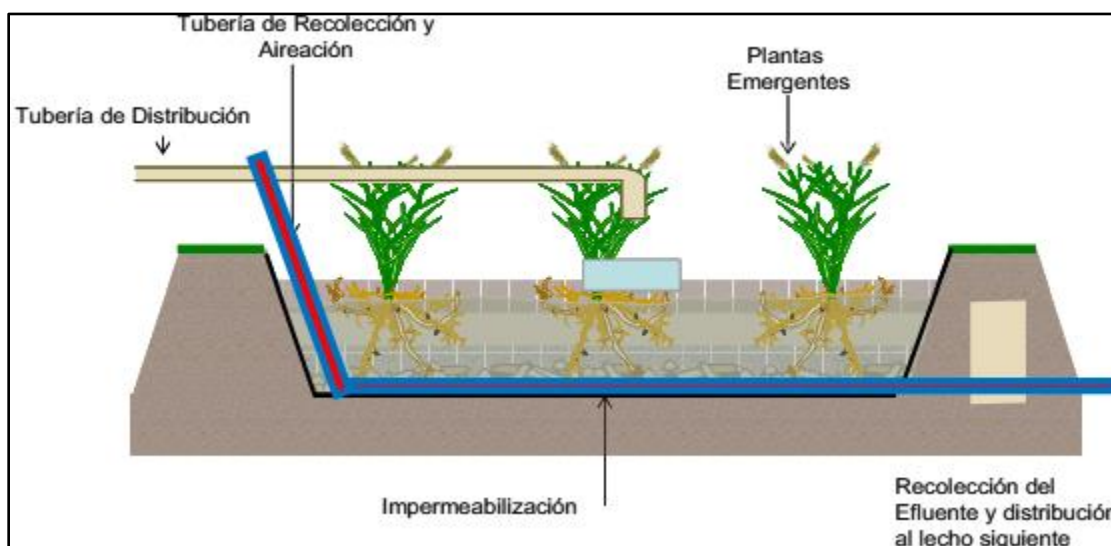


Ilustración 25. Vista perfil humedal de flujo vertical tipo francés [9]



Ilustración 26. Impermeabilización [10]

Sistema de recogida

Consiste en una red de tuberías perforadas situada en el fondo de cada una de las celdas. Este sistema de recogida puede apreciarse en la Ilustración 27 e Ilustración 28. Las tuberías se cubren con una capa de gravas gruesas que evita que el medio granular entre dentro de las tuberías.

de (PVC) por las perforaciones de (5 mm agujero), las tuberías tienen un diámetro de 100 mm, separadas cada 2m.

$$\frac{1 \text{ tubería}}{4 \text{ m}^2} * \frac{90.25 \text{ m}^2}{\text{celda}} = 23 \frac{\text{tuberías aireación y recogida del efluente}}{\text{celda}}$$



Ilustración 27. Sistema de drenaje [11]



Ilustración 28. Chimenea de ventilación [12]

Sistema de distribución

La distribución de las aguas residuales en la superficie del humedal se consigue mediante tuberías de acero inoxidable de 100 mm de diámetro (8 puntos de alimentación por filtro) en altura

que reparta de manera equitativa con 0.150 ml/m². Dicho sistema de distribución se puede apreciar en la Ilustración 29 e Ilustración 30.

$$0.150 \frac{\text{ml}}{\text{m}^2} * \frac{90.25 \text{ m}^2}{\text{celda}} = 14 \frac{\text{ml tuberías de distribución}}{\text{celda}}$$



Ilustración 29. Sistema de distribución [13]

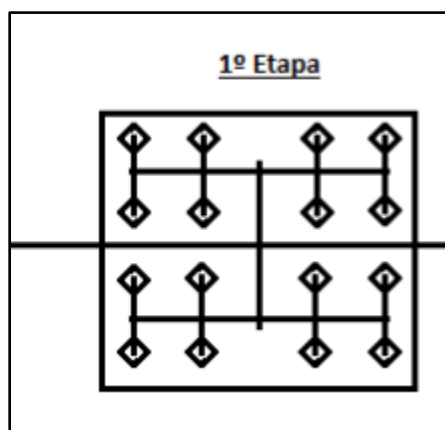


Ilustración 30. Distribución humedal vista en planta

Sistema de alimentación intermitente

Tanque de almacenamiento: Este es el recipiente principal que almacena el líquido que se va a descargar de manera intermitente (Volumen 3 m³).

Sifón: El sifón es un tubo curvado que permite el vaciado del tanque por gravedad. Funciona basado en el principio de que, una vez que el nivel del líquido en el tanque alcanza un cierto punto, el líquido comienza a fluir a través del sifón y continúa fluyendo hasta que el nivel cae por debajo del extremo de entrada del sifón, momento en el cual se interrumpe el flujo.

El funcionamiento del Sistema es el siguiente, primero es el llenado del tanque, el tanque de almacenamiento se llena con el líquido hasta alcanzar un nivel predeterminado (Ilustración 31 e Ilustración 32). Este proceso puede ser controlado mediante válvulas y sensores de nivel. Posteriormente es el inicio del sifonado, una vez que el nivel del líquido alcanza el punto de activación del sifón, el líquido comienza a fluir a través del sifón por acción de la gravedad. Este flujo es continuo y no requiere energía externa, lo que lo hace eficiente en términos de consumo energético. De ahí viene la descarga intermitente, donde el líquido se descarga del tanque hasta que el nivel del líquido cae por debajo del extremo de entrada del sifón. En este punto, el flujo se detiene automáticamente debido a la ruptura del vacío en el sifón y por último el reinicio del ciclo, una vez que el nivel del líquido en el tanque desciende lo suficiente, el tanque puede comenzar a llenarse nuevamente, y el ciclo de descarga se repetirá cuando el nivel del líquido alcance nuevamente el punto de activación del sifón.



Ilustración 31. Llenado del tanque [14]



Ilustración 32. Sifón sumergido [15]

Sustrato filtrante

Dado que el humedal solo incluirá la primera etapa, su diseño se ha basado en los criterios y parámetros específicos necesarios para esta fase. Cada filtro contará con un borde libre de 0.5 metros, una capa principal de grava con un tamaño de 2 a 6 mm, seguida por una capa de transición de 0.15 metros de espesor con grava de 5 a 15 mm, y finalmente una capa de drenaje de 0.25 metros con grava de 20 a 60 mm. Los detalles de sus celdas se pueden observar en la Ilustración 33.

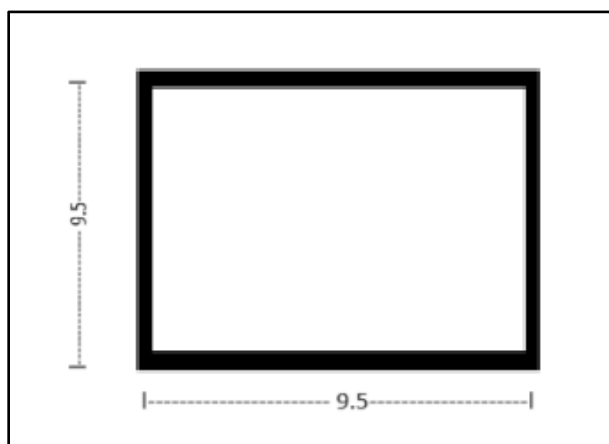


Ilustración 33. Detalles de la celda

Ubicación humedal AutoCAD

Dado que las mediciones obtenidas solo permiten llevar a cabo la primera etapa del humedal, la cual consiste en tres filtros cuadrados de 9.5 metros de lado cada uno, lo que resulta en un área total de 271 m², se toma la decisión de modelar dichas dimensiones en el programa Civil 3D para verificar la congruencia entre las mediciones de campo y las generadas por el software. En primer lugar, la Ilustración 34 corresponde a un perfil del terreno basado en la ruta proyectada para la tubería que conduce hacia el humedal y en la Ilustración 35 una vista en planta de este. Para ello, se generó una superficie utilizando las elevaciones topográficas disponibles del terreno. Esto permitió determinar cómo deben realizarse las perforaciones para las tuberías.

De acuerdo con el artículo 144 del normograma SENA, para las conexiones domiciliarias, la pendiente mínima requerida para la tubería es del 2%. Además, en lo referente a la relación máxima entre la profundidad de flujo y el diámetro de la tubería en los sistemas de alcantarillado sanitario, el valor máximo permitido para la profundidad de flujo en el caudal de diseño de un colector es del 85%. Este límite es crucial para asegurar una adecuada aireación del flujo de aguas residuales, garantizando así el correcto funcionamiento del sistema. Con estos parámetros se contrastan las especificaciones de campo con las simulaciones realizadas en el software. Este proceso permitió visualizar de manera precisa cómo se deben ejecutar las perforaciones y alineaciones de las tuberías, asegurando que las inclinaciones y profundidades cumplan con los estándares reglamentarios, optimizando así la eficiencia del sistema de humedales proyectado.

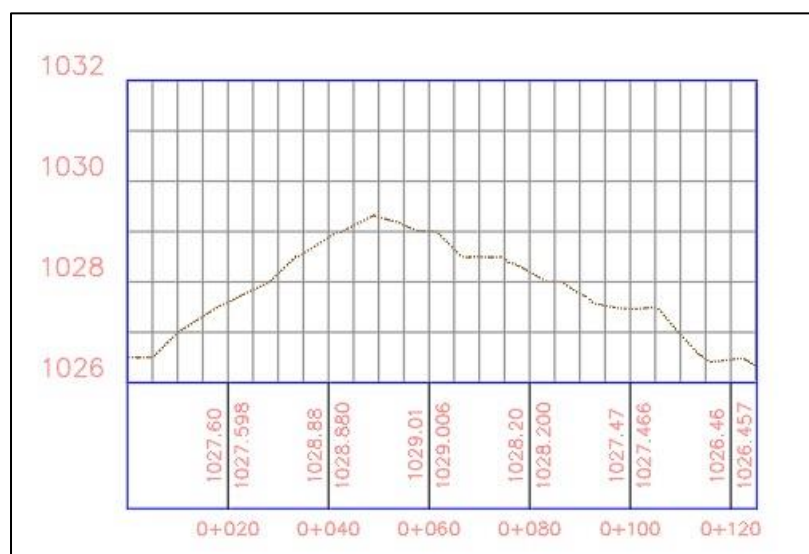


Ilustración 34. Perfil terreno



Ilustración 35. Vista en planta humedal de flujo vertical tipo francés

Tubería

Para el diseño de la tubería de alcantarillado que direccionará las aguas residuales desde la caja residual donde confluyen los edificios de Casa Ceibas, Laboratorio de Nutrición y Villa Javier hasta la cota de llegada al humedal, se optará por el método constructivo de alcantarillado convencional (con zanja) puesto que el flujo a gravedad presenta numerosas ventajas que lo hacen una opción preferida en sistemas de tratamiento de agua residual. Entre sus beneficios destacan su bajo costo operativo, el mínimo requerimiento de mantenimiento y la reducida necesidad de capacitación técnica del personal. Además, este sistema es altamente confiable y no depende del suministro de energía eléctrica para su funcionamiento. Su única exigencia técnica es contar con pendientes adecuadas, generalmente entre el 1% y el 2%, para asegurar el transporte eficiente del flujo, lo que puede implicar excavaciones profundas en terrenos planos. (SSWM, s.f.)

Por otro lado, el flujo a presión, que utiliza bombas para impulsar las aguas residuales, ofrece una solución eficiente para zonas planas o donde las condiciones topográficas no permiten el flujo por gravedad. Antes de transportar el agua residual, los sólidos grandes son triturados para prevenir obstrucciones en las tuberías, garantizando un funcionamiento adecuado. Sin embargo, este sistema presenta desventajas significativas, como su dependencia continua de energía eléctrica y la necesidad de equipos mecánicos como bombas, que requieren mantenimiento constante y pueden comprometer la sostenibilidad ecológica. Además, en caso de un corte de energía eléctrica

y en ausencia de generadores de respaldo, existe el riesgo de desbordamiento del sistema, lo que podría generar problemas ambientales y operativos.

En el caso del humedal de flujo vertical tipo francés que nos ocupa, se optó por un sistema de flujo por gravedad debido a sus claras ventajas en términos de sostenibilidad y simplicidad operativa. Este sistema no requiere consumo energético a lo largo de su vida útil, reduciendo significativamente su impacto ambiental y económico. Además, al prescindir de equipos mecánicos como bombas, minimiza los costos y el mantenimiento, alineándose con los principios de sostenibilidad ecológica que fundamentan el diseño del humedal. Por ende, el flujo por gravedad no solo es una solución eficiente y confiable, sino también la opción más amigable con el medio ambiente y adecuada para el contexto de este proyecto.

De esta manera, se dispuso de los programas AutoCAD Civil 3D y EPA SWMM para este fin, el primer programa se utilizó primordialmente para poder obtener el perfil de terreno teniendo en cuenta un trazado favorable que no interfiera con otras estructuras existentes en dicho trazado el cual se puede observar en la Ilustración 36, el segundo programa fue de gran ayuda para poder definir cuál debería ser el diámetro de la tubería en cuestión. El plano a detalle del trazado de la tubería en cuestión se puede encontrar en el **ANEXO1_VISTA EN PLANTA TUBERÍA**.



Ilustración 36. Trazado de tubería en Civil 3D

Con base en este trazado el programa genera un perfil de terreno en cual se incluyen cada una de las respectivas cámaras (en este caso son 4), dicho perfil brinda una percepción sobre la pendiente que llevará cada uno de los tramos de tubería que conectará las respectivas cámaras dispuestas al igual que sus profundidades. La Ilustración 37 muestra el perfil de la tubería proyectada en Civil 3D.

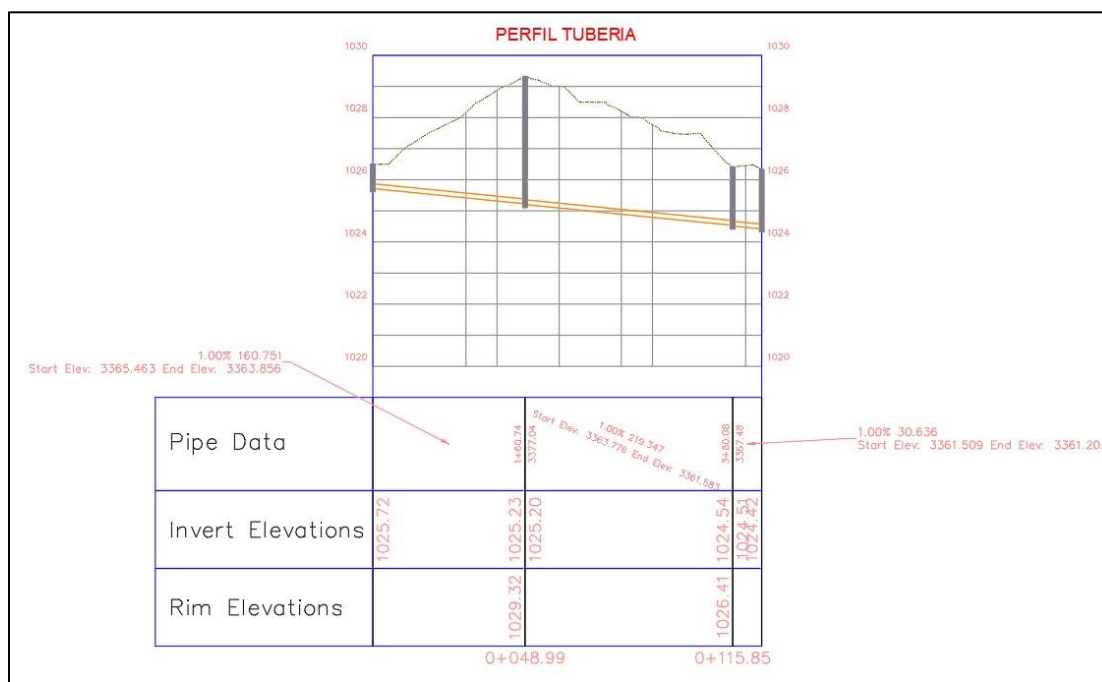


Ilustración 37. Perfil tubería Civil 3D

Posteriormente se hace uso del programa EPA SWMM donde principalmente se insertará la información correspondiente a los nodos (cámaras) y los correspondientes tramos de tubería observados en la ilustración anterior los cuales son 3, la información digitada en el programa correspondiente a los nodos y tubería se muestran a continuación (a manera de ejemplo se mostrará la información correspondiente al nodo 1 y al tramo de tubería 1 en la Ilustración 38). El modelado en el software EPA SWMM se encuentra en el **ANEXO2_ MODELACION TUBERÍA EPA SWMM**.

| Junction N1 | | Conduit TUB1 | |
|-----------------|----------|---------------|--------------|
| Property | Value | Property | Value |
| X-Coordinate | 7994.083 | Inlet Node | N1 |
| Y-Coordinate | 1349.112 | Outlet Node | N2 |
| Description | | Description | |
| Tag | | Tag | |
| Inflows | YES ... | Shape | CIRCULAR ... |
| Treatment | NO | Max. Depth | 0.15 |
| Invert El. | 1025.74 | Length | 63.45 |
| Max. Depth | 0.765 | Roughness | 0.009 |
| Initial Depth | 0 | Inlet Offset | 0 |
| Surcharge Depth | 0 | Outlet Offset | 0 |
| Ponded Area | 0 | Initial Flow | 0 |

Ilustración 38. Información nodo 1 y tramo de tubería 1.

El nodo 1 hace referencia a la cámara B12A en la cual confluyen las aguas residuales de los tres edificios, esta información fue corroborada con el proyecto del grupo de la estudiante Laura Martínez, cabe resaltar que se toma la decisión de clausurar el paso de agua de esta cámara hacia la cámara B77 con el fin de poder tratar todo el caudal que fluya a través de esta. Posterior al ingreso de los datos de nodos y tramos de tubería se procede a correr el programa y se verifica que con el diámetro seleccionado de 6” no haya presencia de fugas a lo largo de toda la sección. Esta información puede ser verificada en la Ilustración 39.

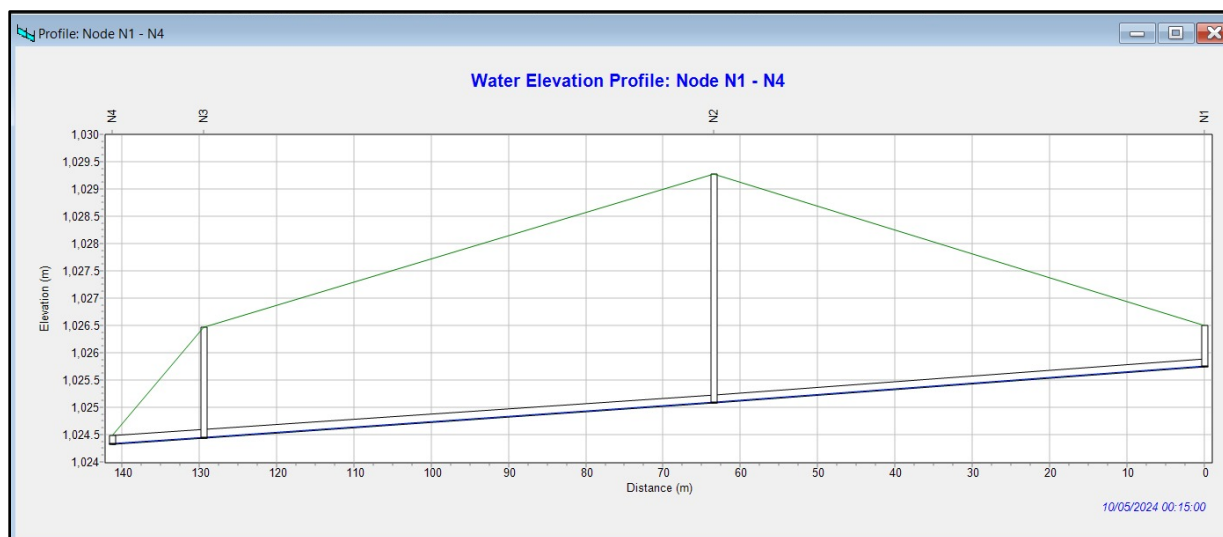


Ilustración 39. Verificación de diámetro seleccionado

De igual manera, se realizó en campo una medición aproximada de la ruta que seguiría la tubería de alcantarillado en cuestión, la información recolectada se muestra en el

ANEXO3_TRAMOS TUBERÍA. Luego, suponiendo una capa líquida de 3 cm de espesor, se presume que las características de cada lote de alimentación serán de 2,7 m³/lote y que el caudal a tratar será de 25,5 m³/día, lo cual alcanzaría para un total de 9 lotes de alimentación que le corresponderían a cada filtro por jornal. La información de dichas características se encuentra en la Tabla 42.

Tabla 42. Características de cada lote de alimentación

| CARACTERISTICAS DE CADA LOTE DE ALIMENTACION | | |
|---|------|----------------------|
| Capa líquida | 0,03 | m |
| Volumen por lote | 2,7 | m ³ /lote |
| Numero de cargas por día | 9 | lotes/día |

Por lo anteriormente expuesto, el tanque de almacenamiento para poder tener una alimentación intermitente debe de tener la capacidad de albergar 3 m³ de agua aproximadamente, dado que el volumen por lote es de 2,7 m³, partiendo de esto lo ideal sería contar con una capacidad de almacenamiento de 3000 L, lo cual para fines prácticos se opta por la utilización de un tanque prefabricado que cuenta con las siguientes dimensiones:

- Altura: 190 cm.
- Ancho: 145 cm.
- Longitud: 210 cm

Una imagen representativa del tanque de almacenamiento puede observarse en la Ilustración 40 y a detalle en el **ANEXO4_MODELO 3D HUMEDAL**.

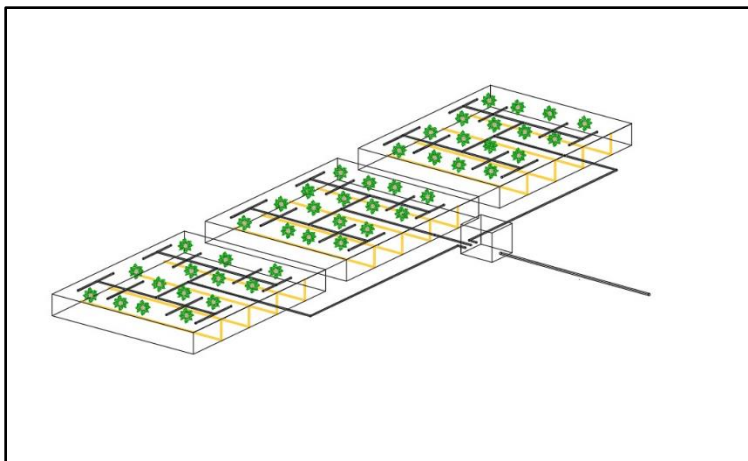


Ilustración 40. Tanque de almacenamiento para alimentar el humedal.

Desviación del arroyo

Para proceder con la excavación que permitirá instalar la tubería destinada a conducir las aguas residuales desde la caja B12A hacia el humedal, resulta indispensable desviar temporalmente el arroyo que atraviesa la universidad de oeste a este. Este arroyo forma parte de la Derivación 4 del río Pance, con una longitud total de 1,190 metros. La desviación se planifica específicamente en el puente que conecta la Casa Manresa con el edificio Cedro Rosado. En este punto, la Derivación 4 se divide en dos canales: uno que se dirige a la Planta de Tratamiento de Aguas Potables (PTAP) de la universidad, y otro que fluye hacia el humedal en el edificio Acacias. Esta apreciación se puede evidenciar en la Ilustración 41. Nuestro proyecto requiere únicamente intervenir el canal que abastece a la PTAP, adyacente al edificio Cedro Rosado, ya que la tubería ha sido diseñada para ubicarse exclusivamente en esta sección del arroyo.



Ilustración 41. Vista en planta y terreno derivación de arroyo

La intervención propuesta consiste en taponar temporalmente el arroyo en el canal adyacente al edificio Cedro Rosado y utilizar geobolsas (geobags) para desviar el flujo hacia el canal izquierdo, que desemboca en el humedal del edificio Acacias, contiguo a la Casa Manresa. Este desvío provisional permitirá realizar la excavación de manera segura, garantizando la correcta instalación de la tubería en la zona designada.

Las geobolsas a emplear, también conocidas como geobags, están elaboradas con geotextil tejido, lo que les permite ser rellenas con material del sitio o de cantera, formando barreras para usos múltiples, tales como protección, construcción de diques, rellenos, y otras aplicaciones hidráulicas (una representación de las geobolsas puede ser encontrada en la Ilustración 42). Estas geobolsas están equipadas con eslingas que facilitan su elevación y posicionamiento en áreas de difícil acceso. Las dimensiones estándar de las geobolsas son de 1.0 metro de alto, 1.0 metro de ancho y 1.20 metros de largo. Para este proyecto se utilizarán dos geobags, ya que las dimensiones requeridas para taponar el canal que conduce a la PTAP son de 2.0 metros de ancho y 1.20 metros de alto; no obstante, la altura del flujo del río no excede los 0.3 metros, lo que asegura la eficacia de la intervención.



Ilustración 42. Geobags [16]

Tanque de disposición final

Una vez que las aguas residuales han sido tratadas mediante el humedal vertical tipo francés, se conducen a través de una tubería de PVC de 4 pulgadas hasta un tanque de almacenamiento con capacidad de diez mil litros. El tanque contará con un sistema de rebose que permitirá que el agua excedente, cuando el tanque esté lleno, se dirija hacia el arroyo que pasa junto a él. Se espera que el agua almacenada en el tanque se utilice diariamente en actividades como el riego de jardines y áreas verdes, la recarga de acuíferos, entre otras aplicaciones. Un esquema en planta de cómo se ve representado este tanque de almacenamiento y el perfil de la tubería que conduce hasta el, se puede observar en la Ilustración 43 .

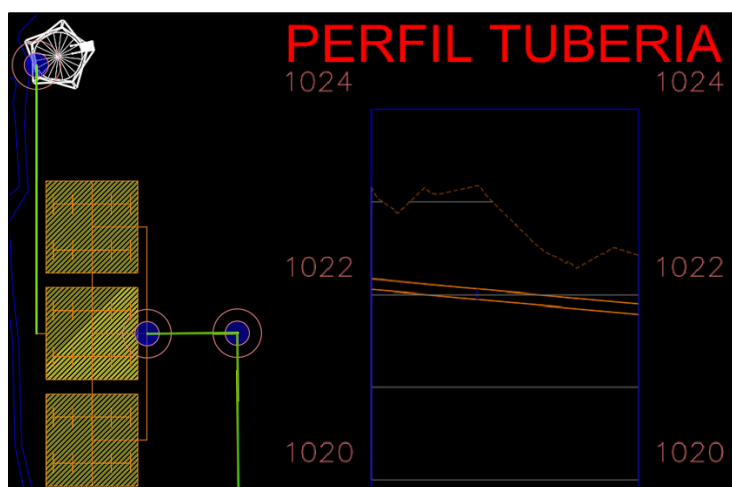


Ilustración 43. Vista en planta y perfil de tubería de tanque.

Presupuesto humedal

Para analizar el presupuesto se realizaron investigaciones de los precios en el Valle del Cauca, y se revisaron las canteras más cercanas a la obra en Cali para calcular la distancia que se recorrerá con los materiales e insumos. Considerando la proximidad de la ciudad de Cali con la obra, se decidió que todos los materiales se compraran en Cali o sus alrededores para reducir los costos de transporte, por lo que se tomaron los valores obtenidos de la Gobernación del Valle del Cauca. Estos valores corresponden a los del año 2021 – 2, por lo tanto, se les aplicó un incremento del 10% para reflejar la inflación que se presentó en el país, de modo que los precios sean lo más aproximado posible a los de este año. Los precios actuales no se encontraron, ya que solo se presentaron cifras de mitad del presente año. Después de tener todos los datos, se realizó la respectiva división de las actividades en siete capítulos: preliminares, explanaciones, impermeabilización, material filtrante de los humedales, tuberías, accesorios y acabados, desbaste de gruesos y cámaras de inspección, y, por último, el sifón autocebante para la Alimentación Intermitente. Para cada una de estas actividades, se hizo una subdivisión con las tareas específicas que se llevarán a cabo en cada caso. Todo esto se desarrolló con el fin de estructurar el presupuesto para la construcción de un humedal de flujo vertical tipo francés, que tratará las aguas residuales de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Por asuntos de claridad y según el análisis unitario de la gobernación del Valle, para las actividades de localización y replanteo, se ha establecido que por cada metro lineal se requiere 0.01 unidades de planos e impresiones, lo anterior implica que, por cada 100 metros lineales, será necesario contar una unidad de planos e impresiones. El presupuesto se puede contemplar en la Tabla 43 sin embargo los análisis de precios unitarios del proyecto se pueden encontrar en el **ANEXO5_Apus**.

Tabla 43. Presupuesto total

| Presupuesto Total | UNIDAD | VALOR UNITARIO | CANTIDAD | VALOR TOTAL |
|---|--------|------------------|----------|------------------|
| 1. PREELIMINARES | | | | |
| Localización y replanteo | ML | \$ 3.147,59 | 451 | \$ 1.419.563,02 |
| Cerramiento provisional, en tela cerramiento (Malla), verde, incluye estacones de mader | ML | \$ 7.533,23 | 370 | \$ 2.787.293,25 |
| Bolsas cerramiento | UND | \$ 6.332,76 | 50 | \$ 316.638,00 |
| 2. EXPLANACIONES | | | | |
| Desmonte y limpieza a maquina incluye acarreo volqueta-20 km | M2 | \$ 8.350,60 | 452,75 | \$ 3.780.734,15 |
| Excavacion conglomerado a maquina (Cargue) incluye reitro en volqueta -20 km | M3 | \$ 12.855,37 | 1009,05 | \$ 12.971.709,48 |
| Relleno con material de la excavacion | M3 | \$ 12.223,21 | 135 | \$ 1.650.133,01 |
| 3. IMPERMEABILIZACION | | | | |
| Impermeabilización con geomembrana de HDPE | UND | \$ 79.827,14 | 5,00 | \$ 399.135,68 |
| 4. MATERIAL FILTRANTE DE LOS HUMEDALES | | | | |
| Relleno grava | UND | \$ 4.218.549,24 | 3 | \$ 12.655.647,71 |
| 5. TUBERIAS, ACCESORIOS Y ACABADOS | | | | |
| Relleno con material de la excavacion | M3 | \$ 12.223,21 | 280 | \$ 3.422.498,10 |
| Accesorios tubería 6" | UNIDAD | \$ 200.523,70 | 1 | \$ 200.523,70 |
| Instalación de tubería sanitaria 6" | ML | \$ 43.296,73 | 140 | \$ 6.061.542,20 |
| Accesorios tubería 4" | UNIDAD | \$ 1.392.934,80 | 1 | \$ 1.392.934,80 |
| Instalación de tubería sanitaria 4" | ML | \$ 26.109,12 | 229,7 | \$ 5.997.264,86 |
| 6. DESBASTE DE GRUESOS Y CAMARAS DE INSPECCION | | | | |
| Rejilla desbaste de gruesos | UND | \$ 75.925,55 | 1 | \$ 75.925,55 |
| Camaras de Inspeccion | UND | \$ 10.742.869,27 | 1 | \$ 10.742.869,27 |
| 7. SIFON AUTOCEBANTE | | | | |
| Sifon autocebante | UND | \$ 16.968.470,52 | 1 | \$ 16.968.470,52 |
| Tanque del sifon autocebante | UND | \$ 5.437.208,45 | 1 | \$ 5.437.208,45 |
| 8. Tanque de almacenamiento | | | | |
| Tanque almacenamiento agua tratada | UND | \$ 11.298.268,05 | 1 | \$ 11.298.268,05 |
| | | | | \$ 97.578.359,80 |

| | | |
|----------------|-----|------------------|
| Administracion | 20% | \$ 19.517.985,64 |
| Imprevistos | 4% | \$ 3.903.134,39 |
| Utilidad | 5% | \$ 4.878.917,99 |

| | | |
|-----------|-----|------------------|
| Total AIU | 29% | \$ 28.300.038,03 |
|-----------|-----|------------------|

| | | |
|--------------|--|-------------------|
| Total Costos | | \$ 125.878.397,82 |
|--------------|--|-------------------|

6.3. Matriz de decisión

A continuación, se presenta la matriz de decisión correspondiente a las dos alternativas del diseño del humedal para el tratamiento de aguas residuales. Esta matriz fue elaborada con base en la metodología descrita en el documento *"Estudio de Factibilidad de la Vía Terciaria 'Puente Quemao' entre K6+523.57 y K8+894.38 del Municipio de Toribío, Cauca"*, realizado por Stephany Rodríguez Rengifo, Cristian Duván Quintero Méndez, Juan José Soto Rosasco, Camilo Caicedo Espinosa y José Manuel Olaya Cabezas, y proporcionado al grupo por el profesor Camilo Cañón.

La metodología utilizada para calificar las alternativas asigna un peso porcentual a cada criterio de evaluación, distribuido de la siguiente manera: **Impacto Ambiental (50%)**, **Costos (25%)**, **Eficiencia (15%)** y **Diseño (10%)**. Cada criterio está subdividido en ítems con valores porcentuales específicos, de modo que la suma de los ítems corresponde al peso total del criterio. La suma de todos los valores porcentuales de los ítems es del 100%. Para más detalles, se recomienda consultar la Tabla 44 donde se encuentran los ítems en la segunda columna ("Item") y sus respectivos porcentajes en la última columna ("%").

La calificación de los ítems se realiza utilizando una escala numérica de **1 a 3**, donde:

- **1:** Malo
- **2:** Regular
- **3:** Bueno

Estas calificaciones se asignan en la columna denominada "Puntaje". Posteriormente, el puntaje de cada ítem se multiplica por su porcentaje correspondiente, y el resultado se consigna en la columna "Valor". La suma de esta columna otorga el puntaje total de cada alternativa.

En este análisis, se evaluarán los tres tipos de humedales propuestos en las dos ubicaciones previamente definidas, lo que resulta en un total de **seis alternativas** (tres para cada ubicación). La alternativa con mayor puntaje será seleccionada como la más adecuada.

De los diferentes criterios evaluados, el **Impacto Ambiental** es el de mayor relevancia, lo que refleja la importancia de la conservación ambiental en este proyecto. Este enfoque está alineado con el compromiso de la Universidad Javeriana Cali con la sostenibilidad. Por tanto, las alternativas con menor impacto ambiental negativo recibirán mayor puntaje.

El segundo criterio más relevante es el de **Costos**, donde se prioriza una inversión baja siempre que se mantengan los estándares de calidad requeridos para el proyecto. En este caso, las alternativas con menores costos obtendrán una mayor calificación.

El tercer criterio, la **Eficiencia**, evalúa la capacidad de la alternativa para tratar los contaminantes más comunes presentes en el agua residual del campus. Este aspecto es clave, ya que abre posibilidades para el uso de esta agua tratada con fines no domésticos. Las alternativas que logren mayor remoción de contaminantes obtendrán mayores puntajes.

Finalmente, el criterio de **Diseño** considera aspectos como el dimensionamiento del humedal y la complejidad tanto del diseño como de la construcción. Las alternativas más convenientes en términos de ubicación y que requieran menores áreas y volúmenes de corte y relleno obtendrán mejores calificaciones.

En los resultados arrojados por la matriz de decisión se puede observar que la opción más viable es el humedal vertical de tipo francés en la ubicación del laboratorio de nutrición, casa ceibas y villa Javier, este resultado refleja la gran eficiencia que tiene el humedal del tipo francés para el tratamiento debido a que este no necesita un tratamiento primario para tratar las aguas residuales traduciéndose en una ventaja con respecto al resto de los humedales en cuanto a la remoción de contaminantes además este pretratamiento representa mayor complejidad e inversión en las otras alternativas de humedales al ser obras complementarias que se necesitan para el correcto funcionamiento de los humedales de flujo libre y horizontal, haciendo así la alternativa de humedal vertical tipo francés la más eficiente, menos compleja y amigable con el medio ambiente. La ubicación elegida es importante porque refleja un menor impacto ambiental negativo para el campus, adicionalmente en el ítem de diseño muestra una clara ventaja en cuanto a las áreas necesarias y volúmenes de corte que necesita lo que se traduce a su vez en una menor inversión en la construcción del humedal. La matriz de decisión se ve a continuación en la Tabla 44 y en el **ANEXO6_MATRIZ DE DECISION**.

Tabla 44. Matriz de decisión

| | |
|----|-----------|
| 1 | Malo |
| 2 | Regular |
| 3 | Bueno |
| NA | No aplica |

| | | Ubicación preliminar (Acacias y Centro de Bienestar) | | | | | | Ubicación final (Laboratorio de nutrición, Casa Ceibas, Villa Javier) | | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|--|--------|--------------------------|--------|-------------------------------------|--------|---|--------|------------------------------|--------|-------------------------------------|-------|--------|-------|
| | | Humedal Flujo Libre | | Humedal Flujo Horizontal | | Humedal Flujo Vertical Tipo Francés | | Humedal Flujo Libre | | Humedal Flujo Subsuperficial | | Humedal Flujo Vertical Tipo Francés | | | |
| Aspecto | Item | Puntaje | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje | Valor | % | |
| 10% | Diseño | Área necesaria | 1 | 0,04 | 2 | 0,08 | 1 | 0,04 | 1 | 0,04 | 2 | 0,08 | 3 | 0,12 | 4% |
| | | Ubicación | 1 | 0,01 | 1 | 0,01 | 2 | 0,02 | 2 | 0,02 | 2 | 0,02 | 3 | 0,03 | 1% |
| | | Volumen de corte | 1 | 0,02 | 1 | 0,02 | 1 | 0,02 | 1 | 0,02 | 1 | 0,02 | 2 | 0,04 | 2% |
| | | Volumen de relleno | 2 | 0,04 | 1 | 0,02 | 2 | 0,04 | 2 | 0,04 | 1 | 0,02 | 2 | 0,04 | 2% |
| | | Tiempo de ejecución | 2 | 0,02 | 2 | 0,02 | 1 | 0,01 | 2 | 0,02 | 2 | 0,02 | 2 | 0,02 | 1% |
| 50% | Impacto ambiental | Area verde afectada | 2 | 0,2 | 2 | 0,2 | 1 | 0,1 | 2 | 0,2 | 2 | 0,2 | 3 | 0,3 | 10% |
| | | Reservas naturales | 1 | 0,1 | 1 | 0,1 | 1 | 0,1 | 2 | 0,2 | 2 | 0,2 | 3 | 0,3 | 10% |
| | | Conservación ambiental | 1 | 0,1 | 1 | 0,1 | 1 | 0,1 | 2 | 0,2 | 2 | 0,2 | 3 | 0,3 | 10% |
| | | Afectación de hábitats | 1 | 0,05 | 1 | 0,05 | 1 | 0,05 | 3 | 0,15 | 3 | 0,15 | 3 | 0,15 | 5% |
| | | Flora terrestre | 1 | 0,025 | 1 | 0,025 | 2 | 0,05 | 2 | 0,05 | 2 | 0,05 | 2 | 0,05 | 2,5% |
| | | Flora acuatica | NA | - | NA | - | NA | - | NA | - | NA | - | NA | - | 2,5% |
| | | Calidad visual y paisaje | 2 | 0,1 | 2 | 0,1 | 1 | 0,05 | 2 | 0,1 | 2 | 0,1 | 3 | 0,15 | 5% |
| Calidad de vida de la población | 3 | 0,15 | 3 | 0,15 | 3 | 0,15 | 3 | 0,15 | 3 | 0,15 | 3 | 0,15 | 5% | | |
| 25% | Costos | Costo general de la obra | 2 | 0,5 | 2 | 0,5 | 2 | 0,5 | 2 | 0,5 | 2 | 0,5 | 2 | 0,5 | 25% |
| 15% | Eficacia | DBO5 | 2 | 0,075 | 3 | 0,1125 | 3 | 0,1125 | 2 | 0,075 | 3 | 0,1125 | 3 | 0,1125 | 3,75% |
| | | DQO | 2 | 0,075 | 2 | 0,075 | 3 | 0,1125 | 2 | 0,075 | 2 | 0,075 | 3 | 0,1125 | 3,75% |
| | | SST | NA | - | 3 | 0,1125 | 3 | 0,1125 | NA | - | 3 | 0,1125 | 3 | 0,1125 | 3,75% |
| | | NTK | 1 | 0,0375 | 2 | 0,075 | 2 | 0,075 | 1 | 0,0375 | 2 | 0,075 | 2 | 0,075 | 3,75% |
| Total puntos por alternativa | | | 1,5425 | - | 1,7500 | - | 1,6425 | - | 1,8775 | - | 2,0850 | 2,5625 | 1 | | |

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proyecto de diseño de un humedal de tratamiento en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali optó por el sistema de humedal vertical tipo francés debido a su destacada eficiencia en la eliminación de contaminantes, permitiendo una depuración óptima del agua residual mediante la oxigenación del sustrato y la actividad biológica intensificada. A lo largo del proyecto, se evaluaron diversas alternativas y ubicaciones, considerando factores ambientales y técnicos. La ubicación final fue seleccionada estratégicamente para maximizar la funcionalidad del sistema, evitando áreas ecológicamente sensibles y respetando la normativa vigente. Esto resultó en un diseño que no solo reduce significativamente la carga contaminante del agua residual, sino que también facilita su reutilización en actividades no potables, promoviendo el ahorro de agua potable y fortaleciendo la sostenibilidad dentro del campus.

A pesar de los desafíos relacionados con el espacio y las condiciones topográficas, se logró un diseño eficiente y compacto que demuestra la capacidad de los humedales para adaptarse a entornos urbanos e integrarse de manera armoniosa en el paisaje. Este proyecto no solo aborda la gestión hídrica del campus, sino que también establece un modelo replicable de tratamiento natural de aguas residuales, destacándose como una solución ecológica que equilibra funcionalidad y preservación del entorno. Además, el diseño incorpora la flexibilidad necesaria para adaptarse a futuras variaciones en las condiciones locales, garantizando su eficacia a largo plazo y asegurando un impacto positivo en la calidad del agua y en la gestión ambiental de la universidad.

Como parte del adecuado mantenimiento del humedal vertical tipo francés y para garantizar su óptimo funcionamiento es fundamental que el operario encargado realice rotaciones del flujo de agua cada 3 días y medio, abriendo y cerrando las válvulas según el diseño, verificando su correcto funcionamiento. Además, se recomienda la limpieza periódica de rejillas y sistemas de pretratamiento para prevenir obstrucciones, así como la inspección de los lechos filtrantes para garantizar su permeabilidad, aplicando aireación superficial si es necesario.

El mantenimiento de las plantas es esencial, incluyendo la poda y remoción de aquellas que estén muertas o en mal estado, mientras se controla la proliferación de maleza y vectores, como mosquitos. También se sugiere monitorear cada 6 meses la calidad del agua de entrada y salida del humedal, evaluando parámetros como DBO, DQO, nutrientes y sólidos suspendidos, ajustando el mantenimiento según los resultados. Es importante capacitar al personal operativo en

el funcionamiento y resolución de problemas del sistema, llevando un registro detallado de actividades realizadas. Por último, se deben revisar con frecuencia los componentes hidráulicos y estructurales, y realizar una evaluación técnica anual para identificar posibles ajustes o reparaciones necesarias. Estas acciones contribuirán a garantizar la sostenibilidad y eficiencia del humedal en el tiempo.

REFERENCIAS

Medina, C., & Ortíz, J. (2023). *Cierre de un humedal vertical tipo “francés” para el tratamiento de lodos* [UNIVERSIDAD DEL AZUAY]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/13410/1/18935.pdf>

El humedal de tipo francés tiene una alta eficiencia en remoción de los contaminantes analizados y produce un efluente con la suficiente calidad para reutilizar el agua. (2020). UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA. <https://www.upv.es/contenidos/CAPLANET/info/1190538normalc.html>

Federal Ministry for Economic Cooperation and Development & Sustainable sanitation ecosan. (2011). *Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas.* Dra. Elisabeth von Muench. <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Revision-T--cnica-de-Humedales-Artificiales.pdf>

Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & Von Sperling, M. (2017). *HUMEDALES PARA TRATAMIENTO.* Nova Techset. <https://doi.org/10.2166/9781789062526>

Buitrago, A. (2022). *Estudio comparativo del consumo energético y huella de carbono producida por la depuración de aguas residuales mediante EDAR Frente a la utilización de humedales artificiales, en la cuenca de Carraixet, València España.* <https://iconline.ipleiria.pt/bitstream/10400.8/7742/1/Estudio%20comparativo%20HC%20y%20consumos%20energ%C3%A9ticos%20EDAR%20Vs%20Humedales%20Artificiales.pdf>

Langergraber, G., Dotro, G., Nivala, J., Rizzo, A., & Stein, O. (2021). *Tecnología de humedales para tratamiento Información práctica para el diseño y aplicación de humedales para tratamiento.* Red Panamericana de Sistemas de Humedales. <https://doi.org/10.2166/9781789062342>

Alarcón, M., Zurita, F., Lara, J., & Vidal, G. (2018). *Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina.* Pontificia Universidad Javeriana Bogotá.

Gestión del recurso hídrico. (s. f.). Pontificia Universidad Javeriana Cali.
<https://www.javerianacali.edu.co/ecocampus/gestion-del-recurso-hidrico>

Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales: el sistema francés. (2018, 12 agosto). Iagua. <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/tratamiento-aguas-residuales-mediante-humedales-artificiales-sistema-frances-i>

Sustainable Sanitation and Water Management. (s. f.). Conducción por gravedad. SSWM.
<https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/conduccion-por-gravedad#:~:text=Un%20sistema%20de%20conduccion%20por,requerimientos%20f%C3%ADsico>

¹*Humedal de flujo libre.* (s. f.). Sandec/Eawag. https://akvopedia.org/wiki/Humedal_Artificial_de_Flujo_Superficial_Libre

²*Humedal Artificial de Flujo de Horizontal subsuperficial* - *Akvopedia.* (s. f.). https://akvopedia.org/wiki/Humedal_Artificial_de_Flujo_de_Horizontal_subsuperficial

³*Humedal de flujo vertical tipo francés.* (s. f.). Iagua. <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/tratamiento-aguas-residuales-mediante-humedales-artificiales-sistema-frances-i>

⁴ *Esquema operativo de la primera etapa del sistema francés.* (s. f.). ResearchGate. https://www.researchgate.net/profile/Ismael-Vera-Puerto/publication/350823451_Humedales_para_Tratamiento/links/607496fe92851cb4a9d80902/Humedales-para-Tratamiento.pdf

⁵*Filtro primera etapa.* (s. f.). ResearchGate. https://www.researchgate.net/profile/Ismael-Vera-Puerto/publication/350823451_Humedales_para_Tratamiento/links/607496fe92851cb4a9d80902/Humedales-para-Tratamiento.pdf

⁶*Filtro segunda etapa.* (s. f.). ResearchGate. https://www.researchgate.net/profile/Ismael-Vera-Puerto/publication/350823451_Humedales_para_Tratamiento/links/607496fe92851cb4a9d80902/Humedales-para-Tratamiento.pdf

⁷*Planta Phragmites sp.* (s. f.). PlantasFlores. <https://plantasflores.com/phragmites-australis/>

⁸Gómez, A. (2016). Apique 1. En *ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA LA REFORMA y CONSTRUCCIÓN DE AULAS DE CLASE EN EL CENTRO DE BIENESTAR DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI.* Pontificia Universidad Javeriana Cali.

⁹*Vista perfil humedal de flujo vertical tipo francés.* (s. f.). Espina Grupo Valtalia. <https://espina.es/2024/04/24/adjudicaciones-construccion-de-la-agrupacion-de-vertidos-y-edar-de-la-granjuela-cordoba/>

¹⁰*Impermeabilización.* (2017, 13 junio). EPSAR. <https://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2018-07/Experiencias%20en%20la%20construccion%20de%20humedales%20en%20la%20provincia%20de%20Castell%20de%20la%20Plana%20-%202017.pdf>

¹¹*Sistema de drenaje.* (2017, 13 junio). EPSAR. <https://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2018-07/Experiencias%20en%20la%20construccion%20de%20humedales%20en%20la%20provincia%20de%20Castell%20de%20la%20Plana%20-%202017.pdf>

¹²*Chimenea de ventilación.* (2017, 13 junio). EPSAR. <https://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2018-07/Experiencias%20en%20la%20construccion%20de%20humedales%20en%20la%20provincia%20de%20Castell%20de%20la%20Plana%20-%202017.pdf>

¹³*Sistema de distribución.* (s. f.). ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Distribucion-de-aguas-residuales-en-un-humedal-de-FV-tipo-frances-arriba-primera-etapa_fig14_350823451

¹⁴*Llenado del tanque.* (2015, 24 agosto). [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=wmn4EkP15dk&ab_channel=FedericoBeisso

¹⁵*Sifón sumergido.* (2015, 24 agosto). [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=wmn4EkP15dk&ab_channel=FedericoBeisso

¹⁶*Geobags.* (s. f.). Gabion Technologies India Pvt. Ltd. Recuperado 14 de noviembre de 2024, de <https://gabionindia.com/products/gti-geotextiles-and-geo-bags/>