

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN
HUMEDAL ARTIFICIAL EN SÁMARA, GUANACASTE, PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS Y GRISES Y SU REUSO EN SERVICIOS
SANITARIOS EN UN COMPLEJO TURÍSTICO**

Trabajo Final de Graduación sometido a la consideración de la

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Como parte de los requisitos para aspirar al título de grado de

LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DE BIOSISTEMAS

PAULA DANIELA CÉSPEDES VILLALOBOS

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica

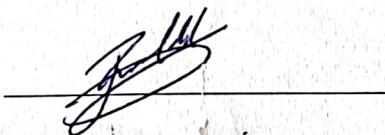
2022

Trabajo Final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas



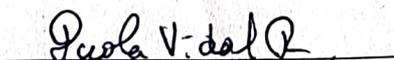
Ing. Paula Daniela Céspedes Villalobos, Bach

Candidata



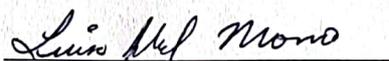
Ing. Ronald Aguilar Álvarez, Ph.D.

Director, Comité Asesor



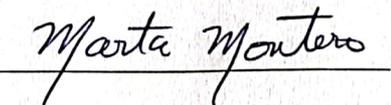
Ing. Paola Vidal Rivera

Miembro, Comité Asesor



Biol. Luisa Moreno Scott

Miembro, Comité Asesor



Ing. Marta Montero Calderón, PhD

Miembro, Comité Examinador



Ing. Sisgo Acuña Chinchilla. M.Sc

Miembro, Comité Examinador

Dedicatoria

A mi mamá, Kattia y mi papá, Mario, quienes fueron los pilares más importantes de este esfuerzo.

A mis hermanos, Alejandro y Emiliano; y a mi hermana, Natalia, que siempre creyeron en mí.

A mi novio André, quien es fiel alentador en los momentos más difíciles.

A mis compañeras y compañeros de universidad que acompañaron este camino entre cafés y noches de estudio.

A mis amigas y amigos cercanos que siempre se preocuparon por mí.

Y a todas aquellas personas que me encontré en el camino y me brindaron su sonrisa para seguir adelante

Agradecimientos

Primero al profesor Ronald Aguilar Álvarez por la confianza depositada en mí para la realización de esta tarea, por su atención, consejos y recomendaciones para este trabajo y para la vida.

A Nicolette Smith y a todo su equipo en el Hotel Pensión Playa Sámara por permitir realizar este trabajo en ese lugar tan lleno de potencial. Especial agradecimiento a Geison Villareal, quien siempre estuvo atento a responder mis dudas y a brindarme información.

A mis lectoras Luisa Moreno Scott y Paola Vidal Rivera quienes aceptaron este reto de acompañarme en el proceso y brindarme sus atinadas y necesarias recomendaciones.

A la Escuela de Ingeniería de Biosistemas y a la directora, la Sra. Marta Montero Calderón, por permitirme crecer profesional y personalmente desde el 2014.

A la Universidad de Costa Rica, por lo mucho que me enseñó y me permitió conocer en el camino.

RESUMEN

Se realizó este proyecto de graduación con el objetivo de ejecutar un análisis de prefactibilidad técnica para la construcción de un humedal artificial en el Hotel Playa Pensión Sámara (HPPS) para el tratamiento de aguas negras y grises y su reúso en servicios sanitarios. El HPPS se ubica en Sámara, Nicoya, Costa Rica. El hotel tiene una capacidad de 37 huéspedes, los cuales consumen en promedio aproximadamente $5,8 \text{ m}^3/\text{d}$ de agua potable y producen aproximadamente $4,6 \text{ m}^3/\text{d}$ de agua residual. Esta diferencia entre consumo y producción de agua residual se debe a la utilización de agua potable para actividades que no generan agua residual como limpieza de superficies y uso de piscina.

En la actualidad, el HPPS dispone las aguas residuales mediante 3 tanques sépticos y un drenaje. En la entrada de este drenaje, se realizó la medición del parámetro de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que es una medición indirecta de la cantidad de materia orgánica en el agua residual, dando como resultado 544 mg/L sobrepasando el límite máximo permitido indicado en el Capítulo 1, Artículo 8 del Reglamento para la disposición al subsuelo de aguas residuales ordinarias tratadas, el cual es de 150 mg/L [1]. Además, existe una preocupación por el mal funcionamiento de los tanques sépticos instalados debido a que tienen bombas hidráulicas que dirigen el agua residual hacia el drenaje, sin permitir una correcta sedimentación de sólidos. Por otra parte, en ocasiones el drenaje colapsa porque el volumen de aguas residuales es mayor a lo que soporta el suelo, esta problemática aumenta en temporada lluviosa y ocasiona malos olores. Por lo tanto, se diseñó un sistema de tratamiento primario con un tanque séptico adecuado al caudal de agua residual y un sistema de tratamiento secundario con un humedal artificial de flujo subsuperficial donde se procura disminuir sus contaminantes para utilizar esta agua para reúso en los servicios sanitarios y así disminuir el caudal que se dispone en el drenaje.

El diseño de estos dos sistemas fue realizado con base a información proporcionada por la administradora del Hotel como planos, registro de consumo de agua potable solicitado a la ASADA de Sámara, registro de ocupación y otra información específica del uso del agua en el Hotel. Se realizó una visita al sitio de estudio donde se obtuvo más información del arreglo de tuberías instalado, ubicación de tanques sépticos y la ubicación específica de servicios sanitarios, duchas, lavatorios, entre otros. Asimismo, se analizaron las posibles ubicaciones del humedal artificial, las cuales fueron consultadas por la administradora considerando sus ventajas y desventajas. También, de manera remota se obtuvieron datos climatológicos del IMN de las estaciones más cercanas y así estimar la temperatura del agua residual.

Una vez recopilada la información anterior, se obtuvieron los datos específicos para el diseño de tanque séptico y del humedal artificial. Estos datos se refieren a la cantidad de agua a tratar (caudal), temperatura del agua residual, cantidad de huéspedes, porosidad del medio filtrante y la concentración del contaminante objetivo, el cual será la carga orgánica. El diseño del tanque séptico fue realizado en base a la metodología propuesta en el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones [2] y el diseño del humedal artificial se realizó con base a la fórmula de flujo de tapón modificado $k-C^*$ que propone que una cantidad de contaminante se almacenará en el sistema durante su implementación.

Como resultado de los diseños, se obtuvo un tanque séptico de $4,5 \text{ m}$ de largo, $1,5 \text{ m}$ de ancho y $1,5 \text{ m}$ de profundidad, para un volumen total de $10,1 \text{ m}^3$. Se ubicaría en el área del parqueo del Hotel porque está cercano a la calle pública y no implicaría la reducción del espacio del parqueo debido a que estaría bajo la superficie. En cuanto al humedal artificial, se decidió que sería del tipo subsuperficial de flujo horizontal, pues presenta ventajas en la ausencia de olores no deseados y mosquitos, si se compara uno del tipo subsuperficial vertical. Este sistema de tratamiento secundario tendría $9,5 \text{ m}$ de largo, $3,5 \text{ m}$ de ancho y $0,6 \text{ m}$ de profundidad con un

tiempo de retención hidráulica de 24 horas como mínimo. Estará ubicado en un espacio disponible que está al frente del hotel, que en principio era el lugar que la administradora Nicolette Smith había recomendado. Después del humedal artificial, se propone colocar un tanque de almacenamiento de 5 m³ para utilizar el efluente recuperado para reúso en los servicios sanitarios.

Una vez obtenidos los diseños, se propone agregar tubería PVC sanitaria desde el drenaje actual hasta conectar el tanque séptico y el humedal artificial, aprovechando toda la tubería instalada en el sitio. En cuanto al sistema de reúso, se realizaron los cálculos hidráulicos respectivos para determinar la altura mínima del tanque de almacenamiento del agua tratada para reúso. En una primera etapa del proyecto, se recomienda abastecer los seis servicios sanitarios más próximos al HA. Utilizando la metodología indicada en el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones, se obtuvo que el tanque de almacenamiento debe de estar colocado por lo menos a 6,1 m de altura y se utilizará tubería PVC con un diámetro nominal de 25 mm (1”).

Por último, se realizó una cotización de todos los materiales necesarios para la construcción como el material para concreto, accesorios de tubería, tubería PVC, sustrato para el humedal artificial, tanque de almacenamiento. Se determinó que se necesita una inversión de ₡2 927 531 en total. También, se determinó que si se dan condiciones ideales y se pudieran reutilizar 2,5 m³ diarios se podría ahorrar hasta un total de ₡428 000 anuales en consumo de agua potable.

Adicionalmente, se detallaron los aspectos requeridos en el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales, en el cual solicita en el Artículo 29 un manual de operación y mantenimiento que incluirá información como la descripción del proceso, información básica de diseño, personal y equipo necesario, puesta en marcha, posibles problemas, mantenimiento e información de los desechos producidos en todo el sistema.

Se concluye que el humedal artificial es un sistema de tratamiento secundario viable para esta edificación. Pues los costos son razonables y su operación y mantenimiento consiste en tareas sencillas realizables por el personal de mantenimiento del HPPS. Se recomienda continuar con la investigación del mecanismo automatizado de la conexión para reúso en los servicios sanitarios, también es importante el seguimiento del sistema una vez construido, con toma de datos de caudal y de calidad para mantener un registro. Por último, se sabe que al ser un hotel una de las limitaciones es la construcción del sistema sin que cause inconformidad a los huéspedes, por lo anterior se recomienda realizarla en meses de menor visitación.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	v
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	16
1.1 Justificación	16
1.2 Planteamiento del problema.....	19
1.3 Objetivos del proyecto	20
1.3.1 Objetivo general.....	20
1.3.2 Objetivos específicos	20
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Aguas residuales para pequeñas y grandes poblaciones.....	21
2.2 Agua residual: etapas de tratamiento y parámetros fisicoquímicos.....	26
2.2.1 Aspectos físicos y químicos del agua residual.....	27
2.2.2 Humedales artificiales: definición, componentes y tipos	29
2.2.3. Diseño de humedales artificiales	34
2.3 Marco legal	36
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	40
3.1 Caracterización del sitio de estudio	40
3.1.1 Descripción de instalaciones sanitarias en el Hotel Playa Pensión Sámara.....	41
3.2 Diseño del sistema de tratamiento de las aguas residuales	42
3.2.1 Diseño del sistema de tratamiento primario.....	42
3.2.2 Diseño del sistema de tratamiento secundario – humedal artificial.....	44

3.2.3 Dimensionamiento de los tanques de captación y almacenamiento para reúso.....	47
3.2.4 Cálculo hidráulico para tanque de almacenamiento para reúso y tubería.....	47
3.3 Costos, aspectos constructivos y normativos a evaluar para la implementación del humedal artificial.	50
3.3.1 Cotización de los materiales para el sistema de tratamiento de aguas residuales para el HPPS	50
3.3.2 Aspectos adicionales incorporados en el proyecto.	50
3.3.3 Aspectos constructivos del humedal artificial	50
3.3.4 Operación y mantenimiento del humedal artificial.....	51
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
4.1. Caracterización del sitio de estudio: distribución de unidades sanitarias y caracterización del agua residual en el Hotel Pensión Playa Sámara.	53
4.1.1. Descripción de la edificación y distribución de sus unidades sanitarias.	53
4.1.2. Descripción de la red de tuberías de aguas residuales hasta su vertido final.....	57
4.1.3. Caracterización del agua residual y medición del parámetro DQO.....	60
4.2. Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales del HPPS	63
4.2.1. Posibles sitios para la ubicación del humedal artificial en el HPPS	63
4.2.2. Caudal de diseño	66
4.2.3. Dimensionamiento del tratamiento primario	68
4.2.4. Cálculo del dimensionamiento del humedal artificial	70
4.2.5. Selección del humedal artificial.....	80

4.2.6 Dimensionamiento del tanque de captación y almacenamiento de agua para reúso	82
4.2.7. Plantas por utilizar en el humedal artificial	83
4.2.8. Construcción del sistema de tratamiento y planos del diseño.....	85
4.2.9 Conexión de la tubería de reúso.....	88
4.3. Inversión fija del sistema de tratamiento de agua residual para el HPPS	94
4.3.1 Materiales del sistema de tratamiento.....	94
4.3.2 Mano de obra	97
4.3.3 Alquiler de maquinaria para excavación.....	97
4.3.4 Gastos administrativos e imprevistos.....	97
4.4 Estimación de beneficio económico por la implementación del sistema de reúso.	98
4.5. Operación y mantenimiento del humedal artificial. Artículo 29 – Decreto N° 31545-S-MINAE	98
4.5.1. Descripción del Proceso Industrial	99
4.5.2. Procesos de tratamiento.	100
4.5.3. Información básica de diseño.....	102
4.5.4. Personal.....	103
4.5.5 Equipo	103
4.5.6. Puesta en marcha.....	104
4.5.7. Operación.....	104
4.5.8. Control operacional.....	105
4.5.9 Posibles problemas.....	105

4.5.10 Mantenimiento	106
4.5.11. Desechos	108
4.5.12. Reportes operacionales	109
4.5.13. Cuadro resumen	109
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	110
RECOMENDACIONES.....	113
LIMITACIONES	115
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
ANEXOS	125
ANEXO 1. Plano catastrado del Hotel Pensión Playa Sámara.....	125
ANEXO 2. Reporte de consumo de agua potable del HPPS proporcionado por la ASADA de Sámara.....	126
ANEXO 3. Respuesta del IMN a la solicitud de datos meteorológicos en Nicoya, Guanacaste.....	128
ANEXO 4. Datos de cotización de los materiales realizada a la empresa El Colono Construcción en Nicoya.....	129
ANEXO 5. Datos de ocupación del HPPS desde 01/01/2019 hasta 31/10/2020.....	130
ANEXO 6. Planos originales del sistema de tratamiento	130
ANEXO 7. Memoria de cálculo del diseño del tanque séptico y del humedal artificial ...	130

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ASADA	Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados en Costa Rica
CF	Coliformes Fecales
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
GyA	Grasas y Aceites
HA	Humedal Artificial
HPPS	Hotel Playa Pensión Sámara
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
LMP	Límite Máximo Permisible
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
pH	Potencial de Hidrógeno
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
PVC	Policloruro de Vinilo
SAAM	Sustancias Activas al Azul de Metileno
SbN	Soluciones basadas en la Naturaleza
SSed	Sólidos Sedimentables
SST	Sólidos Suspendidos Totales
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de la ubicación de las PTAR operados por Municipalidades, AyA, ESPH y ASADAS. Fuente: [4]	22
Figura 2. Tipos de configuraciones para el tratamiento de aguas residuales para poblaciones. Sistema centralizado (izquierda), sistemas descentralizados (derecha) [7].	23
Figura 3. Humedal artificial de flujo libre y sus componentes (Adaptado de [28])	31
Figura 4. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal y sus componentes (Adaptado de [28]).....	32
Figura 5. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical y sus componentes (Adaptado de [28]).....	32
Figura 6. Ubicación del Hotel Pensión Playa Sámara, Nicoya, Guanacaste. Fuente: Google Maps.....	40
Figura 7. Precipitación promedio anual de la región Pacífico Norte. Fuente: [41]	41
Figura 8. Vista general de planta del HPPS. Traslape de la planta alta (en amarillo) y de la planta baja (en negro) Nicoya, Guanacaste.....	54
Figura 9. Distribución de las unidades sanitarias de la planta baja del HPPS, Nicoya, Guanacaste.	54
Figura 10. Distribución de las unidades sanitarias de la planta alta del HPPS, Nicoya, Guanacaste	55
Figura 11. Ubicación de tuberías, tanques sépticos, caja de registro y sitios de drenaje del HPPS, Nicoya, Guanacaste	57
Figura 12. Trampa de grasa 1 (TG1) ubicada en la parte posterior de la cocina en el HPPS..	58
Figura 13. Trampa de grasa 2 (TG2) ubicada en la parte posterior de la cocina, después de la TG1	58

Figura 14. Diagrama del recorrido de las aguas residuales del HPPS. En verde se indican los puntos de muestreo	61
Figura 15. Posibles ubicaciones identificadas para el humedal artificial a diseñar para el HPPS.	63
Figura 16. Área del drenaje, ubicada al lado de la cocina del Hotel.....	64
Figura 17. Área frontal del Hotel.....	65
Figura 18. Consumo de agua potable del HPPS desde enero del 2019 hasta octubre del 2020.	66
Figura 19. Ocupación mensual (número de personas por mes) del HPPS desde enero 2019 hasta octubre del 2020.....	67
Figura 20. Ubicación del humedal artificial a construir ubicado en el espacio disponible al frente del HPPS.....	82
Figura 21. Plantas ornamentales que se pueden utilizar en el humedal artificial. Fuente: [49]	84
Figura 22. Arreglo recomendado para la siembra de las plantas en el humedal artificial. Fuente: Elaboración propia	84
Figura 23. Disposición recomendada del sistema de tratamiento de aguas residuales para el HPPS.....	85
Figura 24. Configuración de grava dentro del humedal artificial.	87
Figura 25. Detalle de la red de distribución de agua para reúso.	88
Figura 26. Distribución de costos por tipo de material.....	96
Figura 27. Distribución de costos por operación de tratamiento.	97
Figura 28. Diagrama de flujo del agua residual en los diferentes procesos del hotel.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis comparativo de las ventajas y desventajas de los humedales artificiales subsuperficiales horizontales y verticales.....	33
Tabla 2. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en alcantarillados sanitarios [39].....	37
Tabla 3. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor [39].....	38
Tabla 4. Cantidad de unidades sanitarias y otra información importante para el prediseño del humedal artificial.	56
Tabla 5. Caracterización del agua residual, concentración de DQO en mg/L, en puntos de interés del actual sistema de tratamiento del HPPS.....	61
Tabla 6. Valores de consumo de agua potable en el HPPS considerados para el cálculo de caudal.	68
Tabla 7. Parámetros requeridos para el diseño del tanque séptico	69
Tabla 8. Volumen total del tanque séptico y su dimensionamiento	70
Tabla 9. Configuraciones tomadas en cuenta para el cálculo del área superficial de los HA, estableciendo diferentes condiciones de caudal y profundidad.	71
Tabla 10. Áreas resultantes, dimensionamiento y tiempo de retención hidráulico (TRH) del humedal artificial utilizando las condiciones para la configuración 1 de caudal y profundidad.	75
Tabla 11. Áreas resultantes, dimensionamiento y tiempo de retención hidráulico (TRH) del humedal artificial utilizando las condiciones para la configuración 2 de caudal y profundidad	75

Tabla 12. Áreas resultantes, dimensionamiento y tiempo de retención hidráulico (TRH) del humedal artificial utilizando las condiciones para la configuración 3 de caudal y profundidad.	76
Tabla 13. Áreas resultantes, dimensionamiento y tiempo de retención hidráulico (TRH) del humedal artificial utilizando las condiciones para la configuración 4 de caudal y profundidad.	76
Tabla 14. Área superficial en metros cuadrados de los diferentes tipos de humedal artificial según las configuraciones 1, 2, 3 y 4.	77
Tabla 15. Tiempo de retención hidráulica (TRH) en días de los diferentes tipos de humedal artificial según las configuraciones 1, 2, 3 y 4.....	77
Tabla 16. Criterios de cumplimiento y de no cumplimiento para la elección del humedal artificial a construir en el HPPS.....	79
Tabla 17. Dimensiones del HASH y HASV que se analizarán para la construcción del HA en el HPPS.	79
Tabla 18. Dimensiones finales del HASV y HASH que se analizarán para la construcción, reduciendo el TRH a un día.	80
Tabla 19. Datos para el cálculo del tanque de almacenamiento para el efluente.....	83
Tabla 20. Costo de materiales para la construcción del sistema de tratamiento para el HPPS94	
Tabla 21. Inversión total fija del proyecto del sistema de tratamiento de aguas residuales para el HPPS.	98
Tabla 22. Cuadro resumen con las principales actividades de mantenimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales del HPPS.	109

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) el 28 de julio del 2010 reconoció mediante la resolución 64/292 el derecho humano al agua y al saneamiento. La resolución confirma este recurso como indispensable para la vida, por lo tanto, se debe procurar el acceso al agua potable para todas las personas sin exclusiones [3].

En la Cumbre para el Desarrollo Sostenible, que se llevó a cabo en setiembre de 2015, los Estados miembros de la ONU aprobaron la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, que incluye un conjunto de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El sexto objetivo se refiere a “Garantizar la disponibilidad del agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todas las personas”, de ahí el compromiso del país en realizar acciones para su cumplimiento [4]. En Costa Rica, el 20 de mayo del 2020 se incorpora el derecho humano al agua para las generaciones presentes y futuras en la Constitución Política, y busca resguardar las fuentes de agua de todo el país.

En el marco de los anteriores compromisos cobra especial relevancia el tratamiento de las aguas residuales como estrategia que contribuya a una gestión sostenible del recurso hídrico. Se estima que en la región Centroamericana y del Caribe el 94% de las aguas residuales son vertidas al ambiente sin ningún tipo de tratamiento, generando consecuencias en la salud pública [5]. Adicionalmente, el reúso inadecuado de estas aguas residuales en el riego de cultivos aumenta la posibilidad de contraer enfermedades como el cólera, ciclosporiasis y hepatitis A.

En Centroamérica, el tratamiento de aguas residuales es un tema primordial para el desarrollo de comunidades rurales, en conjunto con la correcta disposición de los residuos sólidos se aseguran ambientes acuáticos saludables para desempeñar las tareas diarias (recreación,

turismo, sustracción de agua potable de pozos subterráneos, entre otros). Por lo anterior, instituciones gubernamentales y no gubernamentales, la academia y sectores relacionados al recurso hídrico se han esforzado para alcanzar las metas de los ODS mediante la investigación, formulación de proyectos, búsqueda de financiamiento e implementación de nuevas tecnologías en materia de la gestión integrada del recurso hídrico. Por parte de la academia existe un amplio esfuerzo de investigación en tecnologías emergentes y sostenibles de tratamiento de aguas residuales que buscan disminuir el impacto ambiental generado por las actividades domésticas e industriales.

En el caso de Costa Rica, según la Política Nacional de Saneamiento 2016-2045, se producen 966 455 m³/d de aguas residuales ordinarias. Tomando en cuenta el caudal que reciben las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) que son operadas por Municipalidades, AyA, ESPH y ASADAS, se podría concluir que solo el 14.43% son tratadas [4]. El incremento de la contaminación en cuerpos de agua como efecto de las aguas residuales de tipo doméstico, agrícolas e industriales en las zonas rurales es un problema que debe ser atendido de tal manera que contribuya a la disminución del impacto de zonas residenciales y turísticas sobre cuerpos de agua. Particularmente en las zonas costeras, es muy importante el tratamiento de aguas negras debido a la cercanía del océano y la vulnerabilidad de estos cuerpos de agua a la contaminación.

Según el Censo 2016, los costarricenses indican que la red sanitaria del hogar o edificación está conectada a: alcantarillado sanitario, tanque séptico o salida directa a algún cuerpo receptor siendo esta última la menos deseable para la disposición de las aguas residuales. Del total de viviendas del país, 21,43% tienen conexión a alcantarillado o cloaca y el 76,42% están conectadas al tanque séptico. De estas viviendas que cuentan con tanque séptico, solo el 1,6% cuentan con tanque séptico con tratamiento [6]. Por lo que es necesario mejorar e implementar los sistemas de recolección y tratamiento de aguas grises y negras, debido a que después del

tanque séptico, generalmente las aguas no cuentan con ningún otro tratamiento y posteriormente son vertidas a un drenaje en el suelo con condiciones inadecuadas o a un cuerpo receptor, aumentando la contaminación de estos.

Para efectos de este Trabajo Final de Graduación, específicamente en el sitio de estudio (Sámara, Nicoya), la tubería sanitaria que transporta aguas grises y negras está conectado principalmente por tanque sépticos y por la cercanía a cuerpos de agua marino-costeros, se debe procurar el buen funcionamiento y mantenimiento de este sistema. Es importante recalcar que debido a la región climática en que se encuentra el sitio de estudio, la población y el comercio turístico se ven afectados por la disminución de la dotación de agua potable en los meses más secos. Esto provoca serios problemas en la calidad de vida y la actividad turística, la cual es más activa y demanda más recurso hídrico precisamente en la temporada seca.

Cada persona necesita alrededor de 250 l/d en hogares y 200 l/d en alojamientos turísticos [2], dotación que en temporada turística alta es difícil de satisfacer, por lo que se considera que el reúso del agua residual es un aliado implementando otros sistemas tecnológicos para abastecer actividades que no requieran de agua potable (riego de jardines, uso de inodoros, actividades constructivas, entre otros) y así, asegurar el recurso potable para las actividades en las que es indispensable.

En la perspectiva de revertir los efectos ambientales de la ausencia de tratamiento de las aguas residuales la Política Nacional de Saneamiento formula las siguientes acciones [4]:

- Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.

- Aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.
- Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.
- Ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua, desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización.
- Dado el contexto anterior, desde el sector institucional y académico se diseñan nuevas estrategias, que desarrollan e implementan nuevas tecnologías que permitan el depósito de estas aguas de una manera eficiente y menos contaminante. Es necesario que desde las instituciones públicas y la academia se concientice a las personas propietarias y/o empresarias sobre la manera que se disponen las aguas residuales, brindándoles el asesoramiento para el diseño de sistemas más eficientes.

1.2 Planteamiento del problema

El uso de una sola tecnología para el sistema de tratamiento primario y secundario (tanque séptico) en un hotel resulta insuficiente si se toman en cuenta todas las actividades humanas que se realizan en el sitio. Además, se debe considerar que la demanda de caudal de agua potable es considerable y suele aumentar en temporada turística alta, la cual coincide con la temporada seca, donde el recurso hídrico para actividades domésticas es escaso. Es importante señalar también que el mal tratamiento del agua residual en hoteles puede generar problemas de obstrucción de tuberías y rebalses, generando incomodidad a los huéspedes por mantenimientos recurrentes y malos olores en el sitio.

Este proyecto pretende generar un prediseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales negras y grises utilizando un humedal artificial subsuperficial que cumpla con los requerimientos de caudal de una edificación hotelera que se encuentra en la zona de Sámara, Guanacaste. Para tal fin se visitó la instalación para realizar un inventario de todos los dispositivos sanitarios que se utilizan y realizar una caracterización de las aguas residuales para el diseño del humedal artificial. El diseño del sistema de tratamiento plantó el reúso de las aguas tratadas en los inodoros de la instalación, por lo cual se incluyó el diseño de las tuberías sanitarias, del humedal artificial y el estudio de costo de los materiales requeridos para la obra constructiva. Adicionalmente, se planteó una guía de operación y mantenimiento en base al Artículo 29 del Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.

1.3 Objetivos del proyecto

1.3.1 Objetivo general

Ejecutar un análisis de prefactibilidad técnica para la construcción de un humedal artificial en Sámara, Guanacaste, para el tratamiento de aguas negras y grises y su reúso en servicios sanitarios.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar el sitio de estudio mediante sus condiciones ambientales, el tipo de uso del recurso hídrico, infraestructura del complejo turístico y caracterización de las aguas residuales obteniendo la información importante para el diseño del humedal artificial.
2. Diseñar el humedal artificial y el sistema de interconexión de tuberías, identificando la ubicación óptima del humedal teniendo en cuenta criterios topográficos, normativos y su posibilidad para el reúso de las aguas en los servicios sanitarios.
3. Realizar un análisis de prefactibilidad económica del proyecto teniendo en cuenta costos constructivos y de diseño valorando la implementación del proyecto en el sitio.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Aguas residuales para pequeñas y grandes poblaciones

El manejo de las aguas residuales en las zonas urbanas se ha llevado a cabo tradicionalmente mediante sistemas centralizados con la construcción de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de tamaño municipal, las cuales recogen el agua residual de muchos sectores (residencial, industria, comercio e instituciones) y el efluente es transportado por medio de alcantarillado sanitario hasta un sitio retirado de los cascos urbanos. Su principal ventaja es que sus procesos se basan en el tratamiento de grandes caudales y son construidos con una larga vida útil, debido al alto capital invertido y su largo tiempo de depreciación [7].

En Costa Rica, existen al menos 40 PTAR centralizadas distribuidas en todo el país, que son operadas por diferentes entes como el AyA, ESPH, Municipalidades y ASADAS [4] (Figura 1). La más importante del país debido a la cantidad de caudal que recibe es la PTAR Los Tajos, ubicada en San José. El gobierno realizó una inversión total de \$361 millones (incluyendo expansión y mejora en el sistema de alcantarillado en el Gran Área Metropolitana) y el sistema cuenta con una capacidad para tratar el agua de 1 070 000 habitantes, con un caudal máximo diario de 3,45 m³/s donde se realiza el tratamiento primario de las aguas por medio de los procesos de: pozo de gruesos, rejillas de desbaste y desarenado y desengrasado [8]. Con esta planta, se dejarán de verter 2,7 ton/d de materia orgánica en términos de DBO y cerca de 4,4 ton/d de sólidos suspendidos totales [9].

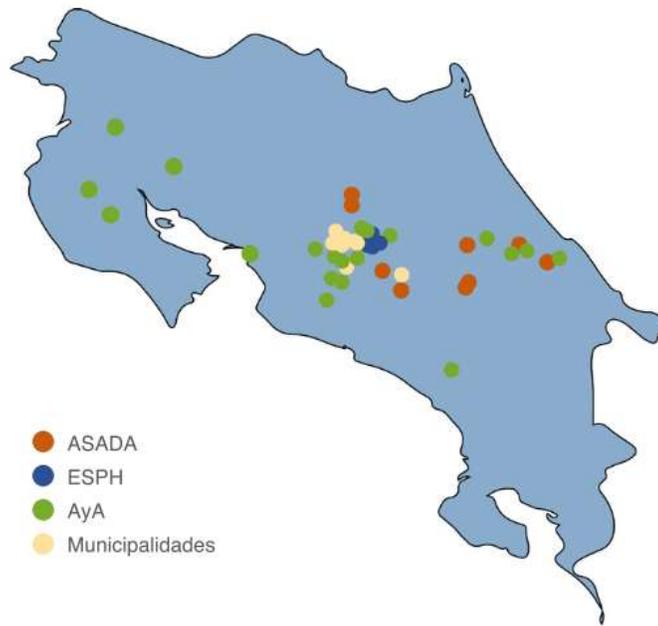


Figura 1. Representación de la ubicación de las PTAR operados por Municipalidades, AyA, ESPH y ASADAS. Fuente: [4]

Por otro lado, como una solución a los retos de tratamiento de aguas en comunidades rurales, existen los sistemas descentralizados, los cuales son sistemas que manejan la recolección, el tratamiento y vertimiento o reutilización de las aguas residuales de edificaciones cerca del punto de generación de los residuos [10]. Las principales ventajas de estos sistemas es que no requieren de grandes inversiones para su construcción y son sistemas de fácil operación y mantenimiento. Un ejemplo de un sistema descentralizado es el uso de tanques sépticos individuales como tratamiento primario y un humedal artificial como tratamiento secundario. El humedal artificial puede construirse para un hogar o una comunidad pequeña (Figura 2).

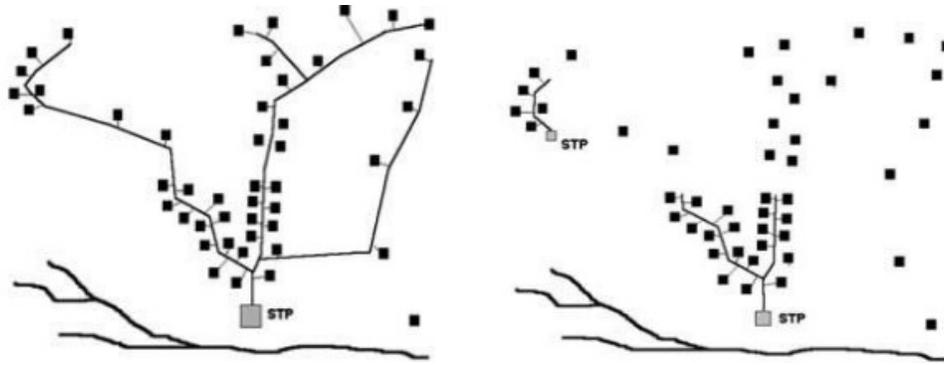


Figura 2. Tipos de configuraciones para el tratamiento de aguas residuales para poblaciones. Sistema centralizado (izquierda), sistemas descentralizados (derecha) [7].

Se conocen diversas tecnologías que ayudan a depurar la carga contaminante de las aguas residuales para mitigar los efectos adversos al medio ambiente basándose en regulación local o regional, sin embargo, en ocasiones estas tecnologías responden a necesidades centralizadas. Por lo tanto, las comunidades rurales quedan rezagadas, imposibilitando el acceso a estas tecnologías porque no son financieramente viables debido a la baja densidad poblacional y a la poca capacidad de pago.

En respuesta de lo anterior, para comunidades rurales se pueden utilizar tecnologías descentralizadas que se basan en el concepto de soluciones basadas en la naturaleza (SbN), las cuales están inspiradas y respaldadas por la naturaleza para contribuir a la gestión mejorada del agua. Se utilizan los procesos naturales y son proactivamente manejados para lograr un objetivo relacionado con el agua. Las SbN pueden implicar la conservación o rehabilitación de ecosistemas naturales y/o la mejora o creación de procesos naturales en ecosistemas modificados [11]. Algunos ejemplos de este tipo de tecnologías a pequeña escala son los inodoros secos, tecnología de cosecha de agua y también, los humedales artificiales para depuración. A una escala mayor, se podría hablar de proyectos de restauración de manglares y cuencas.

En la región de Latinoamérica y el Caribe, se calcula que un 72% de los proyectos de SbN tienen por objetivo beneficiar al sector de agua y saneamiento, también son los proyectos que están más avanzados y tienen mejores resultados en lo que concierne a la participación de los proveedores de servicios de infraestructura (como prestadores de servicios públicos de aguas) [12]. Se sabe que una inversión en SbN puede beneficiar a múltiples sectores y comunidades de manera simultánea. De ahí radica la importancia de implementar e investigar en este tipo de sistemas, documentando las experiencias que ayudarán a trazar el camino a seguir en las comunidades afrontando los retos relacionados al manejo de aguas residuales

Para el tratamiento de aguas negras en comunidades, se han utilizado diferentes métodos para reducir el contenido de materia orgánica. Comúnmente se utiliza el método de filtración y/o suspensión. Se define que, para este tipo de aguas residuales los contaminantes de mayor importancia son los sólidos en suspensión, la materia orgánica, patógenos, nutrientes, metales pesados y los sólidos inorgánicos disueltos [13]. Adicionalmente, se controlan parámetros como pH, temperatura y oxígeno disuelto en el sistema de tratamiento para lograr los procesos de desnitrificación y nitrificación. En un sistema como un humedal artificial, si los parámetros mencionados son monitoreados y controlados será posible remover más del 90% de la carga orgánica y eliminar el contenido de amonio un 42% [14].

Con humedales artificiales se han realizado estudios para la remoción de la carga orgánica, nitrógeno y fósforo de aguas residuales de tipo ordinario. En la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, en México, se instaló un sistema piloto de humedal artificial (HA) de flujo horizontal [15] para tratar las aguas ordinarias generadas en un edificio dedicado a la investigación científica. Se instaló un sistema piloto utilizando como sustrato un tipo de grava volcánica (grava de tezontle) y se utilizaron las plantas para la cobertura del humedal: *Phragmites australis* (carrizo) y *Typha dominguensis* (tule). El tiempo de retención hidráulica óptimo del sistema es de cinco días en los módulos donde se encuentran instalados *Phragmites*

australis y *Typha dominguensis* por separado. Como resultado general, la remoción de la materia orgánica es mayor en el módulo donde había mayor cantidad de biopelículas microbianas formadas sobre el sustrato y dos especies de plantas instaladas.

Los estudios realizados hasta este punto se han centrado mucho en identificar cuál es la mejor vegetación acuática que permite remover mayor cantidad de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Por ejemplo, para aguas residuales domésticas y humedales artificiales de flujo subsuperficial, se ha trabajado con las plantas mencionadas en el estudio anterior [15] y para humedales artificiales de flujo superficial se ha trabajado con “buchón de agua” (*Eichhornia crassipes*) y la “lenteja de agua” (*Lemna minor*), pues se sabe que son plantas que toleran las condiciones del medio [16].

El tratamiento de aguas negras en Costa Rica es un desafío, sobre todo en comunidades que no cuentan con alcantarillado sanitario. En esas zonas, las aguas residuales son depositadas en tanques sépticos en donde se da un tratamiento primario al efluente y posteriormente es dirigido a drenajes en el suelo, este sistema resulta insuficiente para disminuir la carga contaminante a parámetros aceptables. Por lo que se ha trabajado con humedales artificiales dando un tratamiento secundario y con ello mejorar el nivel de depuración de las aguas residuales ordinarias. Por ejemplo, en La Unión de Cartago se construyó un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal que se encuentra precedido de un tanque séptico, cajas de registro y sedimentador que se encarga de remover los sólidos suspendidos y disminuir la carga de $DBO_{5,20}$ de las aguas antes de su ingreso al humedal [17]. En este estudio se utilizaron plantas de *Cyperus papyrus* (papiro) en el sistema, la cual es una planta adaptable a las condiciones climatológicas del sitio. Como resultados del análisis se logró la remoción de cargas orgánicas de un 91% del $DQO_{5,20}$ y 72% del DBO de las aguas que ingresaron al humedal artificial. Los análisis realizados en este estudio incluyeron los análisis fisicoquímicos de $DBO_{5,20}$, DQO , fósforo soluble, pH, turbidez, conductividad, temperatura y sólidos suspendidos totales; a

diferencia del estudio anterior [16] donde se analizó la cantidad de materia orgánica, nitrógeno y fósforo únicamente.

En cuanto al reúso de aguas residuales domésticas, depende de la normativa que exista en cada país, sin embargo, uno de los tipos de reúso más utilizados es la utilización del efluente para riego en campos agrícolas, principalmente debido a que en el trópico hay una estacionalidad que provoca escasez del recurso hídrico para el riego de los cultivos. Este tipo de reúso en particular tiene la ventaja de que ayuda con la fertilidad de los suelos por el aporte de materia orgánica, macronutrientes (N y P) y oligoelementos (Na y K) [18].

2.2 Agua residual: etapas de tratamiento y parámetros fisicoquímicos

El agua es el principal recurso para sustento de las personas, la actividad industrial, agrícola, recreativa y turística. Por lo tanto, después de su uso, es indispensable realizarle tratamientos adecuados que ayuden a reducir el impacto que causan las aguas residuales al ser vertidas sin tratamiento en cuerpos receptores. Un sistema de tratamiento de aguas residuales tiene como objetivo mitigar el daño al medio acuático utilizando procesos y operaciones unitarias para depurar el agua residual [19].

El tratamiento de aguas residuales se da en etapas. En el pretratamiento, el objetivo es separar los residuos sólidos que arrastra el agua residual, para esta etapa se utilizan trampas de grasa donde se separa la grasa del agua residual y rejillas donde se retienen los sólidos. Después, el tratamiento primario facilita la sedimentación de sólidos que no son fácilmente perceptibles y por lo tanto no quedan capturados en las rejillas. Para esta fase se utilizan tanques sépticos, la cual es la opción más común en los hogares. El tratamiento secundario es la etapa encargada de eliminar la materia orgánica degradable y otros nutrientes en pocas concentraciones (por ejemplo, fósforo y nitrógeno). En cuanto al tratamiento terciario, se eliminan nutrientes y

patógenos específicos del afluente que se está tratando, por lo que en general son tecnologías más específicas [20].

2.2.1 Aspectos físicos y químicos del agua residual

El agua residual cuenta con una serie de aspectos físicos, químicos y microbiológicos que deben de analizarse antes del diseño de cualquier tratamiento de aguas para realizar su caracterización. A continuación, se definirán los aspectos con mayor importancia para el diseño de un humedal artificial para aguas negras y grises.

Características físicas:

Sólidos suspendidos totales (SST): Estos sólidos suspendidos generalmente son visibles y dan una idea del impacto que tendría drenar el agua directamente a un cuerpo receptor debido a que flotan en el agua residual entre la superficie y el fondo y pueden ser removidos por medio de sistemas de flotación o filtración. Dentro de los sólidos en suspensión se encuentran los sólidos sedimentables y los no sedimentables [20].

Temperatura (T): Este aspecto es muy importante para el desarrollo de la vida acuática y microbiológica del fluido. La temperatura óptima debe ser entre 25°C-35°C.

Características químicas:

Grasas y aceites (GyA): La presencia de estos componentes se debe al uso de compuestos lipídicos en la preparación de los alimentos y también por el uso de jabones. Por esto es importante colocar trampas de grasa donde se detecte el uso de alguna de estas sustancias y se eliminen antes del vertido de las aguas a un sistema de tratamiento, debido a que puede tener consecuencias en los organismos existentes y formar películas y acumulaciones provocando la inhibición de la fotosíntesis y respiración. [20].

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Representa la cantidad de materia orgánica contenida en el agua. Este parámetro está determinado por la cantidad de oxígeno que es consumido por los microorganismos para degradar los compuestos presentes [19].

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es la cantidad de oxígeno (mgO_2/l) necesario para oxidar los componentes del agua residual recurriendo a reacciones químicas, haciendo referencia al oxígeno que es consumido en las reacciones que transforman [20]. El valor de DQO usualmente es mayor que el valor de la DBO en los análisis de calidad de aguas, esto es debido a que usualmente hay mayor número de compuestos que pueden ser degradados químicamente que biológicamente [21].

Potencial de hidrógeno (pH): Indica acidez, neutralidad o alcalinidad. Para la existencia de la vida biológica, el valor de pH debe estar entre 6.5 y 8.5 [19]. Es importante porque niveles ácidos de pH pueden afectar la instalación sanitaria de la edificación (corrosión en las tuberías) y niveles alcalinos afectan la vida de los microorganismos acuáticos [20]

Nitratos y nitritos: Estos componentes participan en un gran número de reacciones químicas, en general son expresados en términos de nitrógeno total (NO_x). Los nitratos pueden ser reducidos total o parcialmente a nitritos en ausencia de oxígeno [22]. También, este parámetro puede presentarse en nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal y formas oxidadas como nitritos y nitratos. Valores altos de nitrógeno amoniacal ($>1500 \text{ mg/L}$) se consideran inhibitorios para los microorganismos responsables del tratamiento de aguas residuales [19].

Fósforo: Es un nutriente esencial para el crecimiento de microorganismos acuáticos. Sin embargo, una elevada presencia de este compuesto causan problemas de hipereutrofización en los cuerpos de agua como lagos, embalses y lagunas [19].

2.2.2 Humedales artificiales: definición, componentes y tipos

Una alternativa para el tratamiento secundario de aguas son los humedales artificiales, los cuales son una tecnología de tratamiento de aguas residuales biológica, de bajo costo económico y constructivo diseñada para imitar los procesos depurativos que se encuentran en los sistemas naturales [23]. Consisten generalmente en lechos rellenos de algún sustrato, por lo general grava y piedrilla donde se instalan macrófitas en la superficie, con el fin de que sus raíces penetren el sustrato y se facilite un medio para el crecimiento de microorganismos, logrando una relación simbiótica entre plantas, microorganismos y nutrientes para depurar el efluente a través de procesos fisicoquímicos y bacteriológicos [24].

Las ventajas de utilizar este tipo de tratamiento es que suelen ser más económicas que otras tecnologías de tratamiento de aguas, utilizan los procesos naturales del ecosistema, es de construcción simple, la operación y el mantenimiento usualmente no presentan dificultades y es un proceso estable y continuo. Por otro lado, una de las desventajas es que dependiendo del caudal y el nivel de depuración, se puede utilizar mucha área superficial y su diseño debe de realizarse minuciosamente para cumplir con los requerimientos de cada caso [23].

En cuanto a los principales componentes de los humedales artificiales se encuentran:

- Terreno excavado: una vez diseñado el sistema, se necesitará excavar el terreno con las dimensiones adecuadas para la instalación del humedal artificial.
- Sustrato: se refiere al medio filtrante que se coloca dentro del terreno excavado y que servirá como soporte a las raíces de las plantas. Generalmente se utiliza algún tipo de grava y se incluyen varias capas de diferentes tamaños dependiendo de la configuración deseada [25].
- Vegetación o macrófitas: son las plantas que se siembran encima del sustrato y llevarán a cabo funciones de depuración mediante procesos de adsorción, fijación, etc. [25]. El

tipo de plantas utilizadas depende en gran medida las condiciones climáticas del sitio, porque debe ser una planta resistente a la temperatura, humedad y precipitación de la zona. De manera general, se necesitan macrófitas emergentes, con rizomas y raíces que puedan crecer por lo menos 50 cm debajo de la superficie. Los tejidos necesitan estar llenos de espacios vacíos que permitan el flujo de gases, especialmente oxígeno, el cual permitirá los procesos microbianos, como la degradación aeróbica de materia orgánica y la nitrificación [26].

- Microorganismos: estos organismos vivos que están en el agua residual, en el sustrato y adheridos a las raíces de las plantas serán los encargados de las reacciones biológicas del proceso de tratamiento.

Según la utilidad requerida, los componentes mencionados anteriormente tendrán diferentes configuraciones o arreglos, los cuales determinarán el tipo de humedal artificial que se utilizará. Por lo tanto, los humedales artificiales se pueden clasificar según: dirección y movimiento del efluente, características fisicoquímicas del efluente, tipo de sustrato o el tipo de macrófitas incorporadas en el humedal. La clasificación de los humedales artificiales más utilizada es por el tipo de movimiento de flujo que se presenta en el sistema, estos tienen diversas tipologías: humedales artificiales de flujo libre, humedales de flujo subsuperficial y este último a su vez se divide en humedales subsuperficiales de flujo horizontal y humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical [27]. A continuación, se explicarán los tipos de humedales artificiales con respecto a la dirección y movimiento del efluente.

En el humedal artificial de flujo superficial (libre), el movimiento de agua es de tipo superficial horizontal (Figura 3). El agua se hace transcurrir en una superficie de un canal o estanque que contenga una capa delgada de agua no muy profunda (30 cm aproximadamente). La característica del sustrato es que tiene baja conductividad y a nivel radicular el flujo no es

significativo. Las reacciones que ocurren en el agua y la zona superior del sustrato son las que ayudan a la eliminación de contaminantes. [24].

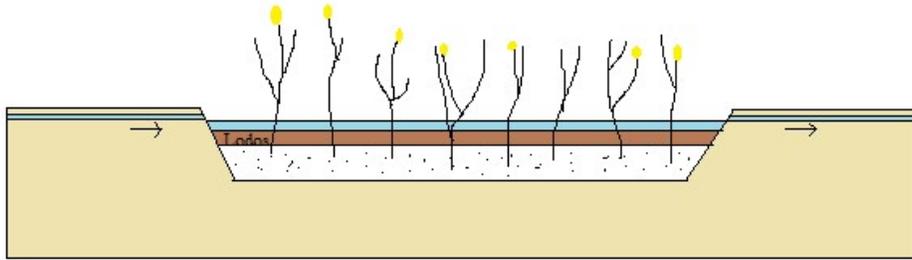


Figura 3. Humedal artificial de flujo libre y sus componentes (Adaptado de [28])

En el diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial el efluente circula a través del sustrato (arena o grava de grosor variable), a diferencia del humedal superficial donde hay un espejo de agua en la superficie. Se debe colocar material impermeable como geotextil o arcilla para evitar la infiltración. En estos humedales el movimiento del flujo agua puede ser vertical u horizontal a través del sustrato donde están ancladas las raíces de las plantas. La principal desventaja en el uso de estos sistemas es la colmatación del sustrato por el crecimiento de las raíces y por acumulación de sólidos que se arrastran en el agua residual (por esta razón es muy importante asegurar que el pretratamiento y el tratamiento sea efectivo). La problemática anterior reduce el tiempo de retención y la capacidad de depuración del HA [24].

En el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal el agua ingresa por medio de una tubería que se ubica dentro del sustrato y fluye horizontalmente por el canal, el sustrato y microorganismos, degradando el material orgánico. El lecho donde se coloca el sustrato debe ser poco profundo y amplio, manteniendo el nivel del agua entre los 5 cm y 15 cm asegurando el flujo (Figura 4). Para evitar la infiltración, se utilizan materiales impermeables como arcilla o geotextil. La longitud y el ancho del humedal determinan la eficiencia de éste y el área transversal determina el flujo máximo posible [28].

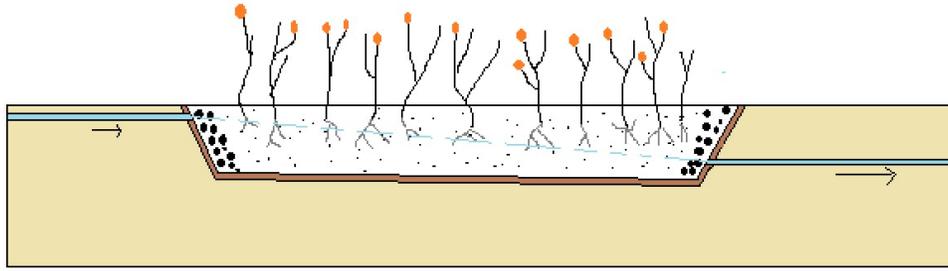


Figura 4. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal y sus componentes (Adaptado de [28])

En cuanto al humedal artificial de flujo subsuperficial vertical, se utiliza un sistema de dosificación intermitente para alimentar el humedal desde la superficie para que el agua fluya verticalmente por el filtro (Figura 5). Otra diferencia entre el humedal subsuperficial horizontal y el vertical es que en este último los microorganismos se exponen a etapas de demanda de nutrientes donde el crecimiento de biomasa se reduce y los espacios porosos son ocupados por oxígeno, proporcionando condiciones aerobias en el sistema, lo cual conlleva a que, por la intermitencia del sistema, se den reacciones químicas bajo condiciones aerobias y anaerobias. [28].

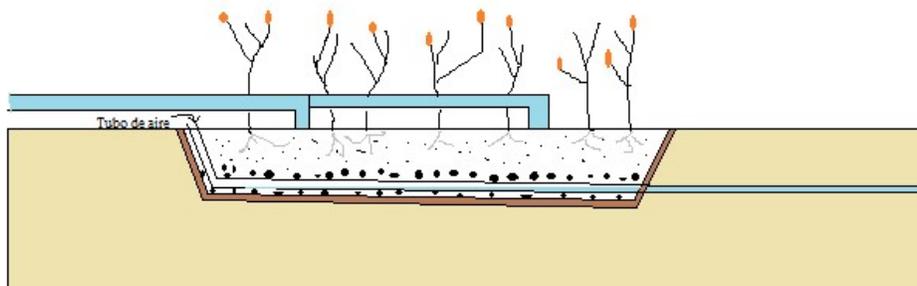


Figura 5. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical y sus componentes (Adaptado de [28]).

Antes de tomar la decisión del tipo de humedal a utilizar, por ejemplo, subsuperficial horizontal o vertical, hay que conocer las características específicas de cada tipo y valorar las ventajas y desventajas que tienen cada uno de estos sistemas. A continuación, en la Tabla 1, se presenta

un cuadro comparativo con las ventajas y desventajas de los humedales subsuperficiales vertical y horizontal:

Tabla 1. Análisis comparativo de las ventajas y desventajas de los humedales artificiales subsuperficiales horizontales y verticales

Ventajas	
Subsuperficial horizontal	Subsuperficial vertical
<ul style="list-style-type: none"> • La alimentación es de forma continua. [29] • Se puede controlar el nivel de agua dentro del humedal artificial. [29] • Al operar con elevados tiempos de retención, se toleran bien las puntas de caudal y de carga. [29] • Alta remoción de materia orgánica, DBO₅ (demanda bioquímica de oxígeno medida a cinco días), DQO y sólidos suspendidos totales. [30] • Alternativa viable para reducir el contenido de materia orgánica de las aguas residuales, pues toleran las fluctuaciones de flujo o intermitencias. [30] • Se caracterizan por mantener condiciones anóxicas, por lo que proporcionan condiciones adecuadas para la desnitrificación. [30] 	<ul style="list-style-type: none"> • Debido a la intermitencia del flujo favorece la restauración de las condiciones aerobias y el amonio es adsorbido [30]. • Restaura las condiciones aerobias durante períodos secos [30]. • Realizan una mejor mezcla en el lecho del humedal, acelerando la difusión de oxígeno y el aumento depurativo del DQO y NO₃⁻, reduciendo así la superficie que se utiliza en este tipo de sistemas, favoreciendo sobre todo a los humedales construidos en regiones montañosas, donde la disponibilidad de espacio es limitada [30].

Desventajas	
Subsuperficial horizontal	Subsuperficial Vertical
<ul style="list-style-type: none"> • Las obstrucciones son un problema común [31] • La remoción de nitrógeno se ve afectada por la poca disponibilidad de oxígeno, limitando los procesos de nitrificación y desnitrificación [32]. • Presentan una menor eliminación de nutrientes [30] 	<ul style="list-style-type: none"> • La alimentación es de forma intermitente. [29] • La obstrucción es un problema común [31] [30]. • Se debe tener cuidado para asegurar que la gente no entre en contacto con el afluente por el riesgo de infección [31]

2.2.3. Diseño de humedales artificiales

Para el diseño de los humedales artificiales, se utiliza la ecuación de flujo de tapón modificado $k-C^*$, propuesta por Kadlec & Knight [33]. El objetivo de este cálculo es obtener el tamaño adecuado para el humedal artificial dependiendo de la cantidad de agua a tratar y del contaminante objetivo. Este contaminante objetivo puede ser carga orgánica, nitritos, fósforo, entre otros que se considere según las características del humedal artificial. El área del humedal artificial se puede aproximar con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q}{k} \cdot \ln \left(\frac{C_a - C^*}{C_e - C^*} \right) \quad (1)$$

donde:

- A = área superficial del humedal (m²)
- Q = caudal diario del agua residual a tratar (m³/d)
- C_a = concentración de contaminante objetivo en el afluente (mg/L)
- C_e = concentración de contaminante objetivo en el efluente (mg/L)
- k = constante de remoción de primer orden (m/d)

Para el caso de los humedales artificiales que se diseñan en América Latina, generalmente se realiza en base a la carga orgánica del sistema. Se calcula por lo tanto el DBO o DQO del agua residual para utilizarlo como dato de concentración del afluente. Este cálculo (ecuación 1) considera una concentración residual C^* (mg/L) del contaminante, como una variable denominada concentración base o concentración residual que puede ser estimada a través de investigaciones relacionadas al tema, de forma empírica. Para la carga orgánica la concentración residual se puede calcular con la siguiente expresión [34]:

$$C^* = 3,5 + 0,053 \cdot C_a \quad (2)$$

En cuanto a la constante de remoción de primer orden (k), es un parámetro característico del agua residual que depende de la temperatura y la degradación de la carga orgánica en el sistema. En general, se espera que la tasa de degradación generalmente aumente un 10% por °C [34]. Puede ser calculada en base a las siguientes ecuaciones:

$$k = K_T \cdot d \cdot n \quad (3)$$

$$K_T = K_{20} \cdot 1,06^{(T-20)} \quad (4)$$

Donde:

K_{20} = constante de remoción de primer orden a 20°C (d^{-1})

T = temperatura operacional del sistema (°C)

d = profundidad de la columna de agua dentro del humedal (m)

n = porosidad del sustrato (expresado en fracción)

En el caso de que se requiera un ajuste en el tamaño del humedal artificial, se podría calcular el tiempo de retención hidráulico (TRH) con el área calculada y compararlo con el TRH deseado para el sistema. Para este tipo de sistemas de tratamiento secundario, se recomienda

manejar TRH entre 1 – 8 días, dependiendo del contaminante objetivo que se necesite depurar [35][36][37]. Para el cálculo del TRH se puede emplear la siguiente expresión:

$$TRH (d) = \frac{V \cdot n}{Q} \quad (5)$$

Donde:

V = Volumen total del HA (m³)

n = porosidad del sustrato (expresado en fracción)

Q = Caudal de diseño (m³/d)

2.3 Marco legal

El marco legal de uso de aguas en Costa Rica incorporó en el 2003 el decreto 31545-S-MINAE llamado “Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales” en el cual se incluyen disposiciones generales que se deben de tomar en cuenta a la hora de establecer este tipo de construcciones [38].

En el artículo 3 se indica que “los edificios, establecimientos e instalaciones, deberán de ser provistos de los sistemas de tratamiento necesarios para que sus aguas residuales cumplan con las disposiciones del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales, y así se eviten perjuicios a la salud, al ambiente o a la vida silvestre”.

Por lo anterior, es importante conocer cuáles son esos parámetros que son regulados según sea la disposición final de las aguas residuales. Para las aguas residuales que se viertan en alcantarillado sanitario o en un cuerpo de agua, los parámetros se establecen en el Reglamento de Vertido y reúso de Aguas Residuales [39]. Estos parámetros están numerados en el artículo 14 y se establece que son parámetros universales de análisis obligatorio en aguas residuales de tipo ordinario y especial, estos parámetros son: caudal, DBO_{5,20}, DQO, potencial de hidrógeno

(pH), grasas y aceites (GyA), sólidos sedimentables (SSed), sólidos suspendidos totales (SST), sustancias activas al azul de metileno (SAAM) y temperatura (T).

En este mismo reglamento, en el capítulo III, artículo 17, se explican las características de los límites para el vertido de aguas residuales: “son valores permisibles y de acatamiento obligatorio para todos los entes generadores. El Ministerio de Salud aceptará un intervalo de variación que será establecido por los límites de confianza al 95% del respectivo parámetro” [39].

Según el artículo 18 del Reglamento de Vertido y reúso de Aguas Residuales se muestran los límites de los parámetros universales de análisis obligatorio de cualquier agua residual que sea vertida en un alcantarillado sanitario (Tabla 2), asimismo, en el artículo 20, se presentan los límites para el vertido a un cuerpo receptor (Tabla 3).

Tabla 2. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en alcantarillados sanitarios [39]

Parámetro	Límite máximo o rango
DBO	300 mg/L
DQO _{5,20}	750 mg/L
Sólidos suspendidos	300 mg/L
Sólidos sedimentables	5 ml/L
Grasas y aceites	50 mg/L
Potencial hidrógeno	6 a 9
Temperatura	15°C ≤ T ≤ 40°C
Sustancias activas al azul de metileno	5 mg/L

Tabla 3. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor [39]

Parámetro	Límite máximo o rango
DBO	50 mg/L
DQO _{5,20}	150 mg/L
Sólidos suspendidos	50 mg/L
Sólidos sedimentables	1 mL/L
Grasas y aceites	30 mg/L
Potencial hidrógeno	5 a 9
Temperatura	15°C ≤ T ≤ 40°C
Sustancias activas al azul de metileno	5 mg/L

Con respecto a las aguas residuales que se disponen en drenajes subterráneos, los límites se establecen en el Reglamento para la disposición al subsuelo de aguas residuales ordinarias tratadas. En el Capítulo I, Artículo 8, se establece que para la disposición de aguas residuales ordinarias cuyo caudal exceda los 190 m³/mes, se deben de cumplir con límites máximos permisibles (LMP) de los parámetros establecidos en la Tabla 3, los cuales son los mismos para verter aguas residuales a un cuerpo receptor.

En lo que respecta al reúso de aguas residuales, en el artículo 27 del Reglamento de Vertido y reúso de Aguas Residuales indica lo siguiente: “Se permitirá el reúso de aguas residuales tratadas de acuerdo con lo establecido con el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Vigente. En ningún caso se podrán utilizar estas aguas para consumo humano” [39].

El reúso que se propone en este proyecto de investigación, se denomina según el artículo 28 del Reglamento de Vertido y reúso de Aguas Residuales como “reúso urbano” y, según el

artículo 29 se consideran que caudal, los coliformes fecales (CF) y los nemátodos intestinales son los parámetros de análisis obligatorio para el reúso de aguas ordinarias [39].

Los Límites Máximos Permisibles para el reúso de aguas residuales ordinarias se consideran en la Tabla 7 del Reglamento y se indica que para el reúso tipo 1 el LMP para nemátodos intestinales es de un huevo por litro (promedio aritmético) y para nemátodos intestinales se establece que es 1000 NMP/100 mL.

Continuando con el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales, en el artículo 13 se considera que el retiro entre el sistema de tratamiento y los linderos de la propiedad que lo contiene, deberá ser al menos, para humedales artificiales, de 20 m [40]. Sin embargo, para efectos de este trabajo, se recomienda trabajar esta propuesta como un sistema individual mejorado, para lo cual se considera que el retiro debe ser de 1 m.

En el reglamento anteriormente citado, también se toman en cuenta todos los requerimientos municipales y del Ministerio de Salud al realizar la construcción de una obra de tratamiento de aguas, así como los parámetros y mediciones que se deben realizar una vez realizado el diseño, por lo que se tendrá en cuenta una vez concluida la obra como requerimientos de mantenimiento.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Caracterización del sitio de estudio

El HPPS está ubicado en la comunidad de playa Sámara, distrito de Sámara, cantón de Nicoya, en la provincia de Guanacaste. Las coordenadas geográficas de su ubicación utilizando la proyección CRTM05 en Latitud Norte y Longitud Oeste, y son 332705,3 m, 1093131,4 m (Figura 6).



Figura 6. Ubicación del Hotel Pensión Playa Sámara, Nicoya, Guanacaste. Fuente: Google Maps

La comunidad de playa Sámara está ubicada en la zona peninsular de Nicoya, región climáticamente conocida como Pacífico Norte, donde hay una marcada diferencia entre estación seca y lluviosa. El período seco va de diciembre a marzo, mientras que el lluvioso se extiende de abril hasta noviembre. De las lluvias totales del año, un 96% ocurre en la temporada lluviosa, con abril y noviembre como meses de transición entre las épocas seca y lluviosa (Figura 7).



Figura 7. Precipitación promedio anual de la región Pacífico Norte. Fuente: [41]

El acumulado anual de precipitaciones en la zona peninsular ha alcanzado un promedio anual 1700 mm. En cuanto a las temperaturas, normalmente durante el día rondan los 32°C y durante la noche los 22°C [41].

3.1.1 Descripción de instalaciones sanitarias en el Hotel Playa Pensión Sámara

Como parte del objetivo específico 1, se describieron los aspectos del HPPS que inciden en la generación de aguas residuales, así como la infraestructura actual para su tratamiento. Para tal efecto se planearon dos visitas al HPPS, en abril 2021 y mayo 2022. En la primera visita se realizó un inventario de todas las instalaciones sanitarias. Este cuantificó y ubicó los siguientes aspectos:

- 1) Servicios sanitarios,
- 2) Lavatorios,
- 3) Pilas,
- 4) Duchas,
- 5) Tanques sépticos y su dimensionamiento,
- 6) Trampas de grasa, y
- 7) Cantidad de lavadoras.

Otra información inventariada fue:

- 8) Cantidad de habitaciones,
- 9) Capacidad máxima de hospedaje, y
- 10) Cantidad de trabajadores del HPPS.

El inventario proporcionó información útil acerca de la demanda de agua potable y la generación de aguas residuales en el HPPS, también estos insumos se utilizaron para determinar la potencial distribución y dimensionamiento de un sistema de tratamiento in situ. Con base a la información anterior, se utilizó el software Autodesk AutoCAD 2021 para realizar una representación 2D del hotel y la ubicación de las unidades sanitarias.

Además, en la primera gira se caracterizó el agua residual en los tanques sépticos, trampas de grasa, cajas de registro y drenaje. Al agua residual muestreada se le determinó la concentración de DQO. El análisis se realizó en sitio utilizando un reactor digital HACH DRB200 y un Colorímetro portátil multiparamétrico DR900 siguiendo la metodología HACH #8000 [42].

3.2 Diseño del sistema de tratamiento de las aguas residuales

3.2.1 Diseño del sistema de tratamiento primario

El sistema de tratamiento primario consiste en tanque sedimentador, comúnmente llamado tanque séptico donde su dimensionamiento debe basarse en fórmulas de diseño donde se tome en cuenta datos como:

- La cantidad de usuarios,
- la cantidad y el tipo de agua utilizada por día,
- la temperatura del agua residual y
- el período apropiado para la remoción de materia líquida y sólida. [2]

Para el dimensionamiento se siguió la técnica descrita en el anexo C del Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones Edición 2017. Este procedimiento se

basa en las investigaciones realizadas por D.D. Mara y G.S. Sinnatamby [43] donde se proponen fórmulas para calcular el funcionamiento apropiado de los tanques sépticos en regiones con clima tropical.

El procedimiento se detalla a continuación:

A. Cálculo de volumen para sedimentación (m³):

$$V_s = 10^{-3} \cdot P \cdot q \cdot t_n \quad (6)$$

donde:

P es la población o cantidad de personas por atender

q el caudal de aguas por atender (L/persona*d)

t_n es el tiempo de retención hidráulica por considerar para este proceso (d)

B. Cálculo de volumen para biodigestión (m³):

$$V_d = 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot t_d \quad (7)$$

donde:

- P es la población o cantidad de personas por atender
- t_d es el tiempo de retención requerido para la biodigestión de la materia orgánica, en función de T (temperatura en grados Celsius estimada del agua por tratar y dadas las condiciones ambientales de la zona)

$$t_d = 28 \cdot (1.035)^{35-T} \quad (8)$$

C. Cálculo de volumen para el almacenamiento de lodos digeridos (m³):

$$V_a = 10^{-3} \cdot r \cdot P \cdot \left(n - \left(\frac{t_d}{365} \right) \right) \quad (9)$$

donde:

- r es un factor que caracteriza las aguas y los lodos ($r = 40 \text{ L/pers}\cdot\text{año}$, cuando se envían todos los residuos líquidos de una vivienda; $r = 30 \text{ L/pers}\cdot\text{año}$, cuando se envían solo las aguas provenientes de los inodoros)
 - P es la población o cantidad de personas por atender
 - n es el período entre limpiezas o remoción de lodos que se desea definir en años.
 - t_d es el tiempo, en días, de retención requerido para la biodigestión de la materia orgánica. Se calcula con la fórmula (8).
- D. Cálculo del volumen total de líquidos en el tanque séptico (m^3):

$$V_{tL} = V_s + V_d + V_a \quad (10)$$

- E. El volumen interior total del tanque séptico es mayor al calculado con la fórmula (10). Se recomienda dejar un espacio libre para el flujo de gases hacia la tubería de ventilación. La distancia entre el nivel de líquido y la tapa del tanque séptico debe ser un 20% de la profundidad del líquido.

3.2.2 Diseño del sistema de tratamiento secundario – humedal artificial.

Para determinar el tamaño del humedal, se siguió el procedimiento descrito en la sección 2.2.4 de flujo de tapón modificado, con las ecuaciones 1-5.

Estas ecuaciones requirieron de la identificación de las variables de caudal por tratar, concentración de entrada y de salida del contaminante, profundidad del humedal artificial a construir, porosidad del sustrato a utilizar en el humedal y temperatura del agua residual. A continuación, se explica cada variable.

- Caudal por tratar (Q): Para recopilar esta información, se solicitó a la ASADA de Sámara un registro de las facturas del HPPS con respecto a la demanda de agua potable. Se consideraron los m^3 mensuales reportados del año 2019 y de los primeros tres meses del 2020 debido a la pandemia provocada por la enfermedad COVID-19. Con lo

anterior se obtuvieron valores máximos, mínimos y promedios del consumo de agua potable del HPPS. Se realizó un análisis estadístico para determinar el caudal de demanda promedio diario y los cuartiles. Una vez conocida la demanda de agua, se aplica el coeficiente de retorno sanitario, el cual representa la porción de agua potable que se retorna como agua residual, y, por tanto, el caudal que debe ser tratado por el sistema de tratamiento. El coeficiente de retorno sanitario puede variar entre 0,7 y 0,85 [19].

- Concentración de entrada y salida del contaminante (C_a y C_e , en el orden correspondiente): debido a que el HPPS es una instalación donde el agua potable se considera de carácter doméstico y no industrial, se tomó como contaminante objetivo la carga orgánica. El indicador que se consideró para aproximar la carga orgánica es el DQO. La concentración de entrada es calculada con pruebas *in situ*, mientras que la concentración de salida se establece con respecto al Reglamento para la disposición al subsuelo de aguas residuales ordinarias tratadas de Costa Rica, el cual se establece en 150 mg/L DQO (Tabla 3) [39].
- Profundidad del humedal artificial a construir (y): la profundidad del humedal artificial a construir depende del tipo de humedal, si será subsuperficial vertical u horizontal. Se tomaron profundidades recomendadas en la literatura. Por ejemplo, para humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal se recomienda una profundidad que varíe en el rango de 0,3 m – 0,6 m, mientras que para verticales se puede variar entre los 0,5 m y 0,8 m [23][44][19].
- Porosidad (n): Es la relación entre el espacio vacío y el volumen total del HA. También, define la cantidad máxima de agua que se puede retener en el sistema. Se expresa como una fracción decimal [45]. La porosidad depende del tipo de sustrato que se vaya a

utilizar en el humedal, en general la grava fina tiene una porosidad que varía entre 0,35-0,38 y roca gruesa 0,38-0,45 [25].

- Temperatura del agua residual (T): la temperatura del agua residual se consideró como la temperatura del promedio del mes más frío tomando en cuenta la temperatura ambiental del sitio [25]. Para lo anterior, se realizó una solicitud al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de las temperaturas diarias del año 2016 hasta el año 2020 de las dos estaciones meteorológicas más cercanas a la zona (ya que Sámara no cuenta con estación meteorológica). Las estaciones meteorológicas consultadas fueron: Novaltek, Barco Quebrado-Garza en Nosara y ASADA Sta Marta en Hojancha (ver Anexo 3).

Con la información que se determine de cada una de las variables anteriores, se utiliza la ecuación 1 para determinar el área superficial del humedal. Se establecen distintos valores de variables como caudal y profundidad, obteniendo 4 configuraciones diferentes, las cuales se citan a continuación:

- Configuración 1: Caudal máximo y HA poco profundo.
- Configuración 2: Caudal del tercer cuartil y HA poco profundo.
- Configuración 3: Caudal máximo y HA profundo.
- Configuración 4: Caudal del tercer cuartil y HA profundo.

Para cada tipo de configuración, se obtuvieron áreas para un humedal artificial subsuperficial vertical (HASV), un humedal artificial subsuperficial horizontal (HASH), dos HASV en serie y dos HASH en paralelo, estos últimos tratan el 50% del caudal cada uno. Por lo anterior, para cada configuración se dimensionan cuatro HA, resultando 16 HA en total. Finalmente, se analizaron las ventajas y desventajas de cada uno, para tomar la decisión del sistema que se construirá en el HPPS.

Una vez decidido el sistema de humedales artificiales, se realizó un modelo 3D del sistema de tratamiento, utilizando el software Autodesk Inventor Profesional 2021 y también se realizaron planos 2D en detalle del sistema de tratamiento primario y secundario con el software Autodesk AutoCAD 2021.

3.2.3 Dimensionamiento de los tanques de captación y almacenamiento para reúso

Para el dimensionamiento de estos tanques, se utilizó la siguiente ecuación:

$$V_T = N_{ss} \cdot N_{ud} \cdot P \cdot V_{ss} \cdot t \quad (11)$$

Donde:

- V_T : volumen total del tanque de captación (L)
- N_{ss} : es el número de servicios sanitarios a abastecer.
- N_{ud} : es la cantidad de veces al día que una persona usa el inodoro (uso/d/p)
- P : cantidad de personas a abastecer
- V_{ss} : es el volumen del tanque del servicio sanitario utilizado (L/uso)
- t : cantidad de tiempo a abastecer (d)

Lo datos anteriores fueron estimados en las visitas que se realicen al hotel, observando la dinámica del uso de los servicios sanitarios y con datos obtenidos de la bibliografía. Esto ofreció un aproximado del volumen requerido para almacenamiento.

3.2.4 Cálculo hidráulico para tanque de almacenamiento para reúso y tubería

Se realizó un cálculo hidráulico para conocer la altura mínima del tanque de almacenamiento para reúso, longitud de tuberías hacia los servicios sanitarios y el diámetro nominal requerido para la conexión. Para este cálculo, se siguió la metodología empleada en el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones, el cual se describe a continuación:

- a) Se calcula el caudal requerido dentro de la tubería según las unidades accesorio (u.a) que estén dentro de la red a analizar. En este caso las unidades accesorio serán los servicios sanitarios, los cuales cuentan como 3 (u.a.) cada uno.
- b) Se calculó el caudal en L/s con la siguiente ecuación:

$$Q = 0,13(u. a.)^{0,669} \quad (12)$$

- c) Se realizó un proceso iterativo para conocer los diámetros nominales a utilizar y la velocidad del agua dentro de las tuberías. Se recomienda que la velocidad sea mayor a 0,6 m/s y menor a 2 m/s. Para lo anterior, se utilizó la ecuación 13:

$$Q = A * v \quad (13)$$

Donde:

A = área de la sección de tubería en m².

- d) Se calculan las pérdidas de carga originadas por fricción en la tubería de distribución para reúso. Se utilizó la fórmula de Darcy-Weisbach (ecuación 14) y el coeficiente de fricción f se calculó a partir de la fórmula de Colebrook White (ecuación 15):

$$\frac{h_f}{L} = \frac{f V^2}{D 2g} \quad (14)$$

Donde:

D = diámetro interno de la tubería (m)

f = factor de fricción

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

h_f = pérdidas de energía (m)

L = longitud de la tubería (m)

V = velocidad del líquido en la tubería (m/s)

$$f = \frac{1}{\left[-1,8 \log_{10} \left(\frac{6,9}{R_e} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} \right) \right]^2} \quad (15)$$

Donde:

R_e = Número de Reynolds en el conducto

D = diámetro interno de la tubería (mm)

ε = rugosidad absoluta del material de la tubería en mm

- e) Las pérdidas de carga por accesorios de tubería se tomaron como el 10% del total de las pérdidas de carga por fricción.
- f) Una vez obtenidas las pérdidas de carga en las tuberías, se realiza un balance de presiones, calculando así la altura mínima del tanque de almacenamiento para reúso con la ecuación 16:

$$h_{tanque} - h_{tub} = h + P_{trabajo} \quad (16)$$

Donde:

h_{tanque} = altura mínima del tanque de almacenamiento para reúso (m).

h_{tub} = pérdidas de carga por fricción y por accesorios en la tubería de distribución (m).

h = altura del servicio sanitario más lejano (m).

$P_{trabajo}$ = Presión de trabajo mínima para servicio sanitario, la cual se establece en 2 m.c.a.

3.3 Costos, aspectos constructivos y normativos a evaluar para la implementación del humedal artificial.

3.3.1 Cotización de los materiales para el sistema de tratamiento de aguas residuales para el HPPS

Conforme se avanzaba en diseño del sistema se levantó una lista de materiales y accesorios necesarios para la construcción del tanque séptico, humedal artificial, tanque de captación y almacenamiento para reúso y de las tuberías necesarias para la conexión. Para determinar el costo del sistema de tratamiento, se envió la lista a tres ferreterías ubicadas en Nicoya, Guanacaste. Lo anterior brindó información importante para la construcción del sistema, valorando la posible implementación del proyecto.

3.3.2 Aspectos adicionales incorporados en el proyecto.

Conforme se avanzó en el proyecto, se hizo necesario considerar aspectos adicionales para la futura implementación del humedal artificial. En conjunto con la dueña del HPPS, Nicolette Smith, se decidió incorporar información para cuantificar el agua que se utilizaría para reúso, aspectos básicos de construcción según la normativa nacional e información adicional de operación y mantenimiento. Cada aspecto se detalla a continuación:

3.3.3 Aspectos constructivos del humedal artificial

Se realizaron propuestas para el momento de la construcción del humedal artificial utilizando bibliografía relacionada a la construcción e implementación de estos sistemas. Se tomaron en cuenta los lineamientos establecidos en el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales N°31545-S-MINAE, el cual menciona el procedimiento a seguir por los dueños y operadores de Plantas de Tratamiento para la instalación del sistema de tratamiento en una propiedad. También, se recopiló la información necesaria que debe ser incorporada en el Permiso de Ubicación según el Artículo 8 del reglamento indicado

anteriormente, que debe ser presentado ante la Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud.

3.3.4 Operación y mantenimiento del humedal artificial.

Con base a la información bibliográfica disponible, se detallaron los aspectos para tener en cuenta para la correcta operación del humedal artificial. Se realizaron recomendaciones para el mantenimiento del humedal artificial para evitar problemas en la implementación, tomando en cuenta que en el HPPS se debe priorizar la eliminación de olores indeseados y la no colmatación del sistema.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de las actividades planteadas en cada objetivo específico del proyecto. En la sección 4.1, con el primer objetivo específico, se detalla las características del sitio de estudio enfatizando en las unidades sanitarias presentes que originan el agua residual en el HPPS. Por ejemplo, se muestra la distribución de servicios sanitarios, lavamanos, duchas, pilas, ubicaciones de trampas de grasa, tanques sépticos y drenajes. Además, se incluye la caracterización del agua residual producida con el parámetro de Demanda Química de Oxígeno (DQO). El DQO indica la cantidad de materia orgánica presente en las aguas residuales. En términos generales se demuestra que el agua residual está siendo vertida en los drenajes con un DQO de aproximadamente 455 mg/L. Este valor supera el Límite Máximo Permisible (LMP) establecido por el Reglamento para la disposición al subsuelo de aguas residuales ordinarias tratadas por lo tanto es necesario plantear una solución para el correcto vertido de estas aguas residuales.

En la sección 4.2, con base en el segundo objetivo específico, se detalla la memoria de cálculo para el diseño del sistema de tratamiento con reúso. El sistema de tratamiento consiste en trampas de grasa, tanque séptico, el humedal artificial y tanques de captación y almacenamiento para reúso de las aguas tratadas. Se realiza también una valoración de las posibles ubicaciones del humedal artificial según su área superficial y otros criterios técnicos. Finalmente, como parte del segundo objetivo específico, se muestra el sistema de recirculación del agua tratada para el reúso en los inodoros del hotel. En términos generales se demuestra que es necesaria la construcción de un tanque séptico, el humedal artificial y tanques de captación y almacenamiento. Según los cálculos efectuados el tanque séptico es de un largo de 4,5 m, ancho de 2,7 m y 1,9 m de profundidad. En cuanto al humedal artificial, tendría un ancho de 3 m, largo de 10,5 m y una profundidad de 70 cm.

En la sección 4.3 se presentan los resultados relacionados con el tercer objetivo específico, en este, se presenta un análisis de prefactibilidad económica para la implementación del sistema en el hotel. En términos generales se demuestra que la inversión requerida en materiales para la construcción de la obra es de ¢2 452 653, donde un 26% (¢671 697) corresponde a material para hormigón, un 17% (¢441 523) corresponde al costo de tubería y accesorios, un 14% (¢351 863) corresponde al sustrato del humedal y un 43% (¢1 100 000) que corresponde al tanque de almacenamiento prefabricado. En cuanto a la mano de obra, se espera que el costo sea de ¢177 739.

Por último, en la sección 4.4, se detalla una guía de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de aguas diseñado para el HPPS. Esta guía se formula con base al Artículo 29 del Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas residuales que es parte de los requisitos que se entregan al Ministerio de Salud para la aprobación de la obra. Se incluye información como: descripción de cada uno de los procesos, información básica de diseño, el personal requerido para el mantenimiento del sistema, el equipo necesario para las operaciones rutinarias, las actividades de operación y mantenimiento, los desechos que se originan en el sistema, entre otra información de utilidad para el correcto funcionamiento del sistema.

4.1. Caracterización del sitio de estudio: distribución de unidades sanitarias y caracterización del agua residual en el Hotel Pensión Playa Sámara.

4.1.1. Descripción de la edificación y distribución de sus unidades sanitarias.

El HPPS está construido en un lote rectangular con un área de 1350 m², con dimensiones de 54 m de largo y 25 m de ancho (para observar el plano catastrado del HPPS ver Anexo 1). Dentro de las instalaciones del HPPS se identificaron las siguientes áreas: parqueo, piscina, área de recepción, cocina, 14 habitaciones, lavandería y un área común social (comedor, trabajo o estudio). A continuación, en la Figura 8, se muestra una vista en planta general del hotel. En

la Figura 9 y 10, se muestra el detalle de la distribución de las unidades sanitarias en el HPPS en la planta baja y en la planta alta, respectivamente.

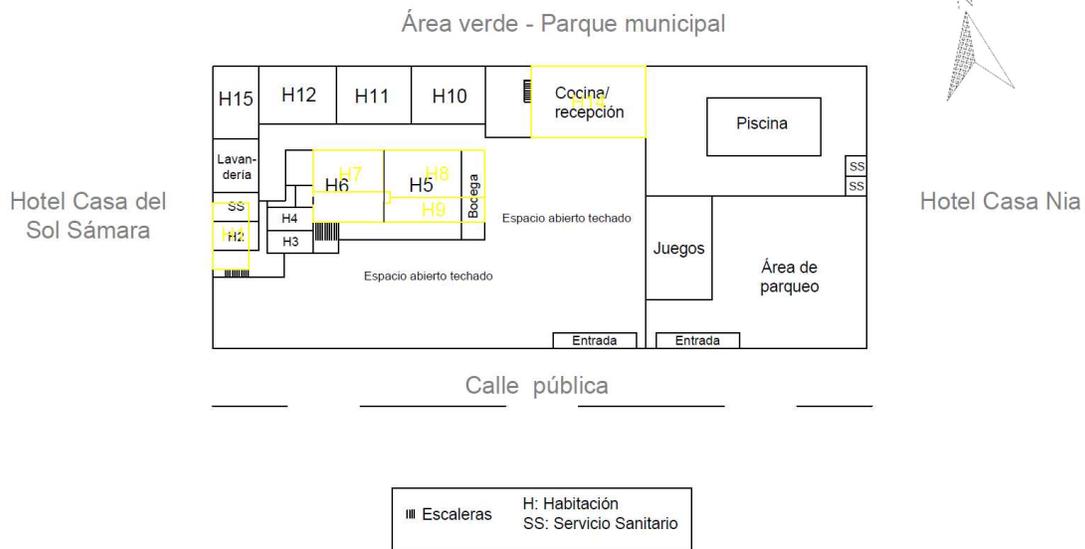


Figura 8. Vista general de planta del HPPS. Traslape de la planta alta (en amarillo) y de la planta baja (en negro) Nicoya, Guanacaste

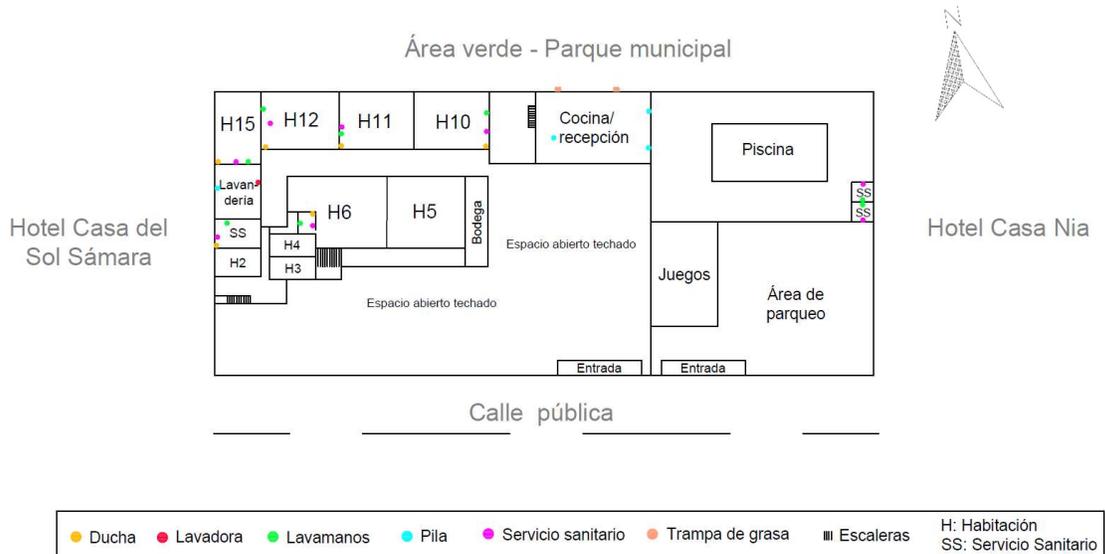


Figura 9. Distribución de las unidades sanitarias de la planta baja del HPPS, Nicoya, Guanacaste.

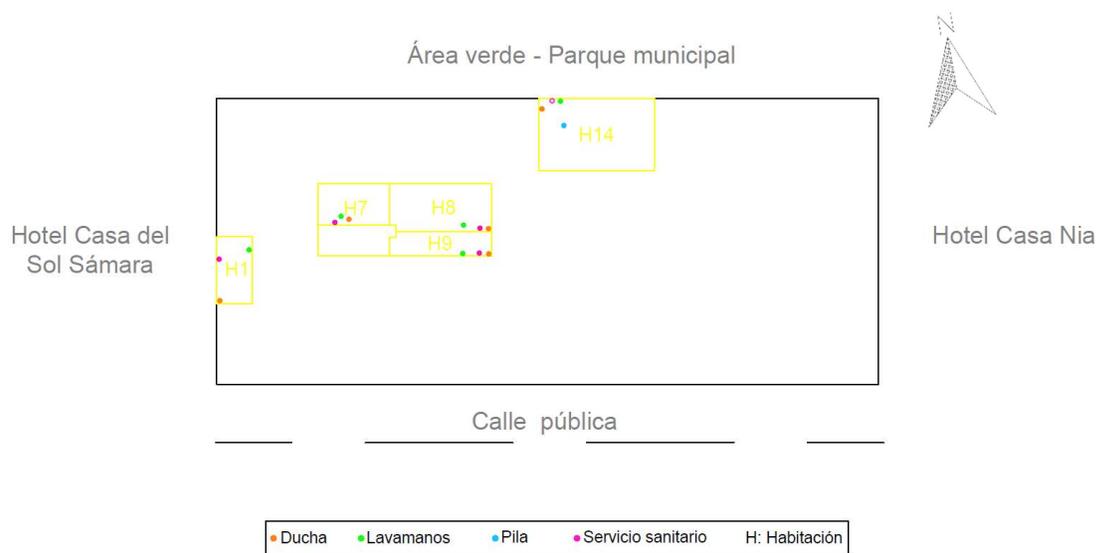


Figura 10. Distribución de las unidades sanitarias de la planta alta del HPPS, Nicoya, Guanacaste

El área de parqueo cuenta con un espacio para cinco vehículos. Es un área sin techo y con el piso cubierto con piedrilla, en vez de cemento o pavimento. El área de parqueo cuenta con un área de juegos. Esta área sí está techada y el piso es de cemento. Al lado del área de parqueo, se encuentra el área de la piscina, la cual está sin techar y cuenta con el espacio suficiente para colocar sillas de descanso alrededor de la piscina. En este sector, se encuentran dos servicios sanitarios con su respectivo lavamanos. La piscina cuenta con un área superficial de $49,25 \text{ m}^2$ y tiene una capacidad de $57,13 \text{ m}^3$.

En la recepción se cuenta con una pila pequeña y en la parte posterior de la recepción se ubica la cocina, donde hay dos pilas grandes que dirigen las aguas residuales a dos trampas de grasa que se ubican detrás de la cocina. Estas trampas de grasa están ubicadas en serie, una después de la otra y reciben toda el agua producida en la cocina.

En cuanto a las habitaciones, son 14 en total y tienen diferente tamaño de acuerdo con su capacidad, algunas de ellas son hasta para cinco personas. En HPPS tiene capacidad máxima para hospedar a 37 personas. Además, hay cinco personas en planta, que se encargan de labores

administrativas, de mantenimiento y aseo del HPPS. En cada habitación, generalmente se cuenta con un cuarto privado que incluye servicio sanitario, ducha y lavamanos. Sin embargo, hay tres habitaciones que comparten un cuarto completo grande (servicio sanitario, ducha y lavamanos) ubicado al lado de la lavandería.

El área de lavandería cuenta con una pila y una lavadora que es usada a diario en temporada alta. Por último, el área de comedor es un área techada y abierta. El piso es de cemento y en este espacio no se cuenta con ninguna unidad sanitaria que genere aguas residuales.

A continuación, la Tabla 4 presenta un resumen de la información brindada anteriormente. Toda esta información es relevante para el prediseño del sistema de tratamiento.

Tabla 4. Cantidad de unidades sanitarias y otra información importante para el prediseño del humedal artificial.

Información importante	Cantidad
Servicios sanitarios	13
Lavatorios	13
Pilas	4
Duchas	11
Trampas de grasa	2
Lavadoras	1
Habitaciones	14
Huéspedes a máxima capacidad	37
Personas trabajadoras	5

Una vez descrita la planta física de la edificación y sus características, en la sección 4.1.2 se procede a especificar el recorrido que realizan las aguas residuales en el hotel, describiendo las unidades de tratamiento primario como los tanques sépticos y las trampas de grasa.

4.1.2. Descripción de la red de tuberías de aguas residuales hasta su vertido final.

En esta sección se describe la red de tuberías de aguas residuales en el HPPS. Las aguas residuales generadas son del tipo ordinarias y son originadas en las habitaciones, cocina, recepción y los dos servicios sanitarios en el área de piscina. Las áreas de parqueo y comedor no generan ningún tipo de agua residual.

La red de tuberías está construida en serie e incluye, a lo largo de su trayectoria, dos trampas de grasa, tres tanques sépticos, una caja de registro y drenaje. Cada tanque es de diferente capacidad ya que cada uno de ellos recibe el agua residual de diferentes áreas del hotel. Al final de la red de tubería, las aguas residuales son dirigidas a un drenaje en el suelo. A continuación, se detalla la ubicación, distribución y dimensionamiento de las trampas de grasa y cada tanque séptico. Este arreglo se representa en la Figura 11.

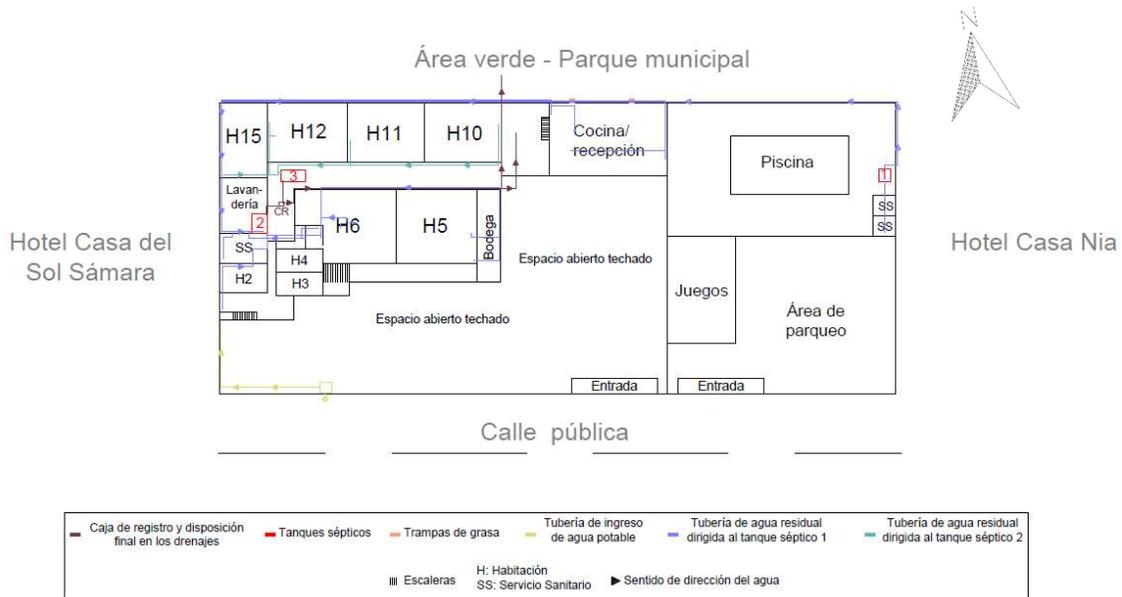


Figura 11. Ubicación de tuberías, tanques sépticos, caja de registro y sitios de drenaje del HPPS, Nicoya, Guanacaste

- Trampas de grasa: Están ubicadas en la parte trasera de la cocina y reciben las aguas residuales de esta zona. Son dos trampas de grasa y están dispuestas en serie: la primera trampa de grasa fue construida en el sitio con cemento, tiene forma de “caja” y en la tubería de salida tiene una botella plástica con agujeros que sirve como rejilla la cual retiene los sólidos (Figura 12). Sus dimensiones son: 49 cm de largo, 36 de ancho y 30 cm de profundidad. La segunda trampa de grasa (Figura 13) es prefabricada plástica residencial de la marca eco-tank, con una capacidad de 38 litros, es en este punto donde se logra una separación de las grasas y aceites más eficaz. Ambas trampas de grasa se limpian dos veces a la semana, removiendo los sólidos y las grasas que se acumulan en la superficie.



Figura 12. Trampa de grasa 1 (TG1) ubicada en la parte posterior de la cocina en el HPPS



Figura 13. Trampa de grasa 2 (TG2) ubicada en la parte posterior de la cocina, después de la TG1

- Tanque séptico 1 (T1): está ubicado en el área de la piscina donde recibe el agua residual de los servicios sanitarios ubicados en esta zona. Las dimensiones del tanque séptico son 1,15 m de profundidad, 0,7 m de ancho y 0,8 m de largo, resultando una capacidad total de 0,644 m³. De los tres tanques sépticos en el HPPS, es el de menor volumen por solo recibir el agua residual de dos inodoros. Es importante mencionar que el tanque séptico 1 tiene una bomba sumergible con boya a 50 cm de profundidad, aproximadamente, la cual dirige las aguas residuales al tanque séptico 2, que cuenta con mayor capacidad. Esta bomba puede succionar material sólido que no se ha sedimentado debido a que se activa cuando la boya llega a determinada altura y no asegura que el proceso de sedimentación se haya realizado.
- Tanque séptico 2 (T2): está ubicado en el área de la lavandería y recibe el agua residual proveniente de las trampas de grasa, el tanque séptico 1, la lavandería, el servicio compartido de habitaciones ubicado al lado de la lavandería y de siete habitaciones (con número de habitación: 1, 5, 6, 7, 8, 9 y 14). Las dimensiones de este tanque son 1,8 m de profundidad, 1,3 m de ancho y 1,6 m de largo con una capacidad volumétrica de 3,7 m³. Sin embargo, esta capacidad no se utiliza en su totalidad debido a que hay una bomba sumergible con boya ubicada a una altura aproximada de 93 cm con respecto al fondo del tanque séptico que dirige el agua residual a una caja de registro, lo anterior causa que el tanque séptico no se llene en su totalidad, dando como resultado una capacidad efectiva de 1,9 m³. De la caja de registro, la tubería dirige las aguas residuales al drenaje.
- Tanque séptico 3 (T3): está ubicado en un pasillo del hotel, cerca de las habitaciones con numeración 10 a la 15 (excepto la 14) y recibe únicamente las aguas residuales de estas habitaciones. Sus dimensiones son 1,3 m de profundidad, 2 m de largo y 1,0 m de ancho. Las dimensiones anteriores dan como resultado un tanque séptico de 2,6 m³ de

capacidad total. Este tanque séptico no tiene bomba sumergible, por lo que utiliza la gravedad para dirigir el agua a la caja de registro donde se une con el agua residual del T2.

Después que las aguas residuales de los tanques 2 y 3 se unen en la caja de registro, el agua residual es bombeada por la tubería hacia los drenajes. Uno de los drenajes está ubicado al lado de la cocina y el otro en la parte posterior del hotel, donde se encuentra un parque de propiedad pública. Al ser estos drenajes subterráneos, donde el agua residual se infiltra en el suelo, es necesario verificar que el efluente cumpla con los Límites Máximos Permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales establecidos en el Reglamento para la disposición al subsuelo de aguas residuales ordinarias tratadas, evitando así contaminación en el suelo y cuerpos de agua cercanos.

4.1.3. Caracterización del agua residual y medición del parámetro DQO.

El HPPS genera agua residual de tipo ordinaria. Esta agua residual está compuesta por aguas negras y grises que son generadas a partir del uso de inodoros, duchas, lavatorios, fregaderos, lavado de ropa, entre otros. [46].

Para caracterizar el agua residual de hotel se utilizó el parámetro de DQO. Se tomaron muestras en distintos puntos de interés, como lo son trampa de grasa 2, los tanques sépticos 2 y 3, la caja de registro y la entrada al drenaje ubicado al lado de la cocina.

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en las mediciones de DQO. En Figura 14, se presenta la información de esta misma medición y adicionalmente se detalla el recorrido que realizan las aguas residuales en el hotel.

Tabla 5. Caracterización del agua residual, concentración de DQO en mg/L, en puntos de interés del actual sistema de tratamiento del HPPS

Ubicación de la muestra	Cantidad de muestras	DQO (mg/L)	Promedio (mg/L)
Trampa de grasa 2	2	>1500	3280
		3280	
Tanque séptico 2	2	602	560
		518	
Tanque séptico 3	2	1335	1394,5
		1454	
		359	
Caja de registro	3	556	455
		450	
		486	
Drenaje	2	486	454
		422	

Notas:

* Todos los valores promedios de DQO están por encima del Límite Máximo Permisible de la Tabla 4 del Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, el cual es de 150 mg/L.

Análisis realizados el día 18 de abril del 2021.

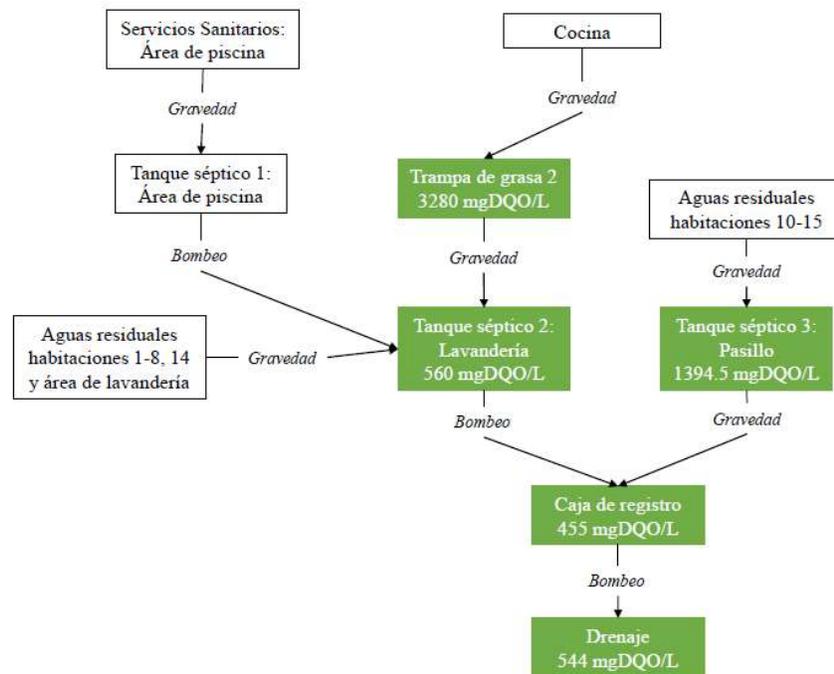


Figura 14. Diagrama del recorrido de las aguas residuales del HPPS. En verde se indican los puntos de muestreo

En la Figura 14 se observa que el punto donde se tiene mayor concentración de DQO es en la segunda trampa de grasa, ubicada en la parte posterior de la cocina del hotel. La concentración de 3280 mg DQO/L es un valor común en trampas de grasa, como se demuestra en [47] y [43]. En [42] se realizó una medición en diversas trampas de grasa de un área de comidas de un supermercado y el resultado promedio de la medición de DQO es 3793,5 mg DQO/L, mientras que en [48] se tomaron muestras de agua residual producidas en una cocina-comedor y el resultado alcanzado fue de 3590 mg DQO/L.

La concentración de DQO va disminuyendo conforme se avanza en el sistema de tratamiento siguiendo una tendencia esperada. De especial atención son los puntos de muestreo en la caja de registro y entrada del drenaje. La concentración en estos puntos, 455 mg DQO/L en la caja de registro y 454 mg DQO/L en el drenaje, fue utilizada para el diseño del humedal artificial. Las concentraciones obtenidas justifican la implementación de un humedal artificial puesto que los valores son mayores a los establecidos en el Reglamento para la disposición al subsuelo de aguas residuales ordinarias tratadas, la cual exige para DQO un valor menor a 150 mg DQO/L [39] para verter las aguas a un drenaje subterráneo. Debido a lo anterior, se utilizó como parámetro de diseño del humedal artificial un valor de DQO de 500 mg DQO/L para el humedal artificial, este valor es similar a los reportados por [26] donde se evalúa el desempeño de un humedal artificial a nivel de laboratorio y se realizan mediciones en a lo largo de este, incluyendo a la entrada del humedal.

Es por lo anterior que, según los requerimientos solicitados por la administradora del hotel, se realizó el diseño de un humedal artificial para depurar las aguas residuales de la edificación que se adapte a las condiciones específicas de la zona y logre disminuir la carga orgánica en conformidad con la normativa nacional. Los resultados del proceso de diseño se presentan en la sección 4.2

4.2. Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales del HPPS

4.2.1. Posibles sitios para la ubicación del humedal artificial en el HPPS

Se identificaron cuatro posibles sitios para la ubicación del humedal artificial. Es importante mencionar que el terreno donde está ubicado el HPPS no tiene pendientes importantes, por lo anterior, se considera que todos los sitios identificados son planos. A continuación, en la Figura 15 se ilustran estas posibles ubicaciones. Se realizó un análisis de cada ubicación describiendo sus ventajas y limitaciones.

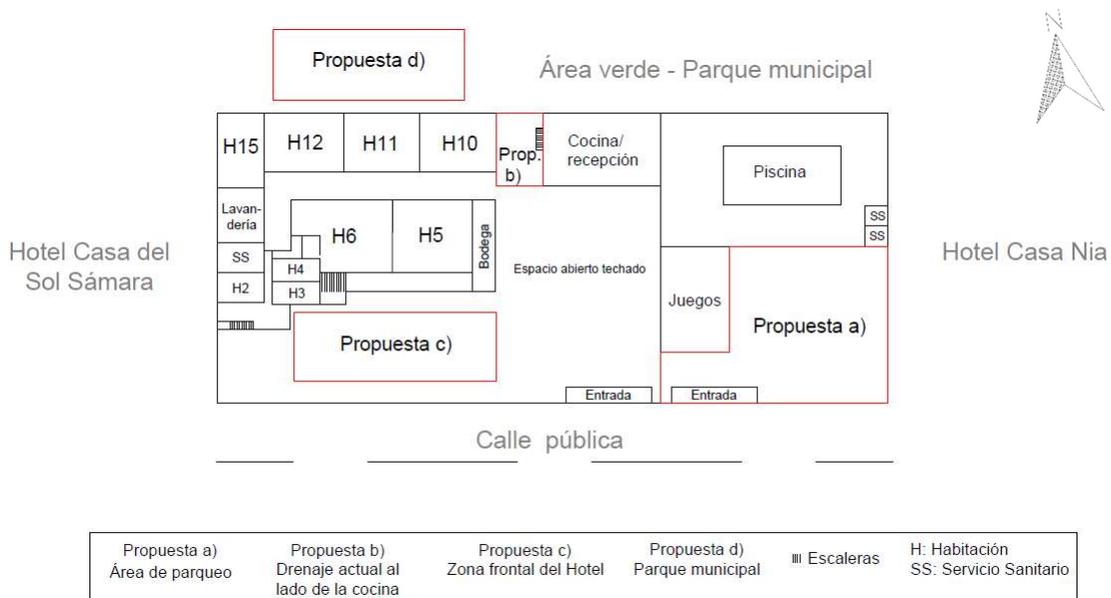


Figura 15. Posibles ubicaciones identificadas para el humedal artificial a diseñar para el HPPS.

- Área de parqueo. Propuesta a) en la Figura 15. El parqueo tiene un área de aproximadamente 65 m². Tiene un material tipo piedrilla en el suelo y está sin techar. El humedal artificial podría ubicarse en esta área en el costado más lejano a la entrada del HPPS para evitar malos olores a la hora de realizar mantenimiento del HA. Esta área no es una de las propuestas por la administradora del hotel para establecer el sistema, debido a que no se quieren disminuir espacios para parqueo. Si se utiliza este espacio, se tendría que valorar la reubicación de estos espacios en otra área del HPPS.

- Drenaje actual. Propuesta b) en la Figura 15. Tiene un área de 24 m², aproximadamente. Este sitio es una de las propuestas por parte de la administración del HPPS para ubicar el humedal artificial. Esta área no está asfaltada ni techada. La principal limitación que se tiene es que el área es reducida y hay que considerar que se encuentra cerca de las habitaciones y de la cocina (Figura 16).



Figura 16. Área del drenaje, ubicada al lado de la cocina del Hotel

- Zona frontal del hotel. Propuesta c) en la Figura 15. Esta área cuenta con 45 m². Es otra área propuesta por la administración del hotel. Tiene un material tipo cemento como piso, está sin techar y se encuentra cerca de la entrada del HPPS, lo cual facilitaría labores de construcción y mantenimiento. La principal limitación de este espacio es que está cerca de habitaciones y de las zonas comunes. (Figura 17).



Figura 17. Área frontal del Hotel

- Parque municipal. Propuesta d) en la Figura 15. En la parte posterior del HPPS, se encuentra un parque municipal sin asfaltar y sin techar donde se realiza la feria del agricultor los sábados y el resto de la semana permanece cerrado. Es importante tener en cuenta que actualmente la normativa nacional no permite la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales en parques públicos, sin embargo, es importante tener una discusión y valorar la diferencia entre sistemas de tratamiento y sistemas de revalorización. Un humedal artificial que trate el agua residual de hoteles cercanos aportaría belleza escénica al sitio, sería una solución para el tratamiento de agua residual para comunidades pequeñas y se puede utilizar como espacio de educación a la población acerca el buen manejo de recursos hídricos. Adicionalmente, ayudaría a la apropiación de los espacios públicos de parte de las diferentes comunidades.

Al seleccionar la ubicación idónea del HA hay que valorar aspectos como la aceptación de parte de la administración y de los huéspedes, el área de diseño, el número de humedales a construir, la facilidad de ubicación de tuberías y también el trabajo requerido para acondicionar el lugar (movimiento de tierras, eliminación de asfalto, entre otras...).

Una vez que han sido identificadas las posibles zonas para la ubicación del HA, se procede con el dimensionamiento del área requerida para el tratamiento y con esto tomar la decisión en conjunto con la administración del HPPS para la construcción del sistema.

4.2.2. Caudal de diseño

Se consideró el consumo mensual de agua potable de la edificación para definir el caudal de diseño del humedal artificial. Para lo anterior, se solicitó a la ASADA de Sámara el registro de consumo de agua potable desde enero del año 2019 hasta el mes de octubre del 2020 (ver Anexo 2). A continuación, en la Figura 18 se reflejan los datos de consumo mensual. También, a manera de comparación, se solicitó la información de la ocupación del HPPS (Figura 19) para observar el comportamiento del uso de agua potable con la cantidad de personas que se hospedan en el hotel (ver Anexo 5).

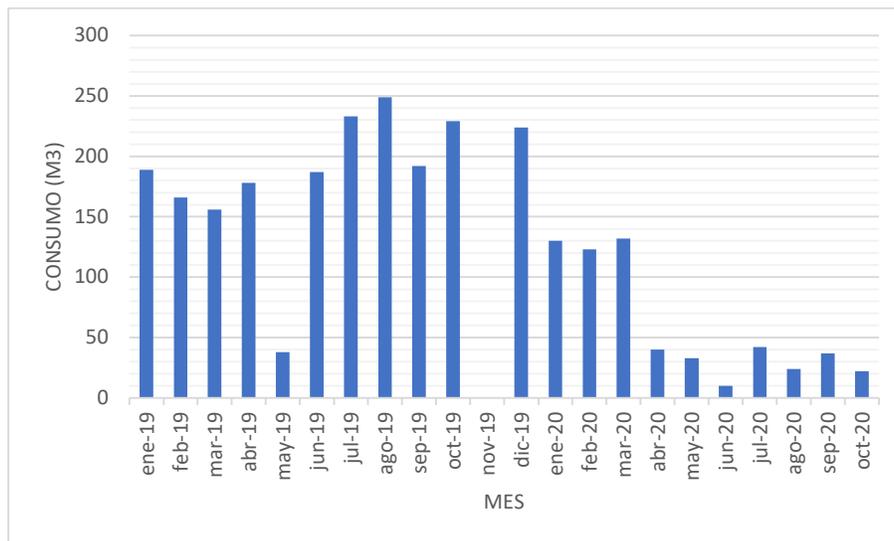


Figura 18. Consumo de agua potable del HPPS desde enero del 2019 hasta octubre del 2020.

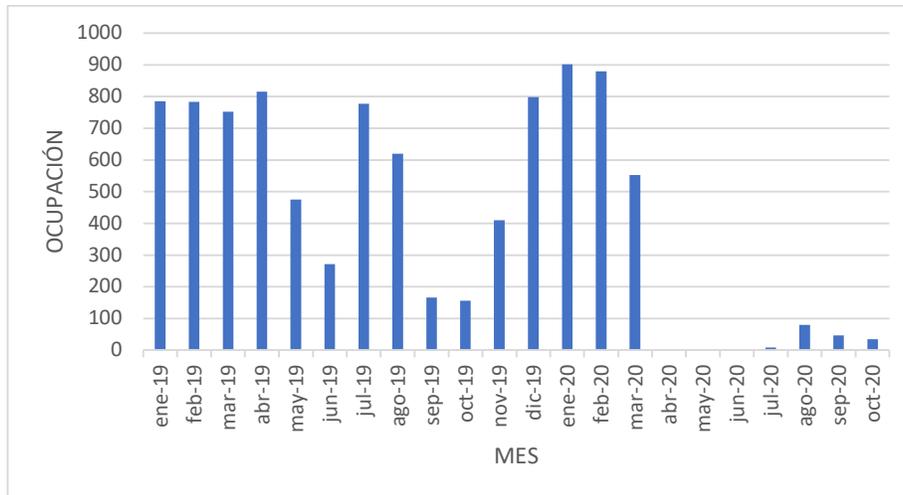


Figura 19. Ocupación mensual (número de personas por mes) del HPPS desde enero 2019 hasta octubre del 2020

Con base en la información mostradas en las figuras 18 y 19, se observa que, a partir de marzo del 2020, debido a las restricciones sanitarias por la pandemia, disminuyó la visitación y, por tanto, se presentó una baja importante en el consumo de agua. Es por lo que, para determinar el caudal de diseño se utilizaron los datos de consumo desde enero-2019 hasta marzo-2020, exceptuando el mes de noviembre-2019 donde hubo una falla en la lectura del medidor de agua potable y se reportaron 0 m³ consumidos (Tabla 6). Ese mismo lapso es el que se utilizó para calcular la ocupación diaria promedio del hotel, la cual es de 20 personas por día.

Para el diseño del sistema de tratamiento se toma en cuenta el caudal máximo y el caudal correspondiente al tercer cuartil de los datos. La decisión anterior se tomó debido a que durante el año los datos presentan variación según la temporada turística y se consideró que el valor promedio podría representar un valor bajo de caudal. Lo cual afectaría el funcionamiento del humedal artificial en los meses de mayor demanda (temporada alta).

Tabla 6. Valores de consumo de agua potable en el HPPS considerados para el cálculo de caudal.

Mes	Consumo (m³)
ene-19	189
feb-19	166
mar-19	156
abr-19	178
may-19	38
jun-19	187
jul-19	233
ago-19	249
sep-19	192
oct-19	229
dic-19	224
ene-20	130
feb-20	123
mar-20	132
Valor máximo	249,0
Valor promedio	173,3
Tercer cuartil	225,3

Aplicando el coeficiente de retorno sanitario de 0,8, se determinan dos caudales de diseño para estimar el área del humedal artificial. Los caudales son 6,4 m³/d y 6,0 m³/d, obtenidos a partir del caudal máximo y el tercer cuartil, respectivamente. Una vez establecido el caudal de diseño, se procede al cálculo del tratamiento primario y del tratamiento secundario del HPPS.

4.2.3. Dimensionamiento del tratamiento primario

Se propone que el tratamiento primario del HPPS conste de un tanque séptico con las dimensiones apropiadas. Al realizar los cálculos de dimensionamiento, se evidencia que los tanques sépticos 1, 2 y 3 (descritos en la sección 1.1) no son suficientes para el correcto tratamiento primario de las aguas servidas. Por lo anterior, se propone construir un tanque séptico que cumpla con los requerimientos del HPPS y será en un espacio de la sección del parqueo. Esta ubicación tiene la ventaja que está cerca de la salida del Hotel y cerca de la calle pública, por lo que facilitaría la evacuación de lodos de ser necesario sin provocar

incomodidades a los huéspedes. En la Tabla 7, se presentan los parámetros que se tuvieron en cuenta para el dimensionamiento del tanque séptico.

Tabla 7. Parámetros requeridos para el diseño del tanque séptico

Nombre del parámetro	Magnitud	Unidad
Caudal, Q	6000 ¹	L/d
Tiempo de retención hidráulica para sedimentación, T_n	1 ²	d
Cantidad de personas por atender, P	21 ³	personas
Temperatura del agua residual, T	24,6 ⁴	°C
Tiempo de retención requerido para la biodigestión, t_d	40,04 ²	adimensional
Factor que caracteriza las aguas (teórico), r	40 ²	L/p*año
Período entre limpiezas y remoción de lodos, n	3 ²	años

1: Se dimensiona considerando el caudal del tercer cuartil

2: Artículo 10.2-20 del Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones [2]

3: Ocupación diaria promedio del HPPS de 20 personas/día

4: Temperatura del mes más frío registrada

El diseño del tanque séptico se realizó para un total de 21 personas. Como se mencionó en la sección 4.2.2, la ocupación promedio diaria es de 20 personas, se utilizó 21 porque además coincide con el número de la mitad del total de huéspedes y da cierta holgura en el cálculo.

Con base en los parámetros de diseño del tanque séptico, se calcula el volumen para sedimentación (Ecuación 6), el volumen para biodigestión (Ecuación 7) y el volumen para el almacenamiento de lodos digeridos (Ecuación 9), para obtener el volumen total del tanque séptico del HPPS (Ecuación 10). A continuación, en la Tabla 8, se muestra el volumen total calculado del tanque séptico:

Tabla 8. Volumen total del tanque séptico y su dimensionamiento

Nombre del parámetro	Magnitud	Unidad
Volumen para sedimentación, V_s	6	m ³
Volumen para biodigestión, V_d	0,42	m ³
Volumen para el almacenamiento de lodos digeridos, V_a	2,43	m ³
Volumen total de líquidos, V_{TL}	8,85	m ³
Largo, L	4,5	m
Ancho, A	1,5	m
Profundidad efectiva, P_f	1,5	m
Profundidad total, P_t	1,8	m
Relación L/A	3	adimensional
Volumen efectivo del tanque séptico, V_e	10,12	m ³
Volumen total del tanque séptico, V	12,15	m ³

El volumen total del tanque séptico debe ser de 8,8 m³ para cumplir con los requerimientos de la Tabla 7. Para ese volumen, se propone que las dimensiones sean: 4,5 m de largo, 1,5 m de ancho y 1.5 m de profundidad efectiva, para una relación de largo/ancho (L/A) de 3 y un volumen efectivo de 10 m³. En el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones se recomienda que la distancia entre el nivel de líquido y la parte superior de la losa del tanque sea aproximadamente igual al 20% de la profundidad del líquido [2]. Por lo anterior, se adicionan 30 cm a la profundidad, resultando una profundidad total P_t de 1,8 m y un volumen total V de 12 m³.

4.2.4. Cálculo del dimensionamiento del humedal artificial

Como se menciona en la sección 3.2.2, se establecieron diferentes condiciones de diseño con base en caudal y profundidad, para establecer 4 configuraciones diferentes para el cálculo del área superficial del HA. Estas configuraciones se describen en la Tabla 9.

Tabla 9. Configuraciones tomadas en cuenta para el cálculo del área superficial de los HA, estableciendo diferentes condiciones de caudal y profundidad.

Número de configuración	Descripción	Caudal de diseño (m3/d)	Profundidad de diseño
1	Caudal máximo y HA poco profundo.	6,4	HASH: 0,3 m HASV: 0,5 m
2	Caudal del tercer cuartil y HA poco profundo.	6,0	HASH: 0,3 m HASV: 0,5 m
3	Caudal máximo y HA profundo.	6,4	HASH: 0,6 m HASV: 0,8 m
4	Caudal del tercer cuartil y HA profundo.	6,0	HASH: 0,6 m HASV: 0,8 m

Valorando las posibilidades de implementación del HA en el HPPS, se tomó en cuenta la opción de colocar dos HA en serie, debido a que se tienen cuatro posibles lugares para construcción (sección 4.2.1). Esto implica que el área de cada humedal sería menor porque se trataría el 50% del caudal en cada sistema. Es por lo anterior que para cada configuración descrita en la Tabla 9, se calcularon cuatro áreas superficiales para HA subsuperficiales, resultando 16 opciones por valorar para la construcción. Las cuatro áreas superficiales calculadas son:

- H+H: dos humedales artificiales subsuperficiales horizontales (HASH) en paralelo. Cada uno recibe el 50% del caudal total.
- V+V: dos humedales artificiales subsuperficiales verticales (HASV) en paralelo. Cada uno recibe el 50% del caudal total.
- H100: un humedal artificial subsuperficial horizontal (HASH) que recibe el 100% del caudal.
- V100: un humedal artificial subsuperficial vertical (HASV) que recibe el 100% del caudal.

Para cada tipo de HA, se calculó con la Ecuación 1 el área teórica en m^2 que es el área superficial necesaria según las condiciones de diseño. Sin embargo, este cálculo de área no brinda información de las dimensiones de ancho y largo, las cuales se recomienda mantener en una relación de 3:1, es decir, un metro de ancho por tres metros de largo [36]. Por lo tanto, es necesario reajustar el área teórica con valores de ancho y largo que se mantengan cercanos a la relación 3:1 y a la vez que el valor no sea menor al área teórica. Este nuevo cálculo se denomina área resultante y está dada en m^2 .

Para explicar con un ejemplo, en la Tabla 10 se muestra que para las condiciones de la configuración #1 (caudal máximo y HA poco profundo). Las áreas resultantes calculadas serían:

- Para un sistema de HASH tratando el total del caudal, el área es de $110 m^2$, con un ancho de 5,5 m, largo de 20 m y una profundidad de 0,3 m.
- Para un sistema de HASV tratando el total del caudal, el área es de $62 m^2$, con un ancho de 4 m, largo de 15,5 m y una profundidad de 0,5 m.
- Para dos sistemas HASH tratado el 50% del caudal, el área de cada uno debe ser de $54 m^2$, con un ancho de 4 m, largo de 13,5 m y una profundidad de 0,3 m.
- Para dos sistemas HASV tratado el 50% del caudal, el área de cada uno debe ser de $31,5 m^2$, con un ancho de 3 m, largo de 10,5 m y una profundidad de 0,5 m.

El análisis anterior, es el mismo para las otras 3 configuraciones que se representan en las Tablas 10, 11 y 12. También, como parte de la información de esas tablas se calcula el TRH con la Ecuación 5 para cada tipo de HA. Cabe resaltar que, en todas las áreas calculadas, se cumple teóricamente con el TRH mínimo de un día para los HA.

Como ejemplo, a continuación, se realiza el cálculo del área superficial necesaria y el Tiempo de Retención Hidráulica para la configuración #1, para el tipo de humedal V100. Este cálculo

se basa en la Ecuación 1, que se puede reajustar de la siguiente manera, utilizando las ecuaciones 3 y 4:

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

Con la Ecuación 2, se necesita calcular la concentración residual C^* de la siguiente manera:

$$C^* = 3,5 \text{ mg/Ld}qo + 0,053 \cdot C_a$$

$$C^* = 3,5 \text{ mg/Ld}qo + 0,053 \cdot 500 \text{ mg/Ld}qo$$

$$C^* = 30 \text{ mg/Ld}qo$$

Además, se necesita calcular el parámetro de K_T que depende de la temperatura del agua residual en el sitio de estudio. El parámetro K_{20} se relaciona con el contaminante objetivo, en este caso de la carga orgánica y es igual a 0,678 [25]:

$$K_T = K_{20} \cdot 1,06^{(T-20)}$$

$$K_T = 0,678 \cdot 1,06^{(24,6^\circ\text{C}-20)}$$

$$K_T \approx 0,8864$$

Una vez obtenidos esos datos, ya se puede utilizar la Ecuación 1. Utilizando 0,5 m de profundidad del humedal y 0,32 de porosidad:

$$A = \frac{6,4 \text{ m}^3/d \cdot \ln\left(\frac{500 \text{ g/Ld}qo - 30 \text{ mg/Ld}qo}{150 \text{ g/Ld}qo - 30 \text{ mg/Ld}qo}\right)}{0,8864 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 0,32}$$

$$A = 61,0 \text{ m}^2$$

Una vez obtenida esta área superficial, se decide que el ancho de este humedal es de 4 m y el largo será de 15,5 m, lo que brinda un área resultante de 62 m² con una relación de L/A de 3,87.

Por último, se calcula el TRH con la Ecuación 5:

$$TRH (d) = \frac{V \cdot n}{Q}$$

$$TRH (d) = \frac{A \cdot d \cdot n}{Q}$$

$$TRH (d) = \frac{61 \text{ m}^2 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 0,32}{6,4 \text{ m}^3/d}$$

$$TRH (d) = 1,6 d$$

Igual que el cálculo anterior, se realiza el cálculo para cada área superficial y TRH para la respectiva configuración y tipo de humedal. Se puede analizar a detalle los cálculos en el Anexo 7.

En las Tablas 10, 11, 12 y 13 se utilizó el sombreado de colores verde y naranja para representar la viabilidad de la construcción del HA específico en cuanto al área necesaria, según el análisis de áreas disponibles en la Sección 4.2.1, el área del parque municipal se excluyó de este análisis debido a que la construcción en este espacio no depende de la administración del HPPS. Un color naranja representa que no es viable de construir porque el área requerida es mayor al área disponible en cualquier espacio y un color verde representa que es viable por lo menos en un sitio de los propuestos.

Tabla 10. Áreas resultantes, dimensionamiento y tiempo de retención hidráulico (TRH) del humedal artificial utilizando las condiciones para la configuración 1 de caudal y profundidad.

Condiciones configuración 1:				
Caudal (m ³ /d) = 6,4			No viable	
y Horizontal (m) = 0,3			Viable	
y Vertical (m) = 0,5				
Configuración del humedal				
	H+H*	V+V*	V100*	H100*
Área teórica (m ²)	53,9	30,5	61,0	107,7
Ancho (m)	4	3	4	5,5
Largo (m)	13,5	10,5	15,5	20
Área resultante (m ²)	54	31,5	62	110
TRH (d)	1,5	1,6	1,6	1,6

* H+H: dos humedales artificiales subsuperficiales horizontales (HASH) en paralelo.

V+V: dos humedales artificiales subsuperficiales verticales (HASV) en paralelo.

H100: un humedal artificial subsuperficial horizontal (HASH).

V100: un humedal artificial subsuperficial vertical (HASV).

Tabla 11. Áreas resultantes, dimensionamiento y tiempo de retención hidráulico (TRH) del humedal artificial utilizando las condiciones para la configuración 2 de caudal y profundidad

Condiciones configuración 2:				
Caudal (m ³ /d) = 6			No viable	
y Horizontal (m) = 0,3			Viable	
y Vertical (m) = 0,5				
Configuración del humedal				
	H+H*	V+V*	V100*	H100*
Área teórica (m ²)	50,5	28,6	57,2	101,0
Ancho (m)	4	3	4	5,5
Largo (m)	13	10	14,5	18,5
Área resultante (m ²)	52	30	58	101,75
TRH (d)	1,6	1,6	1,6	1,6

* H+H: dos humedales artificiales subsuperficiales horizontales (HASH) en paralelo.

V+V: dos humedales artificiales subsuperficiales verticales (HASV) en paralelo.

H100: un humedal artificial subsuperficial horizontal (HASH).

V100: un humedal artificial subsuperficial vertical (HASV).

Tabla 12. Áreas resultantes, dimensionamiento y tiempo de retención hidráulico (TRH) del humedal artificial utilizando las condiciones para la configuración 3 de caudal y profundidad.

Condiciones configuración 3:				
Caudal (m ³ /d) = 6,4			No viable	
y Horizontal (m) = 0,6			Viable	
y Vertical (m) = 0,8				
Configuración del humedal				
	H+H*	V+V*	V100*	H100*
Área teórica (m ²)	26,9	19,1	38,1	53,9
Ancho (m)	3	2,5	3,5	4
Largo (m)	9	8	11	13,5
Área resultante (m ²)	27	20	38,5	54
TRH (d)	1,5	1,6	1,6	1,5

* H+H: dos humedales artificiales subsuperficiales horizontales (HASH) en paralelo.

V+V: dos humedales artificiales subsuperficiales verticales (HASV) en paralelo.

H100: un humedal artificial subsuperficial horizontal (HASH).

V100: un humedal artificial subsuperficial vertical (HASV).

Tabla 13. Áreas resultantes, dimensionamiento y tiempo de retención hidráulico (TRH) del humedal artificial utilizando las condiciones para la configuración 4 de caudal y profundidad.

Condiciones configuración 4:				
Caudal (m ³ /d) = 6			No viable	
y Horizontal (m) = 0,6			Viable	
y Vertical (m) = 0,8				
Configuración del humedal				
	H+H*	V+V*	V100*	H100*
Área teórica (m ²)	25,2	17,9	35,8	50,5
Ancho (m)	3	2,5	3	4
Largo (m)	9	7,5	12	13
Área resultante (m ²)	27	18,75	36	52
TRH (d)	1,6	1,6	1,6	1,6

* H+H: dos humedales artificiales subsuperficiales horizontales (HASH) en paralelo.

V+V: dos humedales artificiales subsuperficiales verticales (HASV) en paralelo.

H100: un humedal artificial subsuperficial horizontal (HASH).

V100: un humedal artificial subsuperficial vertical (HASV).

En la Tabla 14 se presenta un resumen con áreas resultantes de cada configuración y tipo de humedal. Seguidamente, la Tabla 15 presenta el tiempo de retención hidráulica (TRH) calculado para cada humedal.

Tabla 14. Área superficial en metros cuadrados de los diferentes tipos de humedal artificial según las configuraciones 1, 2, 3 y 4.

	H+H	V+V	V100	H100
Configuración 1	54	31,5	62	110
Configuración 2	52	30	58	101,75
Configuración 3	27	20	38,5	54
Configuración 4	27	18,75	36	52

Tabla 15. Tiempo de retención hidráulica (TRH) en días de los diferentes tipos de humedal artificial según las configuraciones 1, 2, 3 y 4.

	H+H	V+V	V100	H100
Configuración 1	1,5	1,6	1,6	1,6
Configuración 2	1,6	1,6	1,6	1,6
Configuración 3	1,5	1,6	1,6	1,5
Configuración 4	1,6	1,6	1,6	1,6

Para la elección del humedal artificial más idóneo, se establecieron dos criterios de cumplimiento preliminares:

- Que el humedal artificial sea viable constructivamente dentro del HPPS. Las medidas de largo y ancho de algunos humedales diseñados son demasiado grandes para colocar el humedal dentro de la propiedad del HPPS.
- Se prefiere la construcción de un solo sistema. En el proceso de diseño se valoró la posibilidad de la construcción de dos sistemas en paralelo, sin embargo, en conversación con la administradora de HPPS, Nicolette Smith y presentándole las diferentes opciones, se decidió que lo más recomendable es la construcción de un solo sistema que trate el 100% del caudal debido a que el hotel tiene restricciones importantes de espacio.

- Si más de un humedal cumple con los criterios anteriores, se analizarán el HASH y el HASV de menor área en base a las ventajas y desventajas del funcionamiento de estos dos sistemas, para así escoger el más recomendable para el HPPS.

Con base en los criterios de cumplimiento descritos anteriormente, se descartan 11 opciones de humedales, reduciendo a seis las opciones viables a construir en el HPPS (Tabla 16). Se tienen tres alternativas de HASV con áreas que varían entre 62 m² a 36 m². También, se tienen otras tres alternativas de HASH con áreas que varían entre 110 m² a 52 m². Estas variaciones son principalmente por las diferencias entre caudales y profundidades. Se demuestra que se obtiene una menor área si se utiliza el caudal del tercer cuartil y las profundidades altas. Estas 6 posibles opciones podrían ser colocadas en el área de parqueo y en el área que se encuentra al frente del hotel, ambas descritas en la Sección 4.2.1, sin embargo, se debe analizar en conjunto con la administradora del HPPS cuál es el mejor espacio para ubicar el sistema. Para continuar con el análisis y tomar la decisión, se tomaron los humedales artificiales subsuperficiales horizontales y verticales con menor área, que corresponden a la configuración 4.

Tabla 16. Criterios de cumplimiento y de no cumplimiento para la elección del humedal artificial a construir en el HPPS

		Área requerida (m ²)	Área suficiente*	Sistema único*
Configuración 1	H+H	54	X	X
	V+V	31,5	X	X
	V100	62		
	H100	110		
Configuración 2	H+H	52		X
	V+V	30		X
	V100	58		
	H100	101,75	x	
Configuración 3	H+H	27		X
	V+V	20		X
	V100	38,5		
	H100	54		
Configuración 4	H+H	27		X
	V+V	18,75		X
	V100	36		
	H100	52		

H+H: dos humedales artificiales subsuperficiales horizontales (HASH) en paralelo.

V+V: dos humedales artificiales subsuperficiales verticales (HASV) en paralelo.

H100: un humedal artificial subsuperficial horizontal (HASH).

V100: un humedal artificial subsuperficial vertical (HASV).

*Un color rojo representa las opciones descartadas. Un color verde representa las opciones que se pueden tomar en cuenta. Un color amarillo representa las opciones que fueron seleccionadas.

Los dos humedales por analizar serán: un HASV con un área de 36 m² y un HASH con un área de 52 m². Sus dimensiones se resumen en la Tabla 17:

Tabla 17. Dimensiones del HASH y HASV que se analizarán para la construcción del HA en el HPPS.

Tipo de humedal	HASH	HASV
Área superficial (m ²)	52	36
Ancho (m)	4,0	3,0
Largo (m)	13,0	12,0
Profundidad (m)	0,6	0,8
TRH (d)	1,6	1,6

4.2.5. Selección del humedal artificial

Una vez obtenidos los resultados anteriores, estos se presentaron a la administradora del HPPS para determinar si tenía preferencia de colocar el humedal artificial en alguno de los sitios disponibles y del tipo de humedal artificial, por ejemplo, subsuperficial horizontal o vertical. Nicolette indicó que la selección específica de la ubicación y del tipo del humedal quedaba en función del criterio técnico desarrollado en este trabajo. Por tanto, se tomó la decisión de ubicar el humedal en la sección disponible que se encuentra al frente del hotel, es decir, la propuesta c (Sección 4.2.1). Este espacio tiene un largo de 17,2 m y un ancho de 5,8 m. La propuesta b) se descartó por ser un área pequeña, y la propuesta a) se descartó debido a que no es deseable reducir el área de parqueo, que limitaría la cantidad de vehículos para estacionar seguramente dentro de las instalaciones del HPPS disponibles para los huéspedes.

Por otro lado, hay que valorar que en el área seleccionada se debe colocar el tanque de captación del efluente del HA, algunas tuberías, válvulas de cierre y espacio para el buen mantenimiento del sistema. Analizando las limitaciones del espacio y valorando la posibilidad de reducir el área superficial del sistema, se tomó la decisión conjunta de ajustar las áreas mostradas en la Tabla 17, disminuyéndolas lo más posible de modo que el TRH se mantenga mayor o igual a un día. En la Tabla 18 se muestran las dimensiones ajustadas y el nuevo TRH para cada tipo de humedal.

Tabla 18. Dimensiones finales del HASV y HASH que se analizarán para la construcción, reduciendo el TRH a un día.

Tipo de humedal	H100	V100
Área superficial final (m ²)	33,25	26,25
Ancho final (m)	3,5	2,5
Largo final (m)	9,5	10,5
Profundidad (m)	0,6	0,8
TRH final(d)	1,1	1,1

Una vez que se acordaron las dimensiones de las propuestas del HA, se procedió a escoger el flujo del humedal artificial subsuperficial, ya sea horizontal o vertical. Con base en el análisis comparativo presentado en la sección 2.2.1, se demuestra que ambos sistemas presentan aspectos positivos y negativos para tener en cuenta. Al ser un humedal artificial que tratará aguas residuales ordinarias, se espera que la remoción de contaminantes sea eficiente en ambos sistemas, por lo que en este sentido se podrían utilizar cualquiera de los dos tipos. Se indicó anteriormente que el humedal se va a ubicar en un área al frente del hotel, aproximadamente a seis metros de las habitaciones con número 5, 6, 7, 8, 9. Es importante resaltar que cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales debe ser ubicado en un sitio seguro y que afecte de la menor manera posible a las personas. Por el tema de control de olores, es necesario que el pretratamiento se realice de forma minuciosa y eficiente para evitar inconvenientes. Por otro lado, también se deben analizar aspectos constructivos y se deben valorar la ubicación de las tuberías antes y después del HA.

Se toma la decisión que el sistema a construir en el hotel sea un humedal artificial subsuperficial de flujo subsuperficial horizontal (HASH). Dos razones fueron consideradas para seleccionar el HASH. La primera razón es minimizar el contacto visual del agua residual que entra al humedal. En el caso de un HASV, el agua residual ingresa por una tubería expuesta a la superficie, que permite ver el agua residual entrando al humedal, generalmente se produce un efecto cascada o de lluvia para que el agua se mueva de forma vertical, lo cual puede implicar un riesgo para la salud, ya que las personas o animales podrían acercarse y tener contacto con el agua residual [31]. En el caso de un HASH, la entrada del agua residual ocurre por debajo de la superficie, es decir no hay una exposición visual del agua residual entrando al humedal. La segunda razón, responde a un aspecto constructivo. En el caso de un HASV, la tubería de salida se encuentra en la parte inferior del humedal, aproximadamente a 80 cm de profundidad. Esto representa un mayor movimiento de tierra que excavar, para colocar el tanque que capta

las aguas tratadas por debajo de la salida del efluente del HASV. En el caso de un HASH, el movimiento de tierra para colocar el tanque que capta las aguas tratadas es menor, debido a que la tubería de salida proveniente del HASH está a una altura superficial.

Por tanto, el sistema de HA que se escoge es el subsuperficial de flujo horizontal, determinado bajo las condiciones de caudal de diseño de $6 \text{ m}^3/\text{d}$ y $0,6 \text{ m}$ de profundidad. Las dimensiones son $3,5 \text{ m}$ de ancho, $9,5 \text{ m}$ de largo y $0,6 \text{ m}$ de profundidad para un área superficial de $33,25 \text{ m}^2$. En la Figura 20 se muestra una vista de planta del HPPS y la ubicación del HA seleccionado en color celeste.

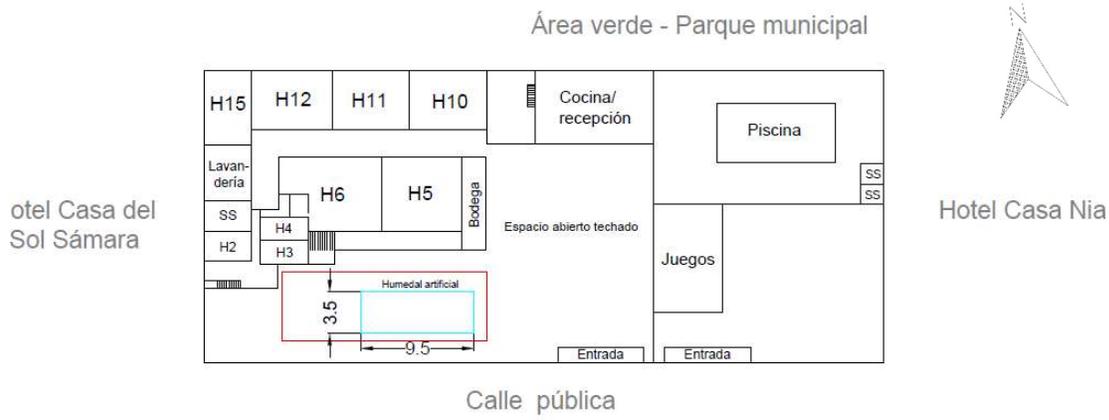


Figura 20. Ubicación del humedal artificial a construir ubicado en el espacio disponible al frente del HPPS.

4.2.6 Dimensionamiento del tanque de captación y almacenamiento de agua para reúso

El tanque de captación y de almacenamiento están ubicados después del humedal artificial, se encargarán de recibir el agua tratada y almacenarla para distribuirla a los servicios sanitarios. Se recomienda que este sistema se implemente en una primera fase para las habitaciones cercanas al HA (habitaciones de la #1 a la #6). Por lo tanto, los criterios de diseño son los siguientes:

- Abastecerá el consumo de agua potable de 6 habitaciones. (17 huéspedes a capacidad máxima).
- Se almacenará la cantidad de agua que abastezca las habitaciones por 24 horas (un día).
- El uso del servicio sanitario se estima en 3 veces por persona por día.
- Se necesitan 16 L de agua por descarga.

Con los datos anteriores y utilizando la Ecuación 11, se tiene que se necesita que el tanque de almacenamiento tenga una capacidad de por lo menos 4896 L (4,8 m³) (Tabla 19). Por lo tanto, se decide la construcción del tanque de captación en material de concreto de forma circular con un diámetro de 2,37 m y una altura de 1,53 m. Otra posibilidad buscar en el mercado algún tanque prefabricado de plástico que funcione como tanque de captación y almacenamiento que tenga una capacidad de 5 m³.

Tabla 19. Datos para el cálculo del tanque de almacenamiento para el efluente.

Dato	Cantidad	Unidad
Servicios sanitarios	6	u
Usos del inodoro	3	uso/d/p
Huéspedes	17	p
Litros de agua	16	l/uso
Días de almacenamiento	1	d
Litros necesarios almacenados	4896	l

4.2.7. Plantas por utilizar en el humedal artificial

Las plantas que se recomiendan para la siembra en el humedal artificial se representan en la Figura 21. Se recomiendan: platanilla o bandera (*Canna X generalis*), avecilla (*Heliconia psittacorum*), platanillo (*Heliconia wagneriana*), caña agria (*Costus speciosus*) y papiro (*Cyperus involucratus*). Todas las anteriores pueden encontrarse de manera silvestre en zonas húmedas o se pueden adquirir en un vivero ornamental. Se recomienda tener un semillero en el hotel del tipo de planta que se utilice por si es necesario el reemplazo de las plantas.



Figura 21. Plantas ornamentales que se pueden utilizar en el humedal artificial. Fuente: [49]

En general son plantas tropicales, nativas de América, que prefieren el suelo húmedo y crecen en regiones pantanosas. En excepción del papiro, que alcanza una altura de hasta 1,8 m, toda las demás recomendadas pueden alcanzar una altura mayor a 2 m, en condiciones óptimas [49]. Al sembrarlas en el HA sobre la piedrilla, se recomienda una densidad de 8-9 plantas por m², con una separación entre ellas de 40 cm y un arreglo triangular [44] (Figura 22).

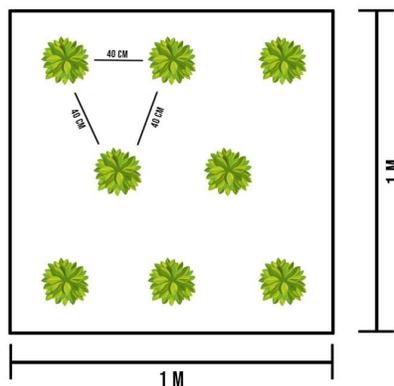


Figura 22. Arreglo recomendado para la siembra de las plantas en el humedal artificial. Fuente: Elaboración propia

4.2.8. Construcción del sistema de tratamiento y planos del diseño

Para la construcción del sistema de tratamiento, se recomienda iniciar la conducción del agua residual a partir de la tubería actual de desagüe, ubicada al lado izquierdo de la recepción, cerca de la habitación 10. A partir de este punto, se establecerá una nueva línea de conducción de las aguas con dirección hacia la zona de parqueo, en donde se ubicará el nuevo tanque séptico, como se indicó en la sección 4.2.3. Posterior al tanque séptico, se conducirá el agua hacia la zona propuesta para colocar el humedal artificial. Se recomienda seguir una disposición similar a la de la Figura 23 y colocar por lo menos una caja de registro en el medio del tanque séptico y el humedal artificial para mantenimiento y control.



Figura 23. Disposición recomendada del sistema de tratamiento de aguas residuales para el HPPS.

El sistema ilustrado anteriormente se puede dividir en 3 etapas para detallar sus aspectos constructivos, las cuales se describirán a continuación:

1. Tanque séptico: Para el tratamiento primario se utilizarán las dimensiones calculadas en la sección 4.2.1. Se debe construir en concreto con un grosor de paredes de 10 cm, con una pendiente de fondo de 1%. Las dimensiones son de 4,5 de largo, 1,5 m de ancho y 1,8 m de profundidad, como se muestra en el plano #3. El tanque séptico contará con

un respiradero de 2 m de alto compuesta por un tubo de PVC sanitario de 2 pulgadas de diámetro. En la parte superior, el tanque contará con dos tapas, una al inicio y otra al final del tanque séptico para revisar el nivel del tanque y tomar muestras de ser necesario. La tubería de salida del tanque séptico debe estar posicionada 0,04 m por debajo a la tubería de entrada, para asegurar que el agua fluya hacia el humedal artificial sin necesidad de bombeo.

2. Humedal artificial: Las medidas y los detalles del HASH se establecen en el plano #4. La pendiente del fondo será de 1%. Se recomienda construir en concreto con un grosor de paredes de 0,9 m para una mayor vida útil y mejor acabado, sin embargo, para abaratar costos, se pueden valorar otros materiales como plástico geotextil o cualquier otro que pueda lograr la impermeabilidad. El HA debe de estar relleno de grava gruesa (piedra gavión de 40-80 mm de diámetro) que se coloca en los extremos donde se ubican las tuberías de entrada y de salida hasta una distancia de 0,8 m hacia el centro del HA, esto impedirá obstrucciones en las tuberías por el sustrato. La grava fina (piedra cuarta de 5-20 mm de diámetro) se coloca en el medio del HA por una distancia de 7,9 m, como se indica en la Figura 24. La conexión para la tubería de ingreso consiste en un arreglo en forma de “T” que permite el que el efluente entre por medio de una tubería horizontal dosificando el flujo a lo ancho del HA. Esta tubería tiene agujeros cada 0,05 m de 0,03 m de ancho. La tubería de salida tiene esta misma configuración, sin embargo, la tubería horizontal se encuentra en el fondo del HA para recolectar el afluente y dirige el agua hasta la salida que se encuentra a 0,6 desde el fondo. Además de las tuberías de entrada y de salida, se recomienda colocar tres tuberías de PCV de 2” de manera vertical desde el fondo del HA hasta la superficie, equidistantes unas de las otras a lo largo del humedal. Lo anterior facilita el mantenimiento y se puede visualizar

el nivel del agua que está dentro del HA. Todas las tuberías deberán estar cubiertas por malla de protección para prevenir obstrucciones.

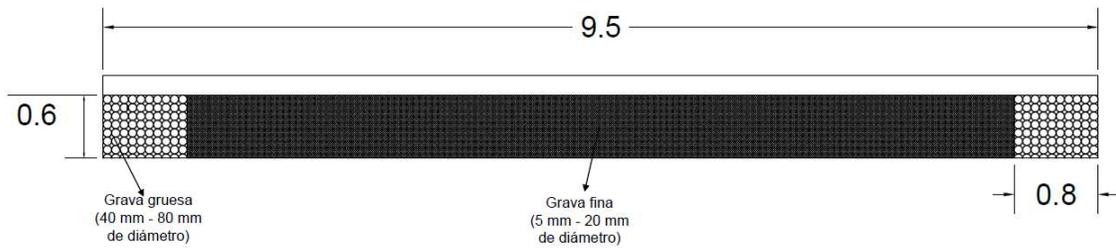


Figura 24. Configuración de grava dentro del humedal artificial.

3. Tanque de captación y almacenamiento de agua para reúso. El tanque de captación (Tanque 1) estará ubicado después del humedal artificial, como se ilustra en la Figura 23. Se recomienda excavar al lado del humedal para que se ubique debajo de la superficie. La tubería de ingreso se coloca al mismo nivel de la tubería de salida del HA, por lo que la conducción del agua tratada al tanque 1 será por gravedad, sin necesidad de bomba. El tanque de almacenamiento será del mismo tamaño del tanque 1 y se colocará sobre una estructura de altura, para luego distribuir esta agua por gravedad a los servicios sanitarios de las habitaciones. El tanque 1 debe de contar con un sistema de bombeo para dirigir el agua al nivel superior. En ambos tanques, se debe colocar una tubería de excedentes a 1,45 m desde la base del tanque que conduzca el excedente a un drenaje en el suelo. Lo anterior evitará desbordamientos del agua residual. Se debe de tomar en cuenta que esta agua además de ser utilizada en los servicios sanitarios, también se puede utilizar para reúso en el riego de jardines, riego para control de polvo en la calle y cualquier otra aplicación en donde no se entre en contacto directo con las personas.

4.2.9 Conexión de la tubería de reúso

Como se mencionó en la sección 4.2.7, se realizará el sistema para reúso para las 6 habitaciones más cercanas del humedal artificial. Se seleccionó como punto crítico el servicio sanitario más lejano al tanque de almacenamiento, el cual es el que está ubicado en la habitación 9. El detalle de la distribución de las tuberías se presenta en la Figura 25.

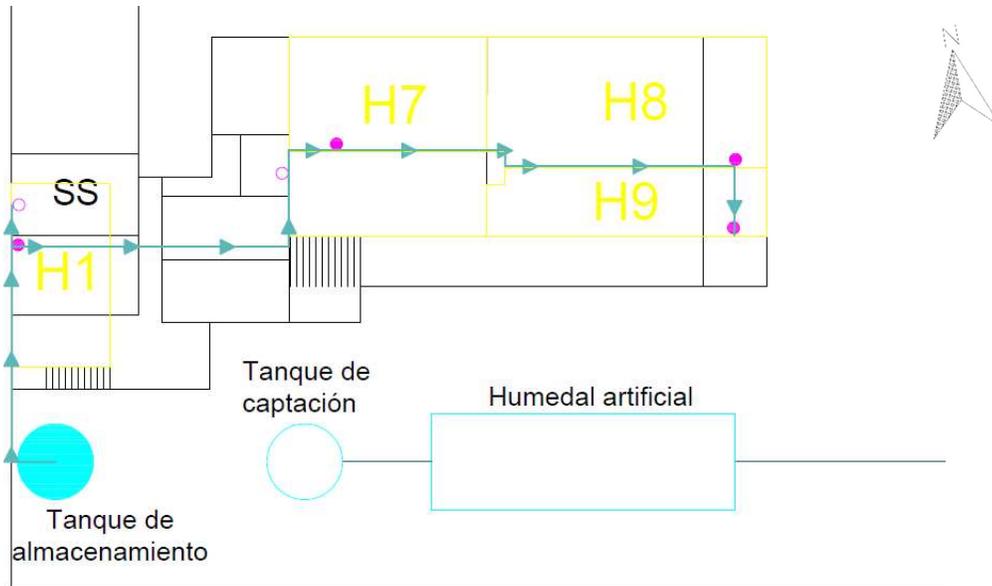


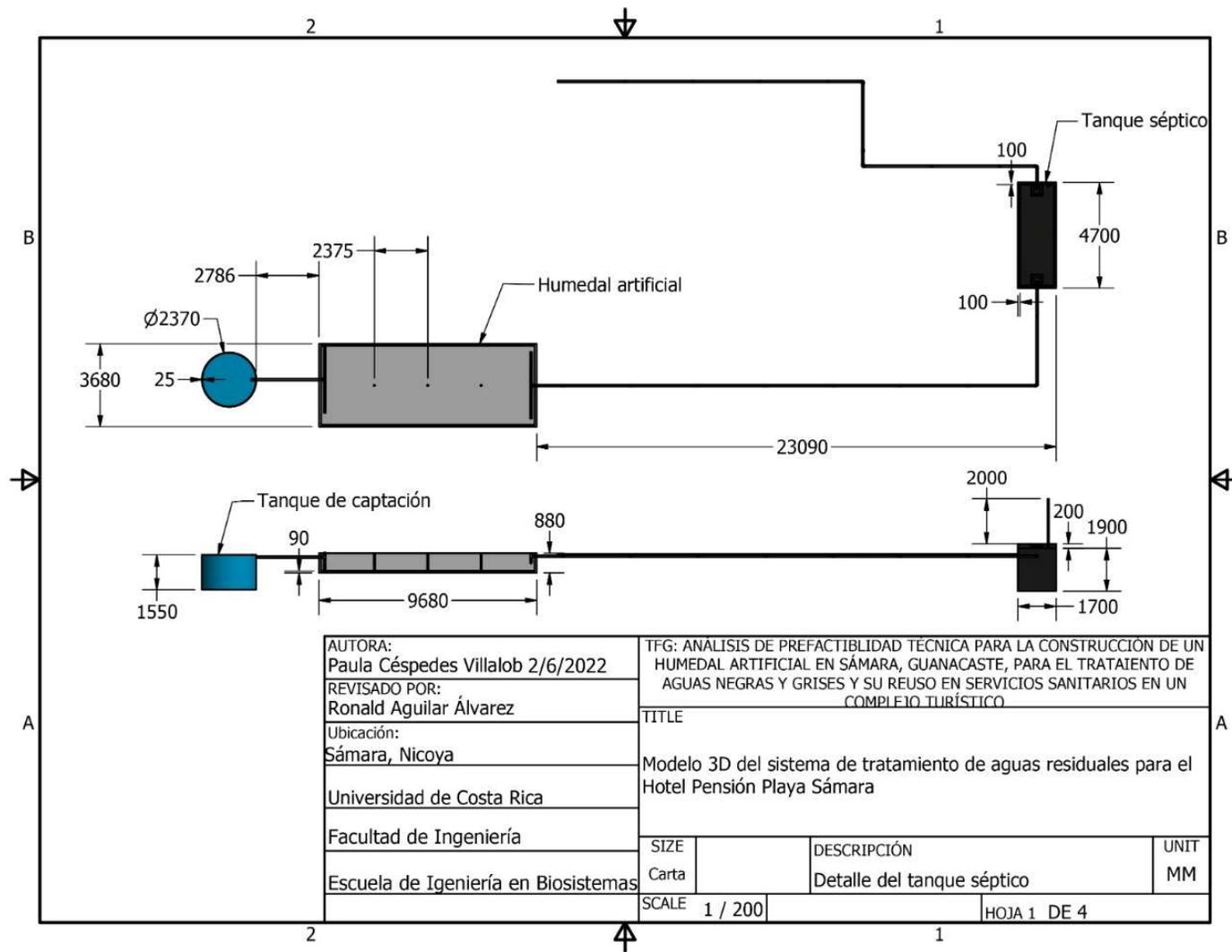
Figura 25. Detalle de la red de distribución de agua para reúso.

En la figura anterior, se observa con mayor detalle el sector donde se implementaría el sistema para reúso en una primera fase. La línea celeste sería la tubería de conducción del agua tratada y las flechas indican la orientación del flujo. La ubicación de los servicios sanitarios está representada con un círculo de color fucsia, donde los que están rellenos de color son los servicios sanitarios ubicados en un segundo piso y los círculos que no están rellenos representan la ubicación de los servicios sanitarios en el primer piso.

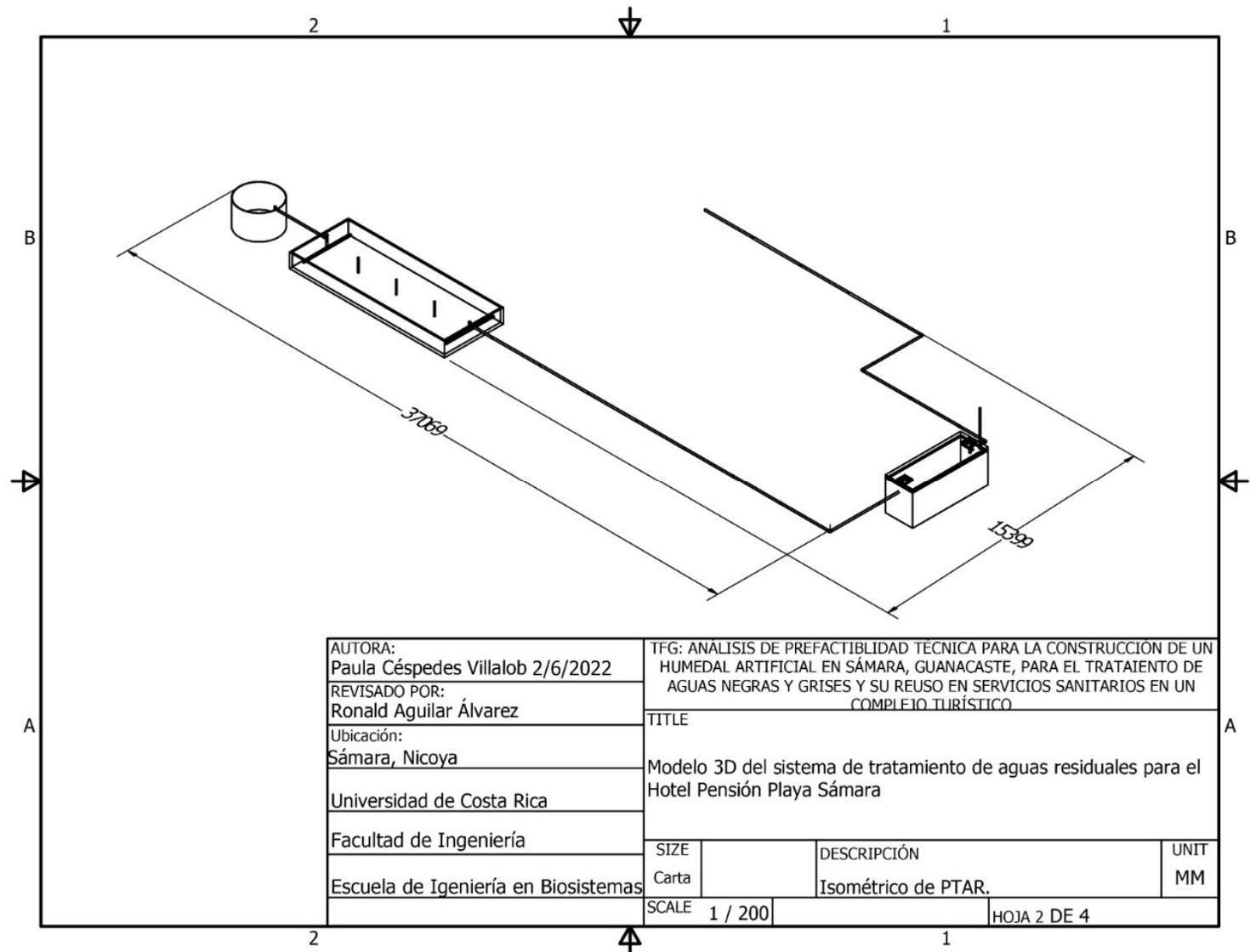
Se calculó la altura mínima a la cual debe estar el tanque de almacenamiento para que se logre una distribución por gravedad. Lo anterior fue obtenido con las ecuaciones 11-16 y el proceso descrito en la sección 3.2.3. El detalle se puede observar en el Anexo 7 en la memoria de cálculo, en la pestaña “conexión tubería de reúso”.

Se obtuvo que, utilizando una red de distribución con tubería PVC de diámetro nominal de 25 mm (1”), las pérdidas de carga por fricción y por accesorios son de 1,1 m. La altura a la que se encuentra el servicio sanitario tomado como crítico es de tres metros debido a que se encuentra en el segundo nivel de la edificación. Realizando el balance de presiones, se tiene que la altura mínima a la que debería de estar este tanque de almacenamiento es a 6,1 m sobre el nivel del suelo de la edificación.

A continuación, se presentan los planos detallados de la construcción del sistema de tratamiento para el HPPS. Las versiones en PDF originales se pueden consultar en el Anexo 6.

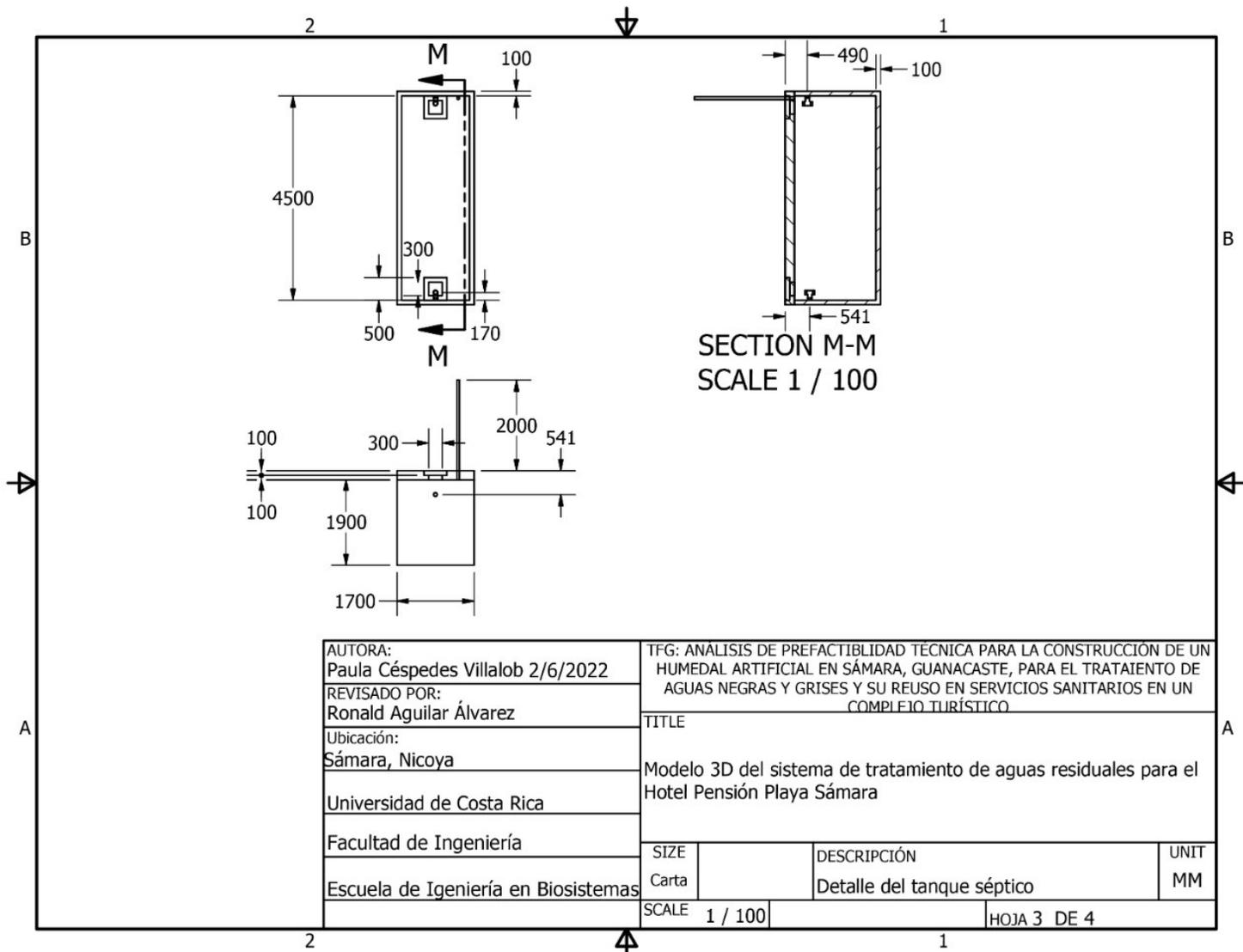


Plano 1. Vista de planta y frontal del sistema de tratamiento para el HPPS, Se incluye el tanque séptico, el humedal artificial y el tanque de almacenamiento #1

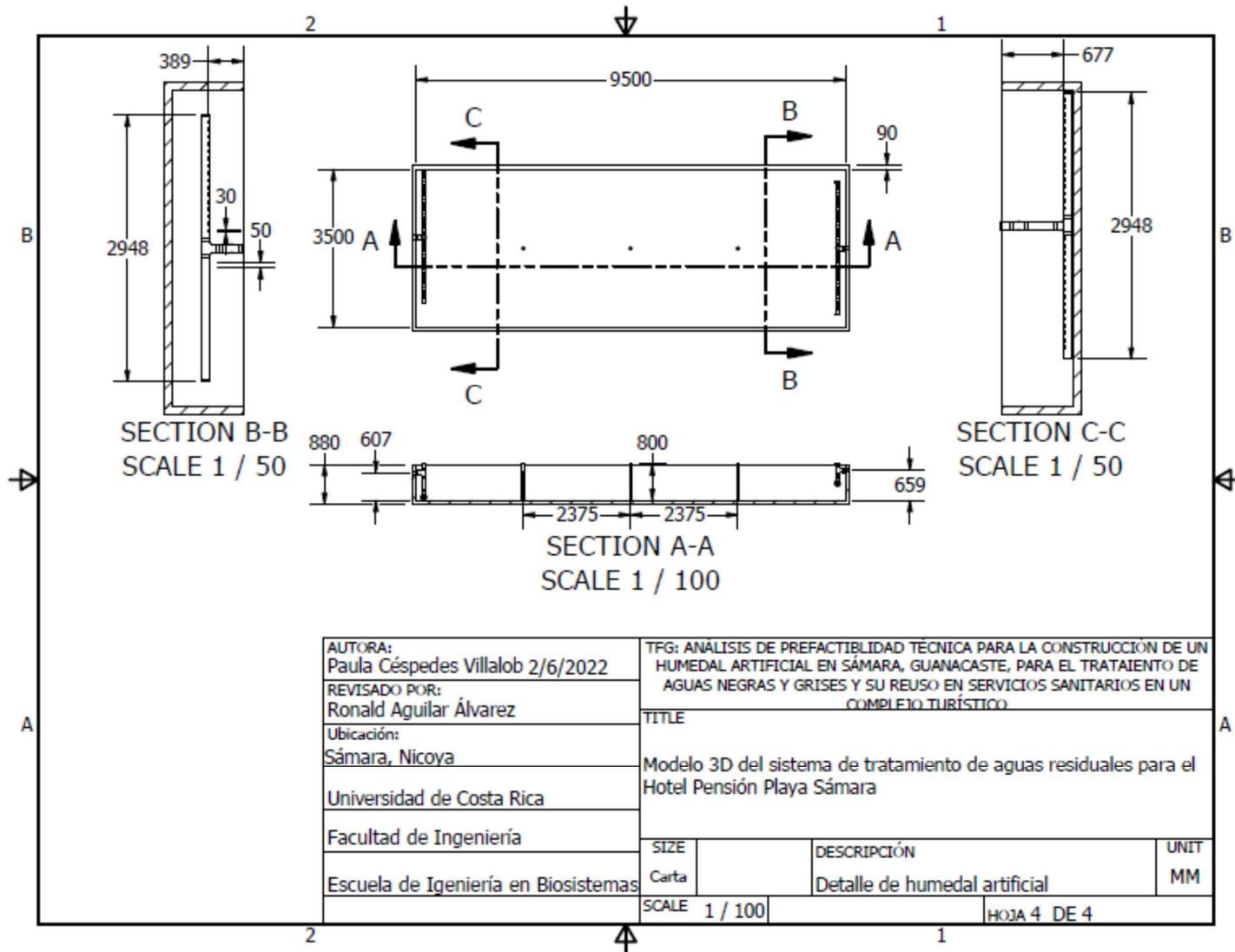


AUTORA: Paula Céspedes Villalob 2/6/2022		TFG: ANALISIS DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL EN SÁMARA, GUANACASTE, PARA EL TRATAIENTO DE AGUAS NEGRAS Y GRISES Y SU REUSO EN SERVICIOS SANITARIOS EN UN COMPLEJO TURÍSTICO	
REVISADO POR: Ronald Aguilar Álvarez		TITLE	
Ubicación: Sámara, Nicoya		Modelo 3D del sistema de tratamiento de aguas residuales para el Hotel Pensión Playa Sámara	
Universidad de Costa Rica		SIZE	
Facultad de Ingeniería		DESCRIPCIÓN	
Escuela de Ingeniería en Biosistemas		Isométrico de PTAR.	
SCALE		1 / 200	UNIT MM
			HOJA 2 DE 4

Plano 2. Isométrico del modelo 3D del sistema de tratamiento de aguas residuales para el HPPS



Plano 3. Detalle del tanque séptico (tratamiento primario) para el HPPS.



Plano 4. Detalle del humedal artificial (tratamiento secundario) para el HPPS.

4.3. Inversión fija del sistema de tratamiento de agua residual para el HPPS

En esta sección se calculó la inversión fija que representa la construcción del HA, incluye el cálculo de materiales, mano de obra, alquiler de maquinaria e imprevistos.

4.3.1 Materiales del sistema de tratamiento.

Con base en los diseños mostrados anteriormente, se estableció una lista de materiales constructivos necesarios para construir el sistema de tratamiento propuesto. La lista de materiales se envió a diferentes ferreterías de la zona para tener una cotización. El único centro ferretero que contestó la solicitud fue El Colono Construcción, ubicado en Nicoya. En la Tabla 20 se detalla el costo de cada material:

Tabla 20. Costo de materiales para la construcción del sistema de tratamiento para el HPPS

Material	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Precio	Proveedor
Tanque séptico					
Tubería sanitaria PVC 2" 3m	1	u	₡ 4 726	₡ 4 726	El Colono Construcción
Tubería sanitaria PVC 3" 3m	9	u	₡ 8 934	₡ 80 403	El Colono Construcción
Concreto	14	sacos	₡ 5 589	₡ 78 243	El Colono Construcción
Arena	1,6	m ³	₡ 14 131	₡ 22 610	El Colono Construcción
Grava	1,1	m ³	₡ 12 804	₡ 14 085	El Colono Construcción
Blocks 12x20x40	329	u	₡ 522	₡ 171 777	El Colono Construcción
Accesorio T 3"	2	u	₡ 4 867	₡ 9 734	El Colono Construcción
Accesorio unión 3"	7	u	₡ 3 023	₡ 21 162	El Colono Construcción
Accesorio codo 90° 3"	3	u	₡ 3 075	₡ 9 226	El Colono Construcción
Humedal Artificial					
Tubería sanitaria PVC 2" 3m	1	u	₡ 4 726	₡ 4 726	El Colono Construcción
Tubería sanitaria PVC 3" 3m	11	u	₡ 8 934	₡ 98 270	El Colono Construcción
Concreto	29	sacos	₡ 5 589	₡ 162 075	El Colono Construcción
Arena	2,7	m ³	₡ 13 131	₡ 35 454	El Colono Construcción
Grava	3,1	m ³	₡ 12 804	₡ 39 693	El Colono Construcción
Blocks 12x20x40	283	u	₡ 522	₡ 147 760	El Colono Construcción
Piedra gavión	3	m ³	₡ 11 940	₡ 35 819	El Colono Construcción

Piedra cuarta	15	m ³	₡ 21 070	₡ 316 044	El Colono Construcción
Maya de protección verde	1	rollo 2 m	₡ 1 750	₡ 1 750	EPA
Accesorio T 3"	4	u	₡ 4 867	₡ 19 469	El Colono Construcción
Accesorio unión 3"	8	u	₡ 3 023	₡ 24 185	El Colono Construcción
Accesorio codo 90° 3"	1	u	₡ 3 075	₡ 3 075	El Colono Construcción
Accesorio tapa PVC 2"	3	u	₡ 687	₡ 2 062	El Colono Construcción
Accesorio tapa PVC 3"	6	u	₡ 696	₡ 4 175	El Colono Construcción
Tanque receptor y desagüe					
Tanque prefabricado plástico 5 m3	1	u	₡ 550 000	₡ 550 000	La casa del tanque
Tubería PVC 3"	1	u	₡ 8 933	₡ 8 933	El Colono Construcción
Accesorio T 3"	1	u	₡ 4 867	₡ 4 867	El Colono Construcción
Tanque de almacenamiento y tubería de reúso**					
Tanque prefabricado plástico 5 m3	1	u	₡ 550 000	₡ 550 000	La casa del tanque
Tubería PCV 1"	8	u	₡ 16 450	₡ 131 600	EPA
Accesorios de tubería	1	u	₡ 13 160	₡ 13 160	EPA
			TOTAL ₡ 2 453 653		

*Estos precios fueron obtenidos el 04/06/2022. Ver Anexo 4 para desglose de factura proforma original

** No se incorporó el costo de la bomba hidráulica para dirigir el agua del tanque de captación al tanque de almacenamiento debido a que se considera que se puede utilizar alguna de las bombas que están en los tanques sépticos actuales.

El costo total de la compra de materiales para construir el sistema de tratamiento es de ₡2 453 653. La inversión total contemplaría el costo de mano de obra y el transporte de materiales al sitio. Clasificando los materiales constructivos en tuberías y accesorios, sustrato del humedal, mezcla para concreto y tanque prefabricado (Figura 26), se observa que se destina un 26% del costo total (₡671 697) a la mezcla para concreto. El sustrato del humedal representa un 14% (₡351 863), mientras que el costo de accesorios y tuberías representa un 17% (₡441 523). Finalmente, la compra de tanques prefabricado representa un 43% del costo

total, ₡1 100 000. Con base en esta información, el rubro de mezcla para concreto puede disminuir de manera considerable si se impermeabiliza el humedal artificial con plástico.

Si se analiza la distribución de costos por operación de tratamiento (Figura 27), se tendría que para la construcción del humedal artificial se destina un 35% (₡894 556) del total de la inversión. Se estima que para la construcción del tanque séptico se requiere un 16% (₡411 966), mientras que para el sistema de captación y almacenamiento se destina un 49% (₡1 258 560).

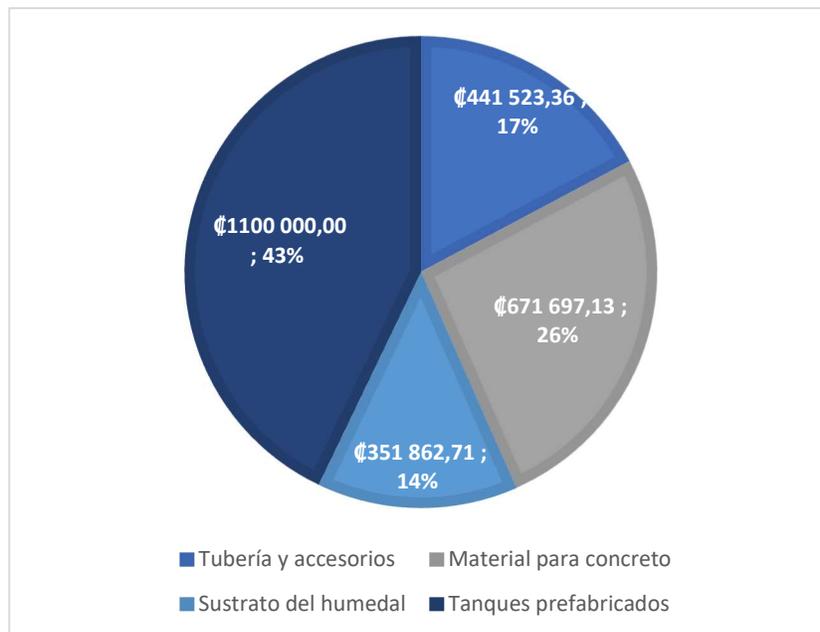


Figura 26. Distribución de costos por tipo de material.

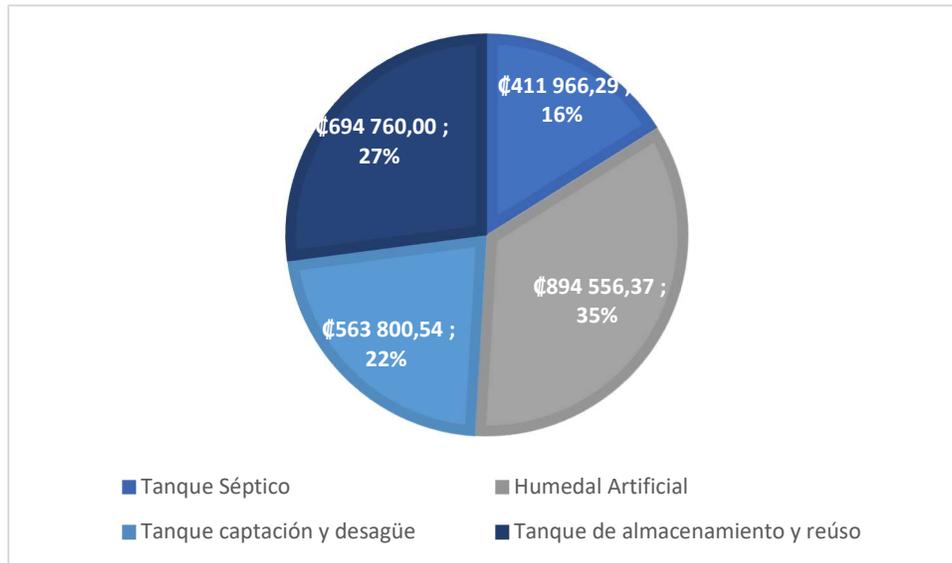


Figura 27. Distribución de costos por operación de tratamiento.

4.3.2 Mano de obra

Para la mano de obra, se considera que se necesita un maestro de obras con su respectivo peón de construcción por siete días. El costo teniendo en cuenta los salarios mínimos por ocupación (segundo semestre 2022) [50] es de ₡177 739.

4.3.3 Alquiler de maquinaria para excavación

Para realizar la excavación en el sitio para colocar el tanque séptico, el humedal artificial y el tanque de captación, se considera que se necesita alquilar una retroexcavadora por una hora, lo cual representa un costo de ₡30 000.

4.3.4 Gastos administrativos e imprevistos

Este costo se estima como un 10% del total de la inversión fija, y corresponde a un valor de ₡160 367, para prevenir imprevistos de materiales y gastos para contingencias varias.

A continuación, en la Tabla 21, se muestra la inversión total del proyecto, que tiene un valor de ₡2 927 531

Tabla 21. Inversión total fija del proyecto del sistema de tratamiento de aguas residuales para el HPPS.

Detalle	Valor
Materiales	₡ 2 453 653
Mano de obra	₡ 177 739
Alquiler de maquinaria	₡ 30 000
Subtotal	₡ 2 661 392
Imprevistos (10%)	₡ 266 139
Total, inversión fija	₡ 2 927 531

4.4 Estimación de beneficio económico por la implementación del sistema de reúso.

En cuanto al beneficio, no se esperan ingresos económicos adicionales por la construcción del sistema de tratamiento. Sin embargo, si se implementa el sistema de reúso, este aportará valor agregado al hotel y en el escenario ideal donde se utilice el reúso de los 2,5 m³ diarios (un 50% de la capacidad de almacenamiento diaria) se podría ahorrar hasta un total de ₡428 000 en la factura del servicio de agua potable.

Por otro lado, se espera que el sistema sea un atractivo para los turistas nacionales e internacionales, que se preocupan por alojarse en sitios donde se tenga un adecuado manejo de residuos sólidos y del recurso hídrico.

4.5. Operación y mantenimiento del humedal artificial. Artículo 29 – Decreto N° 31545-S-MINAE

En esta sección se describirá el proceso de operación del humedal artificial y las condiciones de mantenimiento que se deben seguir para un correcto funcionamiento del sistema. Según el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales

se debe detallar la siguiente información al Ministerio de Salud. A continuación, se detalla cada requerimiento, con respecto al sistema de tratamiento propuesto para el hotel.

- Descripción del Proceso Industrial.
- Procesos de tratamiento.
- Información básica de diseño.
- Personal.
- Equipo.
- Puesta en marcha.
- Operación.
- Control operacional.
- Posibles problemas.
- Mantenimiento.
- Desechos.
- Reportes operacionales.
- Cuadro resumen.

4.5.1. Descripción del Proceso Industrial

El humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal se encarga de depurar efluentes de las aguas servidas de una edificación. Estas aguas son las producidas por las actividades domésticas, como las aguas de la cocina, cuartos de lavandería, servicios sanitarios, duchas, entre otras aguas que son generadas de las labores cotidianas de limpieza. Este humedal artificial funciona como tratamiento secundario de las aguas residuales, siempre y cuando se realice un efectivo tratamiento primario. Este tratamiento primario puede consistir en trampas

de grasa y tanques sépticos con el adecuado dimensionamiento para asegurar la efectividad del tratamiento primario.

El humedal artificial replica las interacciones naturales entre microorganismos y nutrientes, facilitadas por un ambiente construido en el cual se siembran plantas adecuadas al clima que permiten estas interacciones en sus raíces depurando el agua residual que pase por ellas. El área superficial del humedal artificial depende de la cantidad de agua a tratar, concentración del contaminante, porosidad del medio filtrante y la temperatura del agua residual. El diagrama de flujo del sistema se representa en la Figura 28. Esta representación gráfica permite visualizar la secuencia de las operaciones involucradas en el sistema, así como las entradas y las salidas de cada una de ellas.

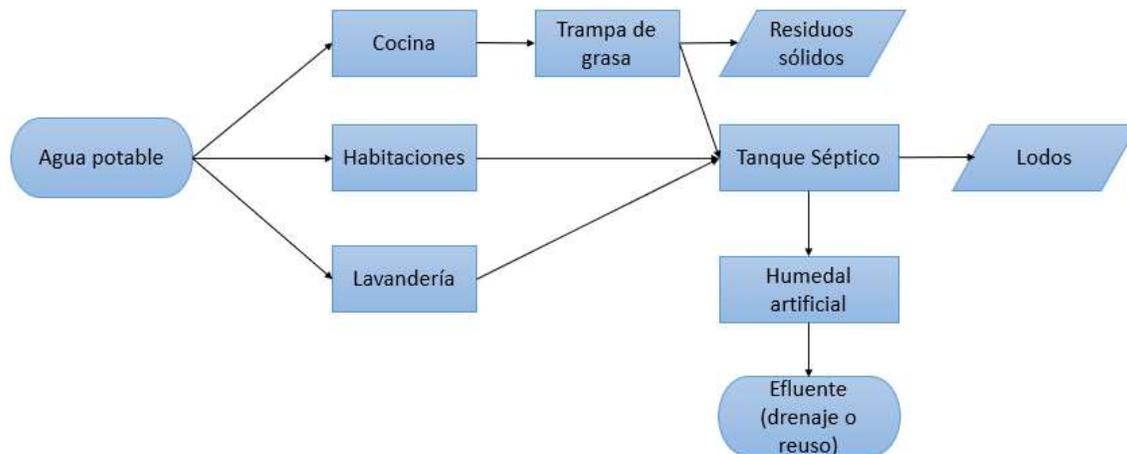


Figura 28. Diagrama de flujo del agua residual en los diferentes procesos del hotel.

4.5.2. Procesos de tratamiento.

El sistema de tratamiento debe tener diferentes fases necesarias para el óptimo funcionamiento. El agua residual debe pasar por estas etapas por gravedad, siguiendo un curso con un desnivel que no permita estancamientos o taponeos dentro de los sistemas o las tuberías. Para el tanque séptico y el humedal artificial, se aconseja que tengan una pendiente

del 1% en el fondo, y también que la tubería de salida se ubique por debajo de la tubería de entrada para asegurar este movimiento por gravedad.

Las aguas residuales pasan por diferentes procesos descritos a continuación:

1. Trampa de grasa: La trampa de grasa se coloca en las salidas de aguas que tengan gran cantidad de sólidos y de residuos como aceites y grasas, por lo que normalmente se ubica en la tubería que recoge el agua de la cocina. La trampa de grasa remueve las grasas del agua, cuando esta pierde velocidad y se logra que se acumulen los grumos en la superficie donde son atrapados por unos paneles o de forma manual para su remoción. Con este proceso se evita el taponamiento de los drenajes y disminuye los requerimientos de limpieza periódica en los tanques sépticos [51]. En el hotel se cuentan con dos trampas de grasa en serie ubicadas en el lado posterior de la cocina.
2. Caja de registro: Se trata de un compartimento pequeño que se utiliza para revisar el estado del agua residual. En este sitio se pueden tomar muestras para determinar la calidad del agua residual en cierto punto; también, si hay presencia de sólidos grandes, se pueden remover manualmente para evitar su curso en el sistema. En la caja de registro se logra reducir la velocidad de las aguas residuales, lo cual es importante para que el agua pueda ingresar al tanque séptico o al humedal artificial, por lo que se recomienda que se ubiquen antes de estos dos procesos.
3. Tanque séptico: Es un tanque cuya función es sedimentar los sólidos de las aguas residuales de la edificación. De igual manera, se logra una separación entre las grasas y los aceites que no pudieron ser removidos en la trampa de grasa colocándose en la superficie donde pueden ser removidos fácilmente [52]. Este tanque debe contar con un tiempo suficiente, llamado TRH para que se logre la sedimentación y la separación

de las fases por medio de la reducción de velocidad. Este tanque debe estar tapado en todo momento y cuenta con una tubería de respiración donde salen los gases que son producto de la biodegradación anaerobia.

4. Humedal artificial: El mayor porcentaje de remoción de carga contaminante se realiza en este proceso. El agua residual ingresa al humedal con una presencia mínima de sólidos, que se han removido en los procesos anteriores. Conforme transcurre el agua en el humedal, se va depurando con ayuda de microorganismos presentes en el medio filtrante y en las raíces de las plantas. Estas plantas deben de mantenerse saludables en todo momento para asegurar una correcta depuración, por lo que el objetivo de su mantenimiento es evitar daños en las plantas ya sea por plagas o por algún animal. En ocasiones se recomienda colocar una cerca pequeña para evitar el ingreso de personas o de animales.
5. Tanque de captación y almacenamiento: El efluente que sale del humedal artificial se recolecta en un tanque de 5 m³. El efluente en este punto contará con los requerimientos dispuestos en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N°22601. Por lo que se utilizará para reúso en servicios sanitarios, riego de jardines, control de polvo; o en su defecto se dirigirá a un desagüe en el suelo sin provocar mayor impacto de contaminación.

4.5.3. Información básica de diseño

A continuación, se muestra la información básica que se debe conocer para el buen funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales:

- Jornada de operación: el sistema trabaja las 24 horas del día, todos los días de la semana, todo el año, a menos que el hotel cierre en algún momento por alguna

disposición externa (como lo ocurrido en el año 2020 con la pandemia por la enfermedad COVID-19).

- Jornada de trabajo: la planta de tratamiento trabajará de forma continua. Una vez que se generen aguas residuales en el hotel, el tratamiento empezará desde ese momento y finalizará una vez que transcurra por el humedal artificial.
- Volúmenes de diseño y capacidad: El tanque séptico tiene un largo de 4 m, ancho 1.5 m y una profundidad de 1,5 m para un volumen de 9 m³. El humedal artificial tiene un largo de 9,5 m, ancho de 3,5 m y una profundidad de 0,6 m. El volumen es de 6,5 m³. Se recomienda ubicar cajas de registro antes y después del humedal artificial con un volumen de 0,079 m³ (0,35 m de ancho, 0,5 m de largo y 0,45 m de profundidad). El tanque de captación y de almacenamiento tienen una capacidad de 5 m³.
- Caudal promedio diario: 4,6 m³/d (0,19 m³/h).
- Caudal máximo horario: 6,4 m³/d (0,27 m³/h).

4.5.4. Personal

Se necesitará de una persona que pueda brindarle mantenimiento al humedal artificial, sin embargo, esta actividad no implica un trabajo de tiempo completo. Por lo que se puede capacitar al personal que ya trabaja en el hotel para el mantenimiento y limpieza del humedal artificial. El nivel de escolaridad requerido será básico.

4.5.5 Equipo

Para el mantenimiento del sistema, será necesario el siguiente equipo:

- Colador: Se requerirá de un colador con malla plástica o metálica para retirar los sólidos en la trampa de grasa o en la caja de registro.

- Bomba hidráulica con manguera: En el caso de querer utilizar el efluente para riego de jardines o control de polvo, será necesario contar con una bomba hidráulica para sacar el agua del tanque de almacenamiento y una manguera para dirigir el agua.
- Cepillo: Se debe de revisar las tuberías de ingreso y de salida del humedal artificial, así como las tuberías de 2 pulgadas que se encuentran dentro del sistema. Si se encuentran muy colmatadas se deberán cepillar.
- Equipo de jardinería básico: Se necesita de tijera podadora, guantes, carretillo, entre otro equipo básico para el mantenimiento de las plantas sembradas en el humedal artificial.
- Hidrolavadora: Se necesitará este equipo especial cuando se requiera realizar limpieza de sustrato (piedra) en el humedal.

4.5.6. Puesta en marcha

Una vez que el sistema esté construido por completo, se puede dejar que el agua transcurra por el sistema, hasta que llegue el primer flujo al tanque de almacenamiento. En este momento, se deben de sembrar las plantas en el humedal artificial para que tengan nutrientes de los cuales alimentarse y que empiecen a depurar el agua residual. Como es un sistema que utiliza procesos naturales, se necesita de un tiempo de adaptación entre las plantas, el sustrato y los nutrientes de aproximadamente 3 meses. Al terminar este tiempo de acondicionamiento, se recomienda realizar una prueba de calidad de aguas para asegurar la efectividad del sistema.

4.5.7. Operación

El sistema opera de manera continua por gravedad. La única bomba necesaria es la que se colocaría en el tanque de almacenamiento, lo anterior para asegurar que el agua se almacene

a una altura donde se permita la distribución para el reúso. De ser necesario, en caso de mantenimiento, se podrá interrumpir el paso del agua por tiempos cortos.

4.5.8. Control operacional

Como se mencionó en la sección 4.4.6 es recomendable realizar una prueba de calidad fisicoquímica evaluando sólidos totales, sólidos suspendidos, pH, DBO y DQO, en el tanque de almacenamiento a los 3 meses de empezar la operación del sistema, comparando con los estándares requeridos en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales. Estas pruebas de calidad se pueden repetir de manera anual para asegurarse del correcto funcionamiento del sistema.

Se puede inspeccionar el humedal artificial de manera visual diariamente en las tuberías de control que están dentro del humedal identificando cualquier anomalía como taqueos, agua en la superficie, material sólido en las tuberías e inspeccionar las plantas sembradas en el sistema retirando las hojas muertas y sembrando nuevas plantas cuando sea necesario.

4.5.9 Posibles problemas

Los posibles problemas que se podrían presentar en el sistema son los siguientes:

- **Obstrucción de tuberías:** Las tuberías pueden obstruirse si una cantidad importante de sólidos se acumula en ellas. Se deberá identificar la ubicación de la obstrucción y realizar la remoción de estos sólidos de manera anual o mecánica.
- **Malos olores:** Se pueden percibir malos olores producto de los procesos en el tanque séptico y en el HA. Esto puede deberse a colmatación en los sistemas o presencia de agua superficial en el humedal artificial, por lo que se recomienda realizar limpieza.

- Taponamiento del humedal artificial: El humedal artificial puede colmatarse debido a una acumulación de sólidos dentro del sistema. Lo que podría ocasionar salida de aguas residuales a la superficie y con ello malos olores. Se debe de revisar el tratamiento primario y verificar que esté funcionando de manera correcta para corregir este problema. También, se deben de remover las piedras en la sección donde esté taponeado y limpiarlas con ayuda de una hidrolavadora.
- Problemas con la vegetación: Se puede presentar dificultades con la vegetación si hay calor o frío excesivo, también puede afectar la presencia de animales o insectos que se coman las hojas y afecten el follaje. En caso de que el daño sea mayor, se deben reemplazar las plantas defectuosas por plantas nuevas.

4.5.10 Mantenimiento

El mantenimiento del sistema es fundamental para el óptimo funcionamiento. Cada proceso tiene aspectos específicos que se deben de tomar en cuenta. A continuación, se describen los aspectos relacionados a cada etapa:

- Trampa de grasa: La trampa de grasa se debe de limpiar 1 o 2 veces a la semana. Se quitan los restos de la comida y la nata de grasa que se forma en la superficie. Se debe observar que el agua transcurra de manera continua sin obstrucciones. En caso de que las paredes de la trampa de grasa estén llenas de sólidos, se deben utilizar cepillos metálicos para limpiarlas.
- Caja de registro: Su mantenimiento es similar a la de trampa de grasa, aunque en él no se espera que se encuentren objetos de tamaño importante, se deben retirar los sólidos que se encuentren en ella para evitar que continúe su curso y obstruya las tuberías. También, se debe de limpiar con cepillo las paredes cuando sea necesario.

- Tanque séptico: Se deben retirar con una red los sólidos que puedan estar en la superficie, una o dos veces a la semana, también se debe retirar la nata de grasa que se podría acumular. Se debe observar el correcto funcionamiento del tanque, cuidar que siempre esté tapado para evitar el ingreso de animales de tamaño importante y caída de objetos del exterior. La principal actividad de mantenimiento será el retiro de los lodos, cada 3 años. Se debe llamar a una empresa de limpieza de tanques sépticos certificada para que llegue al lugar y retire lo lodos que se hayan acumulado en el transcurso del tiempo. Se espera que estos lodos tengan un volumen máximo de 2,5 m³.
- Humedal artificial: Las operaciones de mantenimiento son simples, generalmente son inspecciones rutinarias, pero deben realizarse minuciosamente debido a que de ello depende la efectividad del sistema. Se debe verificar que los tubos de distribución dentro del humedal no estén obstruidos [53][54][55]. Se debe comprobar el correcto reparto de las aguas sobre la superficie filtrante [56][53][55], es decir, que no se presente acumulaciones de agua en la superficie del medio, lo anterior es importante para evitar problemas con mosquitos [54]. Hay que realizar la poda y retiro de las hojas muertas que están en el humedal [56][53], en ocasiones hay que volver a sembrar cuando mueren plantas y mantener la densidad de la vegetación [54]. Un aspecto importante del cuidado de las plantas es evitar utilizar agroquímicos para que las plantas crezcan, lo anterior podría entorpecer las reacciones naturales que se dan dentro del medio [57]. Se debe cuidar que animales no ingresen al humedal artificial a destruir la vegetación [54]. También, es recomendable que se realice la limpieza de todo el medio filtrante (sacar las piedras y limpiarlas con una hidrolavadora, para volver a colocarlas) cada 5 años aproximadamente o cuando se requiera por

problemas de obstrucción del sistema [56][54]. Este material filtrante puede requerir reemplazo entre los 8 y 15 años [31]. Por último, como se trabaja con un sistema que contiene aguas negras, se deben aplicar medidas preventivas de salud cada vez que se vaya a realizar cualquier tarea de mantenimiento. Como utilizar botas y guantes y evitar en lo posible no entrar en contacto con el agua residual [53].

- Tanques de captación y almacenamiento: Deben permanecer tapados para evitar el ingreso de sólidos o animales en el tanque. Este tanque requiere de una limpieza mínima debido a que en él llegará el agua ya depurada, sin sólidos y lista para reusar. Se debe de verificar el estado de las paredes y si se observa presencia de suciedad, se puede limpiar con un cepillo. En este punto se deben tomar muestras de calidad de aguas para asegurar que pueda ser reutilizado en los inodoros. Se deben medir parámetros de coliformes fecales y nemátodos intestinales, tal como se describe en la sección 2.3.

4.5.11. Desechos

Los desechos generados por el sistema pueden manejarse de manera sencilla.

- Trampa de grasa: Los desechos de esta etapa son restos de comida y grasas y aceites. Estos restos pueden colocarse en una bolsa de basura ordinaria y realizar la correcta disposición en un centro de acopio.
- Caja de registro: Se pueden encontrar residuos sólidos. Se consideran basura ordinaria y pueden ser manejados como tal.
- Tanque séptico: El principal desecho de esta fase son los lodos generados por las aguas negras. Estos deben eliminarse apropiadamente por medio de un camión

cisterna que utilice una bomba para su extracción, para luego ser depositados en una planta de tratamiento de lodos.

- Humedal artificial: Puede haber residuos sólidos orgánicos producto del marchitamiento de las hojas de las plantas en el humedal. Pueden utilizarse como abono para otras plantas en la edificación.

4.5.12. Reportes operacionales

De acuerdo con el Reglamento de Vertido y reúso de Aguas Residuales (Decreto N° 22601-MINAE), están exentas, de la entrega de esta obligación, hoteles, campamentos y otros tipos de hospedaje temporal.

4.5.13. Cuadro resumen

Tabla 22. Cuadro resumen con las principales actividades de mantenimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales del HPPS.

Proceso	Actividad	Frecuencia
Trampa de grasa	Limpiar y remover sólidos.	Semanal
Caja de registro	Remover manualmente los sólidos.	Semanal
Tanque séptico	Retirar posibles sólidos flotantes con una red	Semanal
	Retirar los lodos producidos	Cada 3 años
Humedal artificial	Realizar pruebas de calidad fisicoquímicas (ST, SST, pH, DBO, DQO)	Añual
	Inspección básica. Revisión de tuberías, identificación de agua en la superficie, identificación de olores, entre otros	Diario
	Realizar mantenimiento de plantas: poda de hojas marchitas y resiembra	Semanal
	Limpieza de todo el sustrato con hidrolavadora	Cada 5 años
	Reemplazar sustrato	Cada 10 años
Tanque de almacenamiento	Realizar inspección y limpieza	Semanal

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

Bajo la solicitud de la dueña del HPPS, Nicolette Smith, la cual es diseñar un sistema de tratamiento de las aguas residuales, este proyecto concluye que:

El tratamiento de aguas es un tema indispensable que se debe de tener en cuenta al diseñar y planificar la instalación de cualquier edificación. Se debe de disponer de un espacio específico donde de ser posible no interfiera con las actividades humanas que se realizan. Un correcto manejo del recurso hídrico mejora de manera considerable la calidad de vida de las comunidades y es un paso para el desarrollo y cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Con respecto al objetivo específico 1, en el HPPS existen diversos tipos de accesorios donde se genera el agua residual como lavamanos, servicios sanitarios, duchas y pilas distribuidas en 14 habitaciones, una lavandería, recepción y cocina. Se corroboró que el agua residual que se genera es clasificada como ordinaria (aguas grises negras), y la medición del parámetro de DQO arrojó un resultado de 455 mg/L, superando el Límite Máximo Permisible establecido por el Reglamento para la disposición al subsuelo de aguas residuales ordinarias tratadas. Lo anterior indica que es necesario el diseño de un sistema adecuado para disminuir la carga orgánica.

En el sistema existente, se tienen problemas en el drenaje por la saturación que se presenta mayormente en época lluviosa, lo que causa malos olores e incomodidad a los huéspedes. Con respecto a los tanques sépticos, se evidenció que aun sumando los volúmenes de los tres existentes, estos no son suficientes para tratar todo el caudal de agua residual producido en

el HPPS. Además, en dos de estos tanques se utiliza un sistema de bombeo que impide la apropiada sedimentación de los sólidos. Con el nuevo sistema de tratamiento diseñado, se asegura que el tanque séptico tenga las dimensiones y un TRH apropiadas con su respiradero y el humedal artificial es una solución eficiente que permite depurar el agua residual para utilizarla para el reúso en diferentes actividades del hotel.

Con respecto al objetivo específico 2, para el correcto funcionamiento del HA, se necesita un buen tratamiento primario. Para un hotel de 15 habitaciones donde se produce aproximadamente $6 \text{ m}^3/\text{d}$ se determina que se debe construir un tanque séptico con 4,5 m de largo, 1,5 m de ancho y 1,5 m de profundidad, con un volumen total de $10,1 \text{ m}^3$.

El dimensionamiento del HA depende de parámetros como el caudal, la concentración del contaminante, la porosidad del medio filtrante y la temperatura del agua residual. Con los datos recopilados se determinó que es necesario un humedal artificial del tipo subsuperficial horizontal de 9,5 m de largo, 3,5 m de ancho y 60 cm de profundidad. Se propone que el HA se construya en concreto para mayor durabilidad.

Con respecto al objetivo específico 3, Para el sistema de tratamiento propuesto, es necesaria una inversión de $\$2\,927\,531$ en total para realizar la obra, incluyendo materiales, mano de obra, alquiler de maquinaria y un porcentaje para imprevistos. Sin embargo, también se estima que se podría ahorrar hasta $\$428\,000$ anuales en la factura de consumo de agua potable si se reutiliza el agua tratada en los servicios sanitarios, en riego para jardines, control de polvo, entre otros.

El humedal artificial debe ser inspeccionado diariamente y realizarle mantenimiento que se centra en el correcto manejo de las plantas sembradas y en evitar obstrucciones en el sistema.

Si hay un mal mantenimiento del HA, se pueden presentar problemas como malos olores, presencia de mosquitos y desbordamiento de las aguas residuales.

El humedal artificial es una alternativa viable como tratamiento secundario de aguas residuales. Su costo no es elevado y su operación y mantenimiento consiste en tareas sencillas que pueden llevar a cabo el personal de mantenimiento del hotel con una capacitación básica.

RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con el detalle del diseño del mecanismo de instalación del sistema de reúso del efluente para los servicios sanitarios. Lo anterior es importante ya que se debe impedir que la tubería de agua potable se mezcle con la tubería que conduce el efluente y se recomienda la utilización de válvulas electrónicas selectivas para un funcionamiento automatizado.

La educación a los huéspedes y a la comunidad es importante, se deben dar a conocer este tipo de sistemas de tratamiento y concientizar acerca del recurso hídrico. Se podría valorar realizar el diseño de un humedal artificial comunitario y construirlo en el parque municipal ubicado atrás del HPPS. Con ello se podrá visibilizar el buen manejo del recurso hídrico en la comunidad y se podrá alentar a otros grupos de casas, restaurantes u hoteles que implementen este sistema.

Es necesario el seguimiento al sistema una vez construido, se recomienda tomar datos de caudal y de calidad de aguas con una frecuencia de 3 meses, generando un registro que respalde el correcto funcionamiento del sistema, o en su defecto, que permita identificar las mejoras pertinentes. Se recomienda también la instalación de un termómetro y un pluviómetro en el sitio para generar datos meteorológicos base para posteriores mejoras o adecuaciones al sistema de tratamiento en general.

En cuanto a la operación y mantenimiento del sistema de tratamiento, se recomienda:

- Limpiar las trampas de grasa por lo menos dos veces a la semana
- Retirar los lodos sedimentados en el tanque séptico cada tres años.

- Realizar mantenimiento de plantas cada semana. Se debe mantener una densidad de 10 plantas/m².
- Realizar inspección general del sistema de tratamiento mínimo una vez a la semana retirando posibles sólidos visibles.

Se recomienda realizar análisis microbiológicos (coliformes fecales y nemátodos intestinales) en el tanque de captación para reúso por lo menos dos veces al año. Para tipo de reúso doméstico, los coliformes fecales deben de ser menos de 1000 NMP/100 mL y los nemátodos intestinales debe ser de 1 huevo/L (promedio aritmético de muestras). Si el sistema no cumple con estos requerimientos, el agua no podrá reutilizarse y se deberá considerar la incorporación de un sistema de desinfección luego del humedal artificial.

LIMITACIONES

Las principales limitaciones que se tuvieron en el transcurso del desarrollo en el proyecto estuvieron asociadas a la pandemia ocasionada por la enfermedad COVID-19. En principio por el impedimento de realizar las visitas presenciales al sitio de estudio lo que conlleva a la imposibilidad de tomar datos en el sitio. Cuando se pudieron realizar las visitas estas fueron limitadas debido a las restricciones sanitarias del momento.

Otra limitante fue la falta de equipo para tomar las suficientes muestras de DQO, no se logró realizar más repeticiones de los ensayos ya que había que trasladar el equipo hasta el sitio de estudio en transporte público, lo que impidió llevar la cantidad suficiente de reactivos para tomar más pruebas.

En cuanto al análisis económico, este proyecto de investigación contribuirá al desarrollo de la economía circular en los territorios dónde se ejecuten, evidenciando ventajas que justifican los costos relacionados. En este sentido, este análisis no incorpora aspectos como el estudio del impacto social, ni tampoco un análisis de mercado. Dado lo anterior, estos aspectos deben ser considerados como temas centrales en estudios e investigaciones de estudiantes y profesionales garantizando la complementariedad de los análisis para el enriquecimiento de proyectos relacionados con los humedales artificiales en este tipo de edificaciones, teniendo en cuenta que se puede replicar en restaurantes, hoteles, escuelas y otras edificaciones cuyo caudal no sea alto y se manejen aguas residuales ordinarias.

En cuanto a la implementación del HA, se debe considerar que es un sistema que necesita de por lo menos 4 meses de funcionamiento para su adecuación óptima, por lo que los primeros

meses se debe trabajar principalmente en la correcta adecuación de las plantas. En este rango de tiempo, no se podrá reutilizar el agua residual y esta debe dirigirse a un drenaje subterráneo ubicado cerca del HA.

Durante la construcción del sistema de tratamiento, se tendrán afectaciones a los huéspedes por la colocación de tubería nueva y la construcción del tanque séptico y el humedal artificial en distintas partes del HPPS, por esta razón la construcción deberá realizarse en meses de menor visitación. No se espera interrumpir el servicio de agua potable debido a que el nuevo sistema se coloca después del sistema ya existente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MINAE, *Reglamento para la disposición al subsuelo de aguas residuales ordinarias tratadas*. Costa Rica, 2020.
- [2] Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, *Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones*. Costa Rica, 2017.
- [3] ONU, “El derecho humano al agua y al saneamiento”, *Organización Mundial de las Naciones Unidas*, 2014.
https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml
(consultado may 22, 2020).
- [4] AyA, MINAE, y MS, *Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016-2045*, Primera Ed. San José, Costa Rica, 2016.
- [5] S. Oakley y L. Salguero, Eds., *Tratamiento de aguas residuales domésticas en centroamérica*, US Agencyf. San Salvador, 2011.
- [6] INEC, “Encuesta Nacional de Hogares Julio 2016”, San José, Costa Rica, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://inec.cr/sites/default/files/documentos-biblioteca-virtual/enaho-2018.pdf>.
- [7] M. L. María José y T. J. Arturo, “Factores determinantes del grado de aglomeración óptimo de las aguas residuales generadas en pequeñas poblaciones urbanas utilizando criterios de sostenibilidad”, *19th Int. Congr. Proj. Manag. Eng. Granada*, núm. 15-17th July, pp. 1243–1256, 2015, [En línea]. Disponible en: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/662>.
- [8] O. Quirós Chacón, “Sistema de Gestión Ambiental para la Planta de Tratamiento de

- Aguas Residuales (PTAR) Los Tajos basado en la NORMA ISO 14001:2015”, Tecnológico de Costa Rica, 2019.
- [9] Ministerio de la Presidencia, “Presidencia de la República de Costa Rica”, *Planta de tratamiento Los Tajos genera beneficios adicionales al saneamiento*, 2016. <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2016/03/planta-de-tratamiento-los-tajos-genera-beneficios-adicionales-al-saneamiento/>.
- [10] E. Valencia G., I. J. Silva G., y C. P. Narváez R., “Sistemas Descentralizados Integrados y Sostenibles para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas”, *Rev. Ing. y Región*, núm. 7, pp. 395–410, 2010, [En línea]. Disponible en: <https://journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/download/801/1540?inline=1#>.
- [11] Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos- WWAP, *Informe Mundial De Las Naciones Unidas Sobre El Desarrollo De Los Recursos Hídricos: Soluciones Basadas En La Naturaleza Para La Gestión Del Agua*. 2018.
- [12] S. Ozment *et al.*, “Soluciones basadas en la naturaleza en América Latina y el Caribe”, *Banco Interam. Desarro. e Inst. Recur. Mundiales.*, 2021.
- [13] P. Bailón Díaz, “Estudio y dimensionamiento de la instalación de recogida y tratamiento de aguas negras en un buque”, *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2015.
- [14] S. Gálvez, “Estudio de la nitrificación y desnitrificación de las aguas negras generadas en los servicios de los ferrocarriles y posibilidades de tratamiento”, *UPC Barcelona TECH*, 2013.
- [15] M. Romero-Aguilar, A. Colín-Cruz, E. Sánchez-Salinas, y M. L. Ortiz-Hernández,

- “Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica”, *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 25, núm. 3, pp. 157–167, 2009, doi: 10.1353/hpu.2010.0530.
- [16] J. P. Rodríguez-Miranda, E. Gómez, L. Garavito, y F. López, “Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales”, *Tecnol. y Ciencias del Agua*, vol. 1, núm. 1, pp. 59–68, 2010.
- [17] R. Pérez Salazar, C. Alfaro Chinchilla, J. Sasa Marín, y J. Agüero Pérez, “Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales para el tratamiento de aguas residuales”, *Uniciencia*, vol. 27, núm. 1, pp. 332–340, 2013.
- [18] J. Silva, P. Torres, y C. Madera, “Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura . Una revisión Domestic wastewater reuse in agriculture . A review”, *Agron. Colomb.*, vol. 26, núm. 1, pp. 347–359, 2008, [En línea]. Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/13521/14204>.
- [19] W. A. Lozano-Rivas, *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Bogotá, Colombia: Universidad Piloto de Colombia, 2012.
- [20] N. Briceño, *Fundamentos para el Manejo de Aguas Residuales*. San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 2016.
- [21] Metcalf y Eddy, *Ingeniería de aguas residuales. Volumen 1: Tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana de España, 1995.
- [22] CONAGUA, *Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Planats Potabilizadoras de Tecnología Simplificada*. Cotoacán, México: Comisión

Nacional del Agua: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2015.

- [23] UN-HABITAT, *Constructed wetlands manual*, UN-HABITAT. Nepal, Kathmandu, 2008.
- [24] J. Fernández-González, “Capítulo 6. Humedales artificiales para depuración”, en *Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación*, 2009, pp. 79–89.
- [25] M. T. A. Herrera, F. Z. Martínez, J. A. Lara-Borrero, G. Vidal, y E. Acadèmicos, *Humedales de tratamiento: alternativa de tratamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. 2018.
- [26] Ó. J. Chavarría, “Evaluación del desempeño en la remoción de la carga orgánica en aguas grises domésticas en una biojardinera mediante la construcción a nivel de laboratorio”, Universidad de Costa Rica, 2018.
- [27] C. A. Peña y J. Lara, “Tratamiento de Aguas de Escorrentía Mediante Humedales Artificiales: Estado del Arte”, *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 22, núm. 2, pp. 39–61, 2012.
- [28] E. Tilley *et al.*, *Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento*, Tercera Ed. Dübendorf, Suiza: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2011.
- [29] F. G. Ajcholón Tubac, “Propuesta de un proceso combinado de tipo humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS) horizontal con lagunaje anaerobio y de maduración, para el tratamiento de los afluentes de aguas residuales de la cuenca del Río Las Vacas en el área metropolitana”, Universidad San Carlos de Guatemala, 2019.
- [30] V. M. Arteaga-Cortez, A. Quevedo-Nolasco, D. H. Del Valle-Paniagua, M. Castro-

- Popoca, Á. Bravo-Vinaja, y J. A. Ramírez-Zierold, “State of art: A current review of the mechanisms that make the artificial wetlands for the removal of nitrogen and phosphorus”, *Tecnol. y Ciencias del Agua*, vol. 10, núm. 5, pp. 319–342, 2019, doi: 10.24850/j-tyca-2019-05-12.
- [31] E. Tilley, L. Ulrich, C. Lüthi, P. Reymond, y R. Schertenleib, “Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento”, *Inst. Fed. Suizo para la Cienc. y la Tecnol. Acuática*, vol. 2da edicio, p. 178, 2018.
- [32] N. M. Garcia, “Estudio comparativo de la remoción de nutrientes y carga orgánica en aguas residuales domésticas, tratadas en un biofiltro tipo wetland de flujo subsuperficial con dos variedades de macrófitas”, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2019.
- [33] R. H. Kadlec y R. L. Knight, *Treatment Wetlands*. Boca Ratón: CRC Press LLC, 1996.
- [34] F. Zurita, J. De Anda, y M. A. Belmont, “Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands”, *Ecol. Eng.*, vol. 35, núm. 5, pp. 861–869, 2009, doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.026.
- [35] W. Alberto y L. Chafloque, “Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM”, *Rev. del Inst. Investig. la Fac. Ing. Geológica, Minera, Metal. y Geográfica*, vol. 9, núm. 17, pp. 85–96, 2006.
- [36] O. Delgadillo, A. Camacho, M. Andrade, y L. Pérez, *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso de Agua (Centro AGUA), 2010.

- [37] D. F. Aguilera Palenca, “Evaluación y diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas domésticas”, Universidad de los Andes, 2002.
- [38] Ministerio de Ambiente y Energía, *Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Costa Rica, 2003.
- [39] Ministerio de Ambiente y Energía, “Reglamento de Vertido y Aguas Residuales N° 33601-MINAE-S”, *D. Of. La Gac.*, vol. 55, núm. 8, p. 56, 2007.
- [40] Ministerio de Ambiente y Energía, *Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Costa Rica, 2003.
- [41] Instituto Meteorológico de Costa Rica, *Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica*, Comité Reg. San José, Costa Rica, 2008.
- [42] HACH, *Manual de análisis de agua: Procedimientos Fotométricos, de titulación y microbiológicos de HACH Company*, Third Edit. Colorado, ,USA: HACH Company, 2000.
- [43] D. Mara y G. . Sinnatambu, “Rational design of septic tanks in warm climates”, *Public Heal. Eng.*, vol. 225, núm. October, pp. 49–55, 1986.
- [44] ACEPESA, *Manual para la construcción y mantenimiento de biojardineras*, II Edición. San José: Creamdo Jardines para limpiar nuestra agua, 2010.
- [45] R. W. Crites, J. Middlebrooks, y S. C. Reed, *Natural Wastewater Treatment Systems*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2006.
- [46] Ministerio de Ambiente y Energía, *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N°33601*. Costa rICA, 2007.

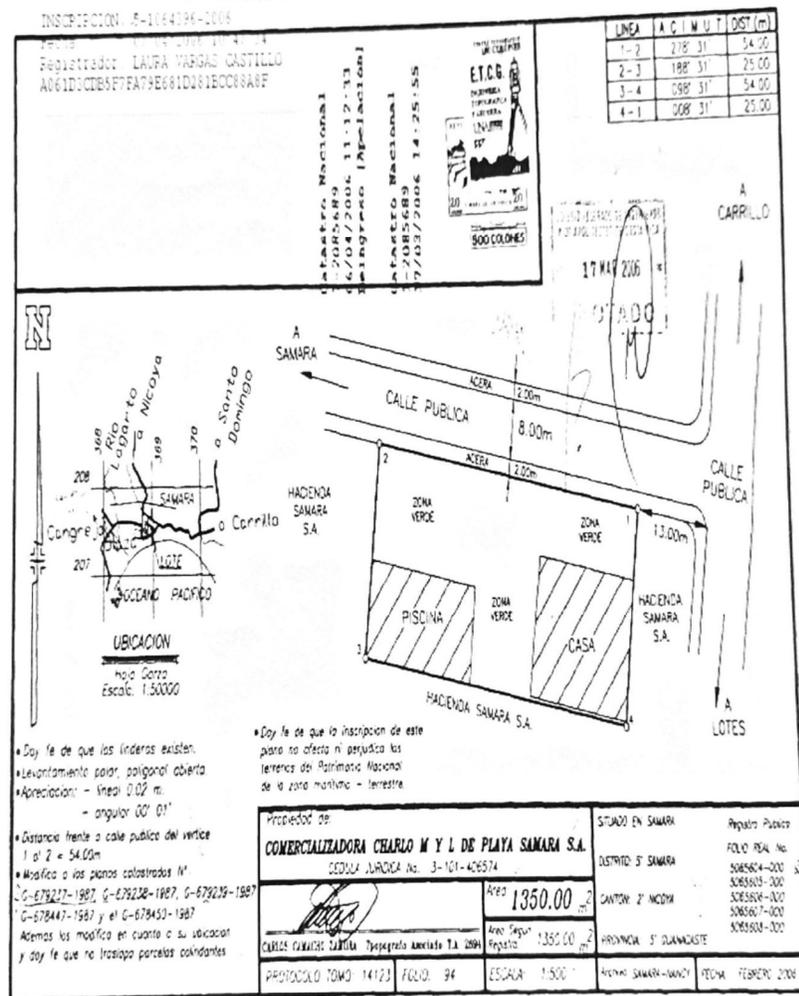
- [47] H. Molina Navarro, “Mejoramiento del proceso de saneamiento de las actividades de carnicería, rosticería, servicios de alimentación, panadería y pastelería de un supermercado con el fin de reducir la incorporación de carga orgánica (expresada como DQO) y de grasas y aceites”, Universidad de Costa Rica, 2018.
- [48] C. Ramos, A. Pellón, D. Villafranca, C. Espinosa, R. Escobedo, y Y. Álvarez, “Tecnología de tratamiento a las aguas residuales de un laboratorio farmacéutico de producción de semisólidos.”, *Rev. CENIC. Ciencias Biológicas*, vol. 36, 2005.
- [49] S. Moncada Corrales, “Evaluación del diseño de una biojardinera de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises en Zapote, San José”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2011.
- [50] Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, “Lista de salarios mínimos del sector privado”, *mtss*, 2022. <https://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/lista-salarios.html> (consultado ago. 05, 2022).
- [51] Durman, “Manual Técnico Trampas para Grasa”, 2013. <https://www.durman.com/descargas/Trampasgrasa/guia/Manualtecnico.pdfOLD.pdf> (consultado may 04, 2022).
- [52] F. Montero, “Saneamiento y disposición de biosólidos provenientes de lodos sépticos residuales”, pp. 1–75, 2018, [En línea]. Disponible en: [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10299/Saneamiento y disposici%C3%B3n_bios%C3%B3lidos_provenientes_lodos_s%C3%A9pticos_residuales.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10299/Saneamiento_y_disposici%C3%B3n_bios%C3%B3lidos_provenientes_lodos_s%C3%A9pticos_residuales.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [53] I. S. Segura Estrada, E. O. Cervantes Gutiérrez, S. Vázquez Villanueva, y J. García

Caspeta, *Operación y mantenimiento básico de un humedal: El caso de San Francisco Uricho en el municipio de Erongarícuaro, Michoacán*, I edición. Michoacán, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2018.

- [54] P. A. Arce Cardona, “Humedales Artificiales: Una Alternativa para Tratamiento de Aguas de Producción”, Fundación Universidad de América, 2018.
- [55] V. M. Arteaga Cortez, “Propuesta metodológica para la construcción de humedales artificiales”, Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, 2018.
- [56] E. Ortega, Y. Ferrer, J. . Sala, C. Aragón, y Á. Real, *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*, I edición. Madrid, España: V.A. Impresores, S.A., 2010.
- [57] J. J. Salas, “Biojardineras: los humedales artificiales ‘ticos’ (y II)”, *iagua*, 2018. <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/biojardineras-humedales-artificiales-ticos-y-ii> (consultado may 04, 2022).

ANEXOS

ANEXO 1. Plano catastrado del Hotel Pensión Playa Sámara



Anotaciones

Código Provincia Número Año Observaciones Estado

No tiene movimientos en Bienes Inmuebles

El Registro Nacional advierte que las anotaciones registrales antes del 25 de mayo del 2011 no están disponibles para ser consultadas por este medio.

La fecha de Inscripción del plano se visualiza a todos los planos que fueron inscritos a partir del 28 de Junio del 2003, antes no se disponía de esa información.

DE ACUERDO AL ARTICULO 71 DEL REGLAMENTO A LA LEY DEL CATASTRO NACIONAL, ESTA CERTIFICACION NO INDICA SI EL PLANO ESTA CADUCO.

ANEXO 2. Reporte de consumo de agua potable del HPPS proporcionado por la ASADA de Sámara

lunes, 23 de noviembre de 2020 2:07:34 p.m.

ASADA SAMARA

Reporte de Consumo Abonado, Mes inicio: 01/2019 Mes Final: 12/2020

Abonado	Nombre	Periodo	L. Anterior	L. Actual	Consumo M3	Estado	Total
Tarifa:	EMPREGO-BOMBEO Y MIXTO-MEDIDA					Medidor:	
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	01 - 2019	27838	28027	189	PAGADA	89.887,00
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	02 - 2019	28027	28193	166	PAGADA	78.962,00
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	03 - 2019	28193	28349	156	PAGADA	74.212,00
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	04 - 2019	28349	28527	178	PAGADA	84.662,00
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	05 - 2019	28527	28565	38	PAGADA	18.508,52
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	06 - 2019	28565	28752	187	PAGADA	90.633,46
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	07 - 2019	28752	28985	233	PAGADA	126.910,87
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	08 - 2019	28985	29234	249	PAGADA	135.186,35
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	09 - 2019	29234	29426	192	PAGADA	104.985,63
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	10 - 2019	29426	29655	229	PAGADA	125.192,36
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	11 - 2019	29655	29655	0	PAGADA	3.817,41
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	12 - 2019	29655	29879	224	PAGADA	122.461,72
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	01 - 2020	29879	30009	130	PAGADA	71.125,71
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	02 - 2020	30009	30132	123	PAGADA	66.041,03
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	03 - 2020	30132	30264	132	PAGADA	72.217,96
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	04 - 2020	30264	30304	40	PAGADA	21.974,20
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	05 - 2020	30304	30337	33	PAGADA	18.151,31
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	06 - 2020	30337	30347	10	PAGADA	7.688,10
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	07 - 2020	30347	30389	42	PAGADA	23.066,46
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	08 - 2020	30389	30413	24	PAGADA	13.604,90
59	3101655752 SOCIEDAD ANONIMA	09 - 2020	30413	30450	37	PAGADA	19.954,49

ASADA SAMARA

Reporte de Consumo Abonado, Mes inicio: 01/2019 Mes Final: 12/2020

59	3101855752 SOCIEDAD ANONIMA	10 - 2020	30450	30472	22	PAGADA	23.203,85
	Cantidad: 22	Totales Lectura:	647730	650364	2634	Monto Total:	1.302.447,33
				Consumo Promedio:	119,73	Monto Promedio:	63.293,06

ANEXO 3. Respuesta del IMN a la solicitud de datos meteorológicos en Nicoya, Guanacaste.



30 de junio del 2021
IMN-DIM-CM-163-2021

Señora
Paula Céspedes Villalobos, Estudiante
Escuela de Ingeniería Agrícola
Universidad de Costa Rica
Presente

Estimada señora:

Le remito la información meteorológica para su trabajo final de graduación "*Análisis de prefactibilidad técnica para la construcción de un humedal artificial en Sámara, Guanacaste, para el tratamiento de aguas negras y grises y su reuso en servicios sanitarios en un complejo turístico*", solicitada vía correo electrónico para el proyecto final de graduación" de las estaciones meteorológicas:

NUMERO	NOMBRE	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	ALTITUD (msnm)	PERIODO
72167	BARCO QUEBRADO, GARZA	9,916111	-85,614444	24	01/01/2016-31/12/2020
72193	ASADA SANTA MARTA DE HOJANCHA	9,929814	-85,430514	102	20/01/2018-31/12/2020

Los datos entregados se dan en formato EXCEL y corresponden a:

- Total, horario Precipitación, en milímetros (mm) donde un milímetro equivale a un litro de agua por metro cuadrado.
- Promedios horarios: Humedad relativa en porcentaje (%) y temperatura en grados Celsius (°C).

El Instituto Meteorológico Nacional no se hace responsable por la manipulación, alteración de los datos o información suministrada, ni los resultados que obtengan una vez procesados por mecanismos ajenos al IMN.

Esperamos haber podido satisfacer su solicitud y a la espera de recibir la respectiva copia de su proyecto, según compromiso adquirido por Usted, esto en formato digital al Departamento de Información, se suscribe de ustedes

Atentamente,

MARIA CRISTINA ARAYA VILLALOBOS
(FIRMA)
Firmado digitalmente por MARIA CRISTINA ARAYA VILLALOBOS (FIRMA)
Fecha: 2021.06.30 13:38:26 -06'00'

María Cristina Araya Villalobos
JEFE, DEPARTAMENTO DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

/KCA



Tel: (506) 2222-5616 / Fax: (506) 2223-1837 Correo electrónico: imn@imn.ac.cr Sitio web: www.imn.ac.cr Apartado postal: 5583-1000 San José, Costa Rica, Calle 17, Avenida 9

ANEXO 4. Datos de cotización de los materiales realizada a la empresa El Colono

Construcción en Nicoya.

Página : 1

0046 ALMACENES EL COLONO S.A (NICOYA)

3-101-082969

FACTURA PROFORMA

Telef.: 2685-4450 Fax:

300 MTS NORTE DEL CRUCE DE NICOYA, CARRETERA A SANTA CRUZ

COTIZA Y COMPRA POR MEDIO DE FACEBOOK O INSTAGRAM COMO COLONO CONSTRUCCIÓN O AL WHATSAPP 60557181

Cliente : 777777 PAULA CESPEDES

Número : 105262

Cuenta : 001 CONTACT CENTER

Plazo : 1 días

Vend. : 0088 KARLA PATRICIA MENDOZA LOPEZ

Fecha : 04/06/2022

Dir. : NICOYA

Cantidad	Codigo	Nombre	Presentacion	Precio Unitario	Precio Linea
21.000	1090041	PVC TUBO SANITARIO 3" 75MM 3MTS P.D	UND	8,933.63	187,606.23 *
2.000	7024221	PVC TUBO SANITARIO 2" 50MM 3MTS S50 P.D	UND	4,725.66	9,451.32 *
464.000	5002577	BLOQUE CONCRE 12X20X40 PEDREGAL	UND	522.12	242,263.68 *
16.000	1000999	CEMENTO GRIS FUERTE 50KG HOLCIM	UND	5,588.79	89,420.64 *
4.000	5002574	AGREGADO ARENA DE RIO	M³	14,131.20	56,524.80 *
4.000	5002570	AGREGADO PIEDRA QUINTILLA	M³	12,804.18	51,216.72 *
11.000	1071268	VARILLA CORRUGADA #3X6MTS "3/8" G40 ASTM A615 AAA	UND	3,095.00	34,045.00
7.000	7122336	PVC TE SANITARIO 3" 75MM S32.5 P.D	UND	4,867.21	34,070.47 *
15.000	7122381	PVC UNION SANITARIO 3" 75MM S41 P.G	UND	3,023.17	45,347.55 *
4.000	7122107	PVC CODO SANITARIO 3" 75MM G90 S32.5	UND	3,075.43	12,301.72 *
3.000	5002599	AGREGADO PIEDRA BOLA/BRUTA	M³	11,839.67	35,519.01 *
15.000	5002571	AGREGADO PIEDRA CUARTA GRIS	M³	21,069.58	316,043.70 *
3.000	7122502	PVC TAPON HEMBRA SANITARIO 2" 50MM P.G	UND	687.23	2,061.69 *
6.000	7112111	PVC TAPON HEMBRA SANITARIO 3" 75MM P.G	UND	695.78	4,174.68 *
1.000	7247929	TANQUE 1100LT C/ACCE TRI ARENA EUREKA	UND	75,610.62	75,610.62 *

Última Línea

Total en letras: un millón trescientos cuarenta y seis mil seiscientos sesenta y siete con 48/100.

Observaciones:

	SubTotal	¢ 1,195,657.83
	Descuento	¢ 0,00
	Impuesto:	¢ 151,009.65
	Transporte	¢ 0,00
Peso Total: 6,135.5830 Kg	Total Documento	¢ 1,346,667.48

Vigencia de la Oferta : 1 días

Realizado por: GREIVIN EDUARDO CASTRILLO FAJARDO

Compre a cuotas con Rapicrédito

Windows\gcastrillo

Por ALMACENES EL COLONO S.A (NICOYA)

ANEXO 5. Datos de ocupación del HPPS desde 01/01/2019 hasta 31/10/2020

En documento .xlsx adjunto

ANEXO 6. Planos originales del sistema de tratamiento

En documentos .pdf adjuntos

ANEXO 7. Memoria de cálculo del diseño del tanque séptico y del humedal artificial

En documento.xlsx adjunto