

**Universidad Nacional
De Costa Rica
Facultad de Tierra y Mar
Escuela de Ciencias Ambientales**

Título

Implementación de un humedal artificial como alternativa de tratamiento de aguas residuales grises, en el distrito de Juan Viñas, cantón de Jiménez, provincia de Cartago, Costa Rica, 2020-2021

Modalidad: Proyecto de graduación

Estudiante: Henry Alfonso Monrroy Miranda

**Campus Omar Dengo
Heredia, Costa Rica
2022**

Trabajo de graduación aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional de Costa Rica, para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

.....

Dr. Pablo Ramírez Granados
Representante Decanato FCTM

.....

M.Sc. Víctor Beita Guerrero
Representante de EDECA

.....

M.S.c Alicia Fonseca Sánchez
Tutor

.....

Ing. Maritza Marín Araya
Lector

.....

Henry Alfonso Monrroy Miranda
Postulante del trabajo

Índice de contenidos

Índice Cuadro.....	vii
Índice de Figuras.....	viii
Dedicatoria.....	ix
Agradecimiento.....	x
Resumen	xi
1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Problema de investigación	3
1.3. Justificación	5
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos	6
2. Marco teórico.....	7
2.1. Aguas residuales	7
2.3. Situación actual de las aguas residuales en Costa Rica	9
2.4. Legislación aplicable en Costa Rica	10
2.5. Sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales	12
2.6. Depuración de aguas residuales con humedales artificiales	13
2.7. Humedal artificial de estudio.....	14
2.7.1. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal	14
2.8. Principales componentes de los humedales artificiales	16
2.9. Remoción de contaminantes de los humedales artificiales.....	17
3. Metodología.....	20
3.1. Enfoque de la investigación	20
3.2. Diseño metodológico	20

3.3.	Alcance de investigación	20
3.4.	Proceso metodológico.....	21
3.4.1.	Fase 1 Caracterización de las aguas residuales grises y condiciones de sitio. 21	
3.4.2.	Fase 2 Diseño de la biojardinera	22
3.4.3.	Fase 3 Construir la biojardinera	24
4.	Resultados y Discusión.....	28
4.1.	Descripción del sitio de estudio	28
4.2.	Caracterización del agua gris	29
4.3.	Condiciones del sitio.....	32
4.4.	Caudal de las aguas domésticas	35
4.5.	Diseño del humedal artificial	35
4.6.	Dimensionamiento	36
4.7.	Dimensionamiento biológico	36
4.8.	Dimensionamiento hidráulico.....	39
4.9.	Elementos principales del diseño de la biojardinera.....	40
4.10.	Construcción del humedal artificial	43
4.11.	Materiales utilizados	47
4.12.	Manual de operación y mantenimiento	50
4.13.	Descripción del Proceso Industrial.....	50
4.14.	Procesos de tratamiento.....	51
4.13.1.	Trampa de grasa	51
4.13.2.	Caja de registro:	52
4.13.3.	Tanque de tratamiento preliminar:	52
4.13.4.	Biojardinera:.....	52
4.13.5.	Tanque receptor:	52

4.13.6. <i>Drenaje:</i>	53
4.14. Información básica de diseño	53
4.14.1. Jornada de operación:.....	53
4.14.2. Jornada de trabajo:	53
4.14.3. Volumen de diseño y capacidad:	53
4.14.4. Caudal promedio diario:.....	53
4.14.5. Personal:.....	53
4.14.6. Equipo:.....	53
4.14.7. Puesta en marcha:.....	54
4.14.8. Operación:.....	54
4.14.9. Control operacional:.....	54
4.14.10. Posibles problemas:.....	54
4.14.10.1. Desbordamiento de agua.....	54
4.14.10.2. Problemas en la vegetación:	54
4.14.11. Mantenimiento:.....	55
4.14.11.1. Trampa de grasas:	55
4.14.11.2. Caja de registro:.....	55
4.14.11.3. Tanques de tratamiento preliminar:	55
4.14.11.4. Biojardinera:	56
4.14.11.5. Tanque recolector del agua residual tratada:	56
4.14.12. Desechos:	56
4.14.13. Reportes operacionales:	56
4.14.14. Divulgación y material de sensibilización.....	57
5. Conclusiones y recomendaciones	58
5.1. Conclusiones.....	58

5.2. Recomendaciones	59
6. Bibliografía.....	60
7. ANEXOS	66
Anexo 1. Ficha de inspección del sitio donde se va a construir la biojardinera ...	66
Anexo 2. Formulario de toma de datos.....	67
Anexo 3. Bitácora de fases constructivas.	67
Anexo 4. Muestra de cálculos.....	68
Anexo 5. Resultados de análisis fisicoquímicos para la muestra de aguas residual gris, entregada el día 10 de septiembre del 2020.....	69
Anexo 6. Resultados de análisis fisicoquímicos para la muestra de aguas residual gris, entregada el día 26 de febrero del 2021.....	70
Anexo 7. Resultados de análisis fisicoquímicos para la muestra de aguas residual gris, entregada el día 14 de abril del 2021.....	71
Anexo 8. Infografía de aguas residuales.....	72
Anexo 9. Infografía de la biojardinera.....	73
Anexo 10. Manual de procedimientos y mantenimiento de la biojardinera	74

Índice Cuadro

Cuadro 1	11
Cuadro 2	23
Cuadro 3	23
Cuadro 4	23
Cuadro 5	29
Cuadro 6	30
Cuadro 7	33
Cuadro 8	48
Cuadro 9	49

Índice de Figuras

Figura 1. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.....	15
Figura 2. Humedal Artificial.....	16
Figura 3. Figura 3. Dimensionamiento de la biojardinera.	25
Figura 4. Dimensionamiento de la biojardinera.....	25
Figura 5. Tratamiento primario.....	26
Figura 6. Recolección de muestra.....	29
Figura 7. Comportamiento de los valores de materia orgánica DQO y DBO en la composición de las aguas residuales grises, en el periodo de muestreo.	31
Figura 8. Medición del área del sitio.	34
Figura 9. Identificación del sitio.	34
Figura 10. Sistema de dos tanques de tratamiento preliminar en serie.	40
Figura 11. Sección de entrada de agua residual a la biojardinera.	41
Figura 12. Tubería interna para distribución de las aguas.	41
Figura 13. Diseño lateral de la biojardinera, etapa inicial (arriba) y etapa final del proceso (abajo).	42
Figura 14. Colocación de relleno en la biojardinera. (a) Piedra bola. (b) Piedra cuarta.	46
Figura 15. (a) Tanque tratamiento preliminar. (b) Tanque recolector de agua tratada.	47
Figura 16. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.	49

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Tiempo de retención hidráulico	37
Ecuación 2 Superficie del humedal.....	38
Ecuación 3 Ancho y Largo.....	39

Dedicatoria

Dedico este proyecto a cada una de las personas que de una u otra manera formaron parte de la realización de este documento, durante años empleados para poder cumplir mis estudios y de la grata formación que ha permitido la realización de todos los logros en mi vida.

En primer lugar, mi familia, quienes son esenciales en mi vida y me han dado a través de todos estos años apoyo y amor incondicional. Mi abuelo y mi novia, parte importante de mi vida, siempre demostrándome su cariño e interés en mi bienestar.

A todos mis amigos y amigas, y especialmente aquellos que fueron parte de la realización del proyecto en Juan Viñas, pues sin su ayuda nada de esto hubiera sido posible.

Agradecimiento

Agradezco a mi lectora de proyecto final, la Ing^a. Maritza Marín, por su ayuda, dedicación y paciencia, gracias a su valiosa experiencia y conocimiento en humedales construidos, que permitió que se llevara a cabo la instalación de la biojardinera.

A la M.Sc. Alicia Fonseca, quien me facilitó el tema de trabajo y cuya ayuda fue esencial en las diferentes etapas del proyecto. Sin su apoyo, la realización de este trabajo no hubiera sido posible.

También las gracias a Rosaura Rodríguez, María Elena Loaiza García y Jorge Arturo Ortiz Campos, por recibirme con los brazos abiertos en el Centro Diurno del Adulto Mayor, siempre dispuestos a prestarme su ayuda en lo que fuera posible.

Finalmente, agradezco a mi lectora, M.Sc. Helga Madrigal, por sus consejos y recomendaciones.

Resumen

Las biojardineras son unidades para el manejo de las aguas residuales, que pueden tratar los vertidos líquidos provenientes desde una hasta varias viviendas. Buscan una recuperación del recurso hídrico y han sido aplicadas en países desarrollados. Actualmente, en Costa Rica se han instalado por su bajo costo constructivo, comparado con la tecnología convencional. Las biojardineras son construidas en un terreno con paredes y pisos impermeabilizados que contienen sustratos (piedra cuarta y bola) y una vegetación acuática adecuada para tratar efluentes residuales.

Por ende, se realizó esta investigación cuyo propósito fue implementar un sistema de tratamiento alternativo de aguas residuales grises mediante la construcción de un humedal artificial, como mecanismo de sensibilización para la protección del recurso hídrico en el Centro Diurno del Adulto Mayor de Juan Viñas, Cartago, con el fin de minimizar la contaminación por las aguas residuales provenientes las actividades industriales, agrícolas, comercios y hogares sin alcantarillado sanitario.

Finalmente, la realización del diseño y la construcción del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HASSFH) del Centro Diurno del Adulto Mayor, para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, servirá como modelo para dar solución al problema planteado en el distrito de Juan Viñas.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Los humedales artificiales conocidos también como biojardineras, son sistemas de tratamiento biológico ampliamente utilizados en países como Alemania y Estados Unidos, pioneros en la investigación y desarrollo de este tipo de tecnología.

De acuerdo con Moncada (2011), los primeros estudios acerca de estos sistemas iniciaron en la década de los cincuenta y fueron desarrollados en los años setenta y ochenta. A partir de los noventa su uso se expandió, y hoy se emplea para el saneamiento de pequeños núcleos urbanos y el tratamiento de aguas residuales de todo tipo, incluyendo escorrentía urbana, drenaje agrícola, lixiviados de vertederos, explotaciones mineras y un buen número de aguas industriales.

En países como España, se han desarrollado múltiples líneas de investigación enfocadas en la evaluación de sistemas existentes con el fin mejorar el diseño y adaptarlo a sus condiciones ambientales.

En Cogua, Cundinamarca, la Universidad Javeriana construyó en 2004 un humedal artificial piloto de flujo subsuperficial. Este manejó un caudal promedio de 1,34 m³/d, un afluente en demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) de 132 mg/L y un efluente de 44 mg/L. El sistema mantiene una celda de 2 m de ancho por 5,8 m de largo, con una profundidad efectiva de 0,6 m, es decir, un área del humedal de 11,6 m², con un tiempo de retención hidráulica de 1,6 días y una carga hidráulica de 0,23 m/d. Con este sistema, se obtuvieron remociones promedio de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) entre el 66 % y 80 % (Gómez y García, 2018, p. 5).

En Centroamérica, Nicaragua comenzó a utilizar esta tecnología en 1996. Inicialmente, construyeron un sistema piloto a escala con el fin de investigar su viabilidad técnica y económica en las regiones tropicales de Centroamérica. Su monitoreo durante cinco años proporcionó una amplia base de datos que ha permitido conocer el comportamiento de estos sistemas bajo condiciones tropicales.

Los porcentajes de remoción obtenidos en este estudio fueron entre 89 % y 95 % para demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), 75 % y 86 % para demanda química de oxígeno (DQO), 21 % y 39 % para nitrógeno total (NT), 6 % y 19 % para fósforo total (PT), 52 % y 73 % para sólidos suspendidos y de 97 % para *Escherichia coli* (E. Coli). Además, en esta experiencia, se determinaron las constantes de reacción de primer orden para DBO₅, DQO, NT, PT y E. Coli (Platzer, Cáceres y Fong, 2002, párr.13).

Con los resultados alentadores obtenidos durante la construcción y operación de esta planta piloto, se estimuló la construcción de otros sistemas de este tipo en Nicaragua y en El Salvador, Honduras y Costa Rica (Platzer et al., 2002, párr.10). Específicamente, en Costa Rica se han puesto en marcha biojardineras en diferentes partes del país. Una de ellas se construyó en el hotel Diuwak y arrojó datos importantes respecto a la remoción de los contaminantes en el sistema de tratamiento de aguas residuales: su capacidad de remoción fue de un total de DBO₅ de un 92 %, DQO 81 %, fosfato-fósforo (PO₄-P) - 66 %, Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) 68 %, amoníaco (NH₃) 74 %, nitrito (NO₂⁻) - 70 %, sólidos totales (ST) 66 %, sólidos suspendidos totales (SST) 75 %, sólidos disueltos (SD) 43 %, y sólidos sedimentables (SSed) 87 % (Mora, 2013, p. 92).

En Heredia, en el Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional, se instaló un humedal artificial, el cual demostró una alta eficiencia en la remoción de carga orgánica de las aguas grises tratadas, al alcanzar porcentajes promedios de 93 % para el caso del DBO₅, y 95 % para el DQO, 73 % para PO₄-P y 95 % para sólidos sedimentables (Alfaro, Pérez y Solano, 2013, p.70).

También, desde el 2004, la Asociación Centroamericana para la Economía, la Salud y el Ambiente (ACEPESA) inició en Costa Rica con la construcción de las biojardineras, primeramente, en sus oficinas. Esta da tratamiento a las aguas del fregadero, el agua residual pasa por tres pretratamientos antes de su ingreso a la biojardinera. Se han realizado evaluaciones de rendimiento, una de estas fue la realizada por Moncada, en los meses de setiembre y octubre, realizando un total de 12 muestreos. Las eficiencias promedio obtenidas fueron de 91 % para DBO₅, 86 % para

DQO, 93 % para Sólidos suspendidos Totales, 100 % para Sólidos Suspendidos, 32 % para fósforo y 50 % para Grasas y Aceites (Moncada, 2011, p. 11).

En la microcuenca Maravilla-Chiz donde se encuentra el distrito de Juan Viñas se presentan problemas de degradación ambiental debido a la falta de saneamiento (Fonseca-Sánchez et al, 2019), además en el sitio de estudio, el Centro Diurno del Adulto Mayor de Juan Viñas todavía no se cuenta con sistemas de tratamiento de aguas residuales grises del tipo humedal artificial.

Por otra parte, esta investigación es relevante para lograr sensibilizar a las personas del distrito con el cuidado sostenible del recurso hídrico. Este tema del problema ambiental impacta significativamente, ya que provoca que las personas tomen acciones para su resguardo.

1.2. Problema de investigación

De acuerdo con Fonseca-Sánchez, Madrigal-Solís, Núñez-Solís, Calderón-Sánchez, Moraga-López y Gómez-Cruz (2019), en las comunidades de Capellades, Juan Viñas y Murcia existe un problema ambiental por la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección de los manantiales por aguas residuales producto de actividades antrópicas en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica.

El Río Maravilla, Quebrada Honda y los mantos acuíferos están siendo contaminados por las aguas residuales que provocan las actividades industriales, agrícolas, comercios y hogares que no cuentan con alcantarillado sanitario. Este último es un problema en la degradación del recurso hídrico que, además, llega a afectar los ecosistemas de los cuerpos receptores aledaños.

Asimismo, este problema de contaminación también repercute a la comunidad de Juan Viñas, pues existe un “riesgo para la salud humana, proveniente del consumo de agua contaminada por parte de las aguas residuales grises, pues puede conducir a serias condiciones patológicas, así como la gastroenteritis (Diarrea, vomito, dolor abdominal, etc.)” (Fonseca et al., 2019, p. 89). Esto afecta a la población con una composición etaria que va desde 1 año a los 87 años, aproximadamente. Esta zona se

basa principalmente en actividades económicas agrícolas y pecuarias (Cruz, Brenes y Granados, 2000, p. 23).

Desde el aspecto político-legal en la comunidad de Juan Viñas el radio fijo de 200 m para la protección de la calidad del agua de los manantiales utilizados para abastecimiento humano podría conllevar a la protección insuficiente de estos terrenos. A pesar de que lo más recomendable es proteger estas áreas, como está estipulado en la Ley de aguas N° 276, la zona no cuenta con controles suficientes por parte de las instituciones encargadas de velar los vertidos que se están realizando en la comunidad. Lo anterior se debe a que dichas actividades no están cumpliendo con los parámetros estipulados en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales Decreto Ejecutivo N° 33601 (Alfaro, 2019, p. 7).

A pesar de la importancia del ordenamiento territorial en la protección de los recursos hídricos, es débil en el cantón de Jiménez, debido a que su Plan Regulador Municipal está en proceso de elaboración. En el cantón de Alvarado, dicho plan regulador fue aprobado hasta 2015. En ambos casos, el desarrollo agropecuario se generó previo a la planificación territorial, lo que se refleja en el desarrollo de actividades humanas potencialmente contaminantes dentro de las zonas de captura y áreas de protección de las fuentes a abastecimiento público. Inclusive, las plantaciones de coníferas no deberían ser consideradas como una cobertura boscosa compatible con los requerimientos de protección, pues en ellos se podrían utilizar agroquímicos (Fonseca-Sánchez et al., 2019, p. 93).

El sitio de estudio se encuentra en una comunidad rural en donde no hay gran inversión para el tratamiento de aguas residuales por parte del gobierno ni de la municipalidad y no están en la capacidad de construir una planta de tratamiento ordinaria para resolver estos problemas de las aguas residuales (Com. pers Alicia Fonseca). Entonces, se planteó la construcción de un sistema de tratamiento como solución alternativa de bajo costo para resolver un problema ambiental específico. Lo anterior, unido a un proceso de sensibilización y educación hacia la comunidad, el cual busca que las personas adquieran conciencia y evidencien que esta propuesta puede ser

una posible solución al problema ambiental del sitio (comunicación personal, 27 de abril, 2020).

El proyecto se realizó en el distrito de Juan Viñas, cantón de Jiménez, provincia de Cartago, Costa Rica, en el periodo 2020-2022. El objetivo principal de este proyecto es tratar las aguas residuales grises generadas en el Centro Diurno del Adulto Mayor de Juan Viñas, esto mediante el diseño y construcción de un sistema de tratamiento, que es un humedal artificial.

1.3. Justificación

El tratamiento de las aguas residuales es prioridad por los múltiples beneficios que proporciona en la ecología, salud humana, la industria y el comercio internacional. Entre los beneficios ecológicos se encuentra la reducción en los niveles de contaminación de ríos, lagos y aguas costeras, donde típicamente las aguas residuales son descargadas; la protección de plantas y animales nativos; y la disminución de la posibilidad de invasión por especies animales y vegetales exóticas que tienden a invadir áreas deterioradas y emplazar a las especies nativas (Mata-González, Gutiérrez y Jurado, 2005, p. 9).

Por medio de este trabajo de investigación sobre el tratamiento de aguas residuales, se busca minimizar el impacto de estas aguas, provenientes de las viviendas, en el medioambiente y la salud pública.

Según Marín (2010), el humedal artificial subsuperficial horizontal consiste en un sistema de tratamiento llamado en Costa Rica como biojardinera, cuyo objetivo es la filtración y absorción de los nutrientes provenientes de las aguas residuales a través de diferentes especies de plantas, con el fin de limpiar las aguas y devolverlas más limpias a la naturaleza, o bien, reusarlas en diferentes actividades.

Este proyecto brindó información y se conformó como una experiencia demostrativa para que otras comunidades aledañas, entes gubernamentales y municipalidades conozcan una alternativa viable para mejorar el ambiente.

Finalmente, otro aporte de esta investigación fue proporcionar datos que muestren el comportamiento real de estos sistemas en Costa Rica, con el fin de optimizar la tecnología y adaptarla a las condiciones ambientales costarricenses.

El proyecto contó con el presupuesto y material para la construcción de la biojardinera asumido, en su totalidad, por proyectos Sistemas de Información Académica (SIA) código 0015-17 “Procesos de gestión integrada del recurso hídrico en las subcuencas Chiz- Maravilla y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica”. También, se tuvo la colaboración de estudiantes y profesores de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) y funcionarios de la Municipalidad de Jiménez durante la excavación y construcción de la biojardinera, así como de personas de la comunidad de Juan Viñas que tuvieron la experiencia de la construcción de una biojardinera, lo cual permitió que el proyecto fuese viable.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Implementar un sistema de tratamiento alternativo de aguas residuales grises mediante la construcción de un humedal artificial, como mecanismo de sensibilización para la protección del recurso hídrico.

1.4.2 Objetivos específicos

Caracterizar las aguas residuales grises y las condiciones del sitio mediante el análisis fisicoquímico y verificación en campo para la utilización de los datos como parámetros en el diseño de una biojardinera.

Diseñar una biojardinera para el tratamiento de las aguas residuales grises, con base en los parámetros de la caracterización fisicoquímica y lineamientos técnicos, para su construcción.

Construir el sistema de tratamiento de aguas residuales grises, mediante los parámetros de diseño, para el saneamiento de las aguas jabonosas.

2. Marco teórico

El presente marco teórico pretende ordenar, de manera secuencial, los temas que sustentan esta investigación. Se toman en consideración bibliografías internacionales y nacionales donde se abordan temas sobre biojardineras, directa e indirectamente, de suma relevancia para este estudio.

2.1. Aguas residuales

Según Cueva y Rivadeneira (2013), las aguas residuales son de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicio agrícola, pecuario, doméstico, incluyendo separación y, en general, de cualquier otro uso, que hayan sufrido degradación en su calidad original.

La generación de aguas residuales es una consecuencia inevitable de las actividades humanas, pues estas modifican las características de las aguas de partida, contaminándolas e invalidando su posterior aplicación para otros usos. Esto llega a provocar que haya alteraciones en las características naturales de los cuerpos receptores, como los ríos y mares (Fernández-Alba, Letón, Rosal, Dorado, Villar y Sanz, 2006, p.10).

Dependiendo de su origen, las aguas residuales se pueden clasificar en ordinarias, especiales, pluviales y de escorrentía.

De acuerdo con Cuesta, Sánchez, Crespo y Fernández (2010) las aguas especiales son todas aquellas generadas en los procesos industriales o comerciales, poseen características específicas, conforme al tipo de industria. Dichas aguas normalmente contienen sustancias químicas que no se eliminan por un tratamiento convencional.

Según García y Corzo (2008), las aguas pluviales se generan de las precipitaciones frecuentes, normalmente, se dirigen por medio de un alcantarillado hacia los cuerpos receptores más cercanos, y podrían infiltrarse en el suelo o ser parte de la escorrentía superficial.

2.2. Composición de las aguas residuales

Las aguas residuales contienen gran cantidad de sustancias responsables de la contaminación, como los sólidos en sus diferentes clasificaciones, los gases, los microorganismos, la materia orgánica, los nutrientes, entre otros (Pérez, 2007).

De acuerdo con Pérez (2007), la materia orgánica presente en las aguas contiene grasas, proteínas y carbohidratos, los cuales se evalúan indirectamente en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO_5 (ensayo 5 días a 20 °C) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), pues la descomposición de la materia presente requiere del consumo de oxígeno natural disponible en las aguas y de generar condiciones anóxicas.

Ramalho (2003) menciona que los nutrientes también son considerados contaminantes en las aguas. Entre los más comunes están el nitrógeno, el fósforo y el potasio, estos son esenciales para el crecimiento y el desarrollo de las plantas y las bacterias, que a altas concentraciones generan problemas de crecimiento de vida acuática indeseable y los malos olores producto de la eutrofización.

Por ello, Ramalho (2003) afirma que los sólidos son partículas presentes en el agua que al aglomerarse tienden a formar lodos que dificultan el paso y la oxigenación del agua; y se clasifican según su composición en sólidos inorgánicos y sólidos orgánicos. Los sólidos inorgánicos son precipitados de nitritos, fosfatos, cloruros, carbonatos, sulfuros, sulfatos, entre otros, mientras que los sólidos orgánicos contienen lípidos, proteínas y sus derivados, generalmente provienen de las excretas de los animales y las personas, son biodegradables y de fácil eliminación.

Osorio (2012) menciona que la materia orgánica biodegradable puede dividirse, a su vez, en dos grupos también: rápidamente biodegradable y lentamente biodegradable; ambas pueden presentarse en estado soluble o particulado. A efectos prácticos, se considera toda la materia rápidamente biodegradable como si fuera soluble (Ss) y toda la materia lentamente biodegradable como si fuera particulada (Xs).

Por su parte, la materia orgánica junto con nutrientes puede llegar a disminuir el crecimiento de la microbiota de un sistema, pues existe una carga contaminante en el agua, principalmente de nitrógeno y fósforo, esta contiene sustancias peligrosas que pueden causar daños graves, incluso a las personas, si se utiliza esta agua.

2.3. Situación actual de las aguas residuales en Costa Rica

Según información del Ministerio de Planificación y Política Económica (2010), el saneamiento se refiere a la recolección segura, almacenamiento, tratamiento y disposición de excretas humanas. Considerando que las realidades alrededor del mundo son diferentes, cada país debe establecer sus prioridades de desarrollo en términos de saneamiento.

En el caso de Costa Rica, el reto principal consiste en dar el tratamiento adecuado a las aguas residuales. Desde el punto de vista del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, Costa Rica logró reducir el porcentaje de vivienda sin accesos a servicios sanitarios adecuados de un 24,2 % como base en 1989 a un 11 % en 2007, muchos antes del 2015.

Siguiendo Astorga (2006), Estado de la Nación, Duodécimo Informe sobre el Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, en Costa Rica la alta dependencia de los tanques sépticos genera grandes problemas de contaminación, pues su funcionamiento se ve afectado por factores como el tipo de suelo, clima, volumen de aguas y otros. El país cuenta con zonas de suelos de muy alta porosidad, lo que resulta muy problemático, pues se presentan tasas de infiltración más alta y con ello focos de contaminación de acuíferos utilizados para proveer de agua a la población del país.

Por esto, el principal contaminante en las aguas potables y residuales es la materia fecal, sin embargo, en los últimos años, se ha sabido de un incremento en la contaminación por sustancias químicas, producto del uso excesivo de los plaguicidas y los fertilizantes en actividades agrícolas (Astorga, 2006).

Por ello, la Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales (2016) habla que en la cobertura actual las viviendas del país, (21,43 %) tienen conexión a alcantarillado o cloaca y (76,42 %) están conectadas a tanque séptico. Se debe resaltar que, de estas viviendas con tanque séptico, solo 17,626 (1,6 %) cuentan con tanque séptico con tratamiento (con unidades adicionales). Las restantes viviendas (2,15 %) no tienen servicio sanitario o usan otro sistema, como hueco, pozo negro o letrina.

La Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales (2016) comenta que deben tratarse todas las actividades industriales, comerciales y de servicios que generen aguas residuales, y confiere al Ministerio de Salud la potestad de regular, vigilar y controlar su descarga. Posteriormente, con la entrada en vigor del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales, se encomendó al Ministerio de Salud revisar los reportes operacionales que presentan los entes generadores y emitir anualmente las certificaciones de calidad del agua residual.

El Ministerio de Salud se encarga también de aprobar los permisos para la ubicación de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) y la posterior revisión y aprobación de los planos, de las memorias de cálculo y de los manuales de operación y mantenimiento de los proyectos de los STAR (Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Salud, 2007). Además, se realizan acciones de promoción de la salud y capacitación en cuanto a instalación, uso y mantenimiento de los sistemas.

2.4.Legislación aplicable en Costa Rica

Dentro del marco legal, en Costa Rica el Decreto Ejecutivo 33601-MINAE-S. Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (2007) establece los límites máximos permisibles de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para el vertido y reúso de aguas residuales de las diferentes actividades comerciales, industriales y de servicios existentes en el país.

Por lo tanto, Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Salud (2007) afirma que todo ente generador de aguas residuales deberá darle un tratamiento ajustado a lo dispuesto en este reglamento, y la revisión de los mencionados límites máximos la realiza el Comité Técnico interinstitucional y multidisciplinario creado en este reglamento, con base en los resultados consignados en los reportes operacionales entregados por los diferentes entes generadores. A la fecha han sido introducidas tres modificaciones a estos límites, buscando establecer valores, cada vez más rigurosos y alcanzables, técnico y económico.

En el reglamento se define los límites máximos permisibles de vertido, para los diferentes contaminantes presentes comúnmente en las aguas residuales (Cuadro 1). Los valores varían según el Código Internacional Industrial Unificado (CIU) de la actividad o empresa, pues estas generan aguas de desecho con diferentes características fisicoquímicas.

Cuadro 1.

Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor. Decreto Ejecutivo 33601-MINAE-S. Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales.

Parámetro	Límites Máximos Permisibles
DBO ₅	50 mg/l
DQO	150 mg/l
Temperatura	15°C<T<40°C
pH	5 a 9
Grasas y aceites	30 mg/l
Solidos sedimentables	1 mg/l
Solidos suspendidos	50 mg/l
Sustancias activas al azul de metileno	5 mg/l

Fuente: Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Salud (2007).

El Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Salud (2008), en el Decreto Ejecutivo 34431-MINAE-S. Reglamento del Canon Ambiental por Vertidos, menciona que es un instrumento económico de regulación ambiental, fundamentado en el principio de “quien contamina paga”, el cual establece el cobro de una contraprestación en dinero a quienes usen el servicio ambiental de los cuerpos de agua para el transporte y eliminación de residuos líquidos originados en vertimientos puntuales. Para estos efectos, todas las personas físicas o jurídicas, públicas o privadas, que viertan en cuerpos de agua de dominio público requieren de un permiso de vertido emitido por el MINAE.

2.5.Sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales

Existen diferentes tipos de tratamiento de aguas residuales, clasificados en diferentes etapas: el tratamiento preliminar, el tratamiento primario, el tratamiento secundario y el tratamiento terciario.

En el tratamiento preliminar se da el proceso físico que permite la remoción de los sólidos de gran tamaño, como piedras, ramas, bolsas, entre otros. Esta etapa normalmente se utiliza previo a un sistema de tratamiento para evitar que dichos sólidos lleguen a provocar problemas de mantenimiento, o bien, procurar el buen funcionamiento de las siguientes etapas de la planta de tratamiento.

Según García y Corzo (2008), el tratamiento primario tiene como objetivo reducir la materia en suspensión, es un proceso clave para reducir o mitigar el proceso paulatino de colmatación de los sistemas de humedales y, normalmente, se utilizan fosas sépticas o tanques Imhoff. En algunos lugares también se están utilizando técnicas más avanzadas, como los reactores anaeróbicos de flujo ascendente.

Peñuela y Morató (s.f.) afirman que el tratamiento secundario realiza la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual, mediante un proceso biológico llevado a cabo por microorganismos que utilizan dicha materia orgánica como nutriente. Su objetivo es remover la materia orgánica contaminante, es decir, reducir la demanda de oxígeno en el agua.

El tratamiento terciario es el último proceso que pasa el agua residual para su vertido. En este se llevan a cabo procesos fisicoquímicos como la precipitación de partículas y desinfección con cloro o radiación ultravioleta. Se utiliza generalmente para mejorar la calidad del agua, como lo es en el tratamiento de agua potable o cuando el agua se va a utilizar para riego o alguna actividad similar (Lozano-Rivas, 2012).

Los sistemas no convencionales son aquellos que logran la eliminación de las sustancias contaminantes de las aguas residuales a través de mecanismos y procesos naturales, los cuales no requieren de energía externa ni de aditivos químicos. En estos sistemas un buen número de procesos de descontaminación son ejecutados por sinergia de diferentes comunidades de organismos (García y Corzo, 2008).

Los sistemas naturales respecto a los convencionales no necesitan utilizar ningún tipo de energía eléctrica para descontaminar el agua residual, mientras que los convencionales si lo requieren. Otra ventaja que ha impulsado el uso de estos sistemas es que no requieren mano de obra especializada para las operaciones de mantenimiento. Algunos ejemplos de tecnologías blandas para el tratamiento de aguas residuales son las lagunas, humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial, entre otros.

Los sistemas naturales se clasifican de acuerdo con el sitio donde se realiza el tratamiento, ya sea en el terreno, lechos filtrantes, o en una masa de agua como las lagunas, sistemas con plantas flotantes y humedales.

2.6. Depuración de aguas residuales con humedales artificiales

La tecnología de humedales artificiales está definida como un complejo ecosistema de substratos saturados, vegetación (macrófitas) y agua, cuyo objetivo es la remoción de la mayor cantidad de contaminantes del agua residual a través de mecanismos de depuración que actúan en los humedales.

Quipuzco (2002) menciona la remoción de sólidos suspendidos por sedimentación y filtración; biodegradación de la materia orgánica a partir de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos; eliminación de microorganismos patógenos por sedimentación, filtración, toxicidad por antibióticos producidas por las raíces de las macrófitas, absorción en partículas de arcilla y la acción predatora de otros organismos.

La tecnología de los humedales artificiales permite combinar otros tipos de sistemas de tratamiento con diferentes regímenes de flujo, sistemas de alimentación, plantas y substratos, lo cual hace que se obtengan mayores posibilidades de optimizar el tratamiento (Quipuzco, 2002, p. 53).

Es importante mencionar que, al utilizar este tipo de tecnología como una alternativa de tratamiento, se evita que el agua subterránea, potencialmente utilizada para consumo humano, sea contaminada por altas concentraciones de estos nutrientes.

Según Llagas y Gómez (2006), los humedales proveen sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esta

capacidad de simular un sistema natural con el propósito de tratar las aguas residuales es el mecanismo detrás de las biojardineras. También, logran el tratamiento de las aguas residuales a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacterial.

Los humedales operan casi a velocidades de flujo y caudal constante, y están sujetos a drásticos cambios en la remoción de DBO₅, debido a los cambios en la temperatura del agua, por esta razón, en zonas cálidas estos sistemas de tratamiento tienden a variar su eficiencia durante el año. En zonas cálidas y tropicales, los parámetros climatológicos (clima, radiación solar y evapotranspiración) varían en un rango menor que en zonas templadas. Los efectos de la evapotranspiración no son notorios sobre una base diaria, pero pueden medirse en reducciones en el flujo de salida y un incremento en la concentración de DBO₅ en el curso de una estación (Llagas y Gómez, 2006, p. 86).

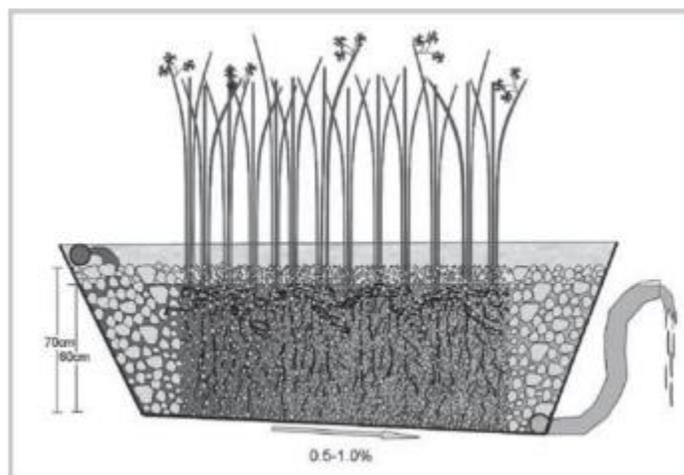
2.7. Humedal artificial de estudio

Los humedales artificiales dependen de las condiciones de uso, el tratamiento previo antes al ingreso del agua (afluente), ubicación del sustrato respecto al acuífero, diferentes componentes usados dentro del proceso y vegetación. A continuación, se desarrollarán las características de un humedal.

2.7.1. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal

El diseño de estos sistemas, por lo general, consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo. En este humedal artificial, el agua ingresa en forma permanente, es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (Delgadillo et al., 2010, p. 10).

Figura 1. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.



Fuente: Delgadillo et al. (2010, p. 10)

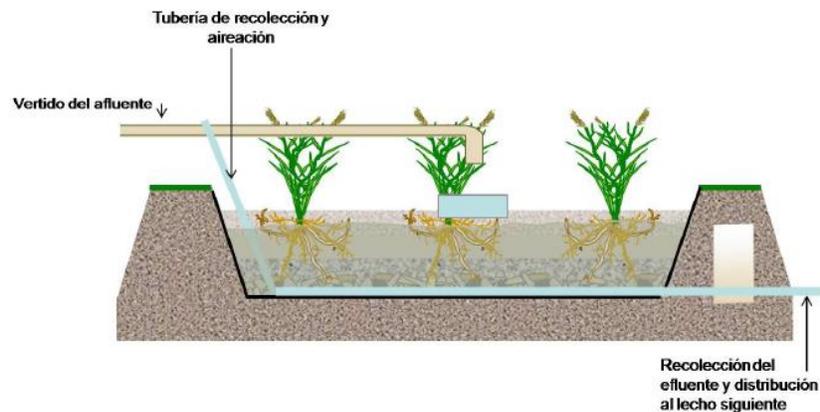
Según Lara (1999), la remoción de materia orgánica sedimentable es muy rápida, debido a la poca velocidad en los sistemas y a la deposición y filtración, donde cerca del 50 % de la DBO_5 aplicada es removida en los primeros metros del humedal. Esta materia orgánica sedimentable es descompuesta aeróbica o anaeróbicamente, dependiendo del oxígeno disponible. El resto de la DBO_5 se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal y se sigue removiendo del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema.

Los humedales artificiales son similares a un humedal natural, sin embargo, es importante conocer que es esencial crear las condiciones para hospedar y generar todas las actividades biológicas para un buen funcionamiento de este sistema artificial; estas actividades, a su vez, crean un proceso de interacción para un buen rendimiento y eficiencia. Lo anterior son alternativas para la reducción de la contaminación generada por las aguas residuales, en ellos se pueden obtener rendimientos en la depuración de aguas residuales domésticas, siempre y cuando el diseño y la operación del humedal se ajusten a las características del agua residual y a las condiciones climáticas del sitio donde se vaya a poner en marcha.

2.8. Principales componentes de los humedales artificiales

En este apartado se dará a conocer los principales componentes de los humedales artificiales, los cuales son muy importantes para realizar el proceso de degradación de materia orgánica.

Figura 2. Humedal Artificial.



Fuente: García y Corzo (2008).

Mena (2014) menciona que el agua residual es fundamental en toda la dinámica del humedal. En esta fase se realiza todas las reacciones fisicoquímicas y junto con los otros componentes sirven como medio de cultivo para la reproducción de organismos, que contribuyen a la depuración del agua residual.

Seguidamente, la vegetación cumple un trabajo fundamental favoreciendo a la oxigenación del sustrato en la rizosfera, a la eliminación de nutrientes por absorción/extracción y al desarrollo de la interacción bacteriana. Una de las características importantes de los humedales es que sus funciones son reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Estas incluyen bacterias, levaduras, hongos y protozoarios, la biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes.

Estos componentes pueden generar condiciones adecuadas para el desarrollo de comunidades de microorganismos que ayudan a degradar la carga orgánica de las aguas

residuales, los cuales aparecen durante la incorporación de nutrientes a través del agua al humedal.

2.9. Remoción de contaminantes de los humedales artificiales

De acuerdo con Estrada (2010), los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), cantidad que los microorganismos, especialmente bacterias, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. Los sólidos suspendidos (SS), que son pequeñas partículas sólidas, permanecen en suspensión en agua como un coloide o debido al movimiento del agua. El nitrógeno es un contaminante, presente en las aguas residuales, que debe ser eliminado por múltiples razones, pues reduce el oxígeno disuelto de las aguas superficiales, es tóxico para el ecosistema acuático y un riesgo para la salud pública, así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos.

La remoción de fósforo es mínima debido a las delimitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo. Los mecanismos básicos de tratamiento son los antes citados, e incluye sedimentación, precipitación química, absorción e interacción biológica con la DBO_5 y el nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación que se descompone y permanece como materia orgánica refractaria, que termina formando turba en el humedal. Los nutrientes y otras sustancias asociadas a esta fracción se consideran que son eliminados permanentemente del sistema (Estrada, 2010, p. 114).

La eficiencia de remoción de nitrógeno se da al momento que ingresa agua residual al humedal construido, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio o en forma de un compuesto inestable. Los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos son la nitrificación y la desnitrificación, que ocurren en diferentes zonas del sustrato (Delgadillo et al., 2010, p. 15).

La nitrificación requiere la presencia de oxígeno disuelto (condiciones aeróbicas), amonio o nitrito como fuente de energía y dióxido de carbono como fuente

de carbono. La oxidación en sí ocurre en dos estadios, cada uno involucra diferentes especies de bacterias nitrificantes quimioautótrofas. La denitrificación es el paso final en la remoción de nitrógeno. Ocurre bajo condiciones anóxicas, esto significa, que no hay oxígeno disuelto presente (o con una concentración $<$ a 2 % de saturación) (Delgadillo et al., 2010, p. 16).

Según Lahora (2005), la eficiencia de remoción de fósforo es la cantidad que entra en el efluente es prácticamente igual que en el afluente, esto en la mayoría de los casos, la cantidad de fósforo asimilado por la vegetación o fijada al sedimento es pequeña en relación con la aportada por el agua residual. Por tanto, los humedales no son un método muy efectivo para la eliminación de fósforo, excepto si se usan grandes áreas con grava rica en hierro y aluminio o tratamientos alternativos de eliminación de fósforo. Es importante mencionar que, en experiencias en otras biojardineras, el fósforo se ha detectado más en la salida que en la entrada.

La eficiencia de remoción de DBO₅ en sistemas de flujo subsuperficial se efectúa rápidamente por procesos de sedimentación y filtración en el medio poroso o sustrato; en sistemas de flujo superficial predominan los procesos de sedimentación y floculación (Mena, 2014, p. 33).

En la eficiencia de remoción de DQO en un humedal artificial tiene un comportamiento muy parecido al de la DBO₅, consiguiéndose valores de remoción en un 90,2 %. En los humedales artificiales, las condiciones ambientales y meteorológicas como temperatura, precipitación, entre otras, pueden afectar la actividad de los microorganismos en un humedal. Además, se da el ingreso de sustancias tóxicas, de uso agropecuario o industrial, por tanto, se debe tener precaución para prevenir alteraciones en la dinámica de las poblaciones que afecten la eficiencia de remoción de contaminante del sistema (Lahora, 2005, p. 110).

Realizar el tratamiento adecuado a las aguas residuales es un tema importante en el mundo, pues se dispone de agua de calidad y en cantidad suficiente, lo cual permitirá un mejor ambiente, salud y calidad de vida, los humedales artificiales son una alternativa de tratamiento que en condiciones recomendables llegan a hacer muy

eficientes en la remoción de contaminantes y a su bajo costo de instalación y mantenimiento.

En los últimos años, los sistemas naturales se han venido utilizando de forma creciente gracias a sus características de construcción y funcionamiento, su bajo costo de inversión suele ser competitivo, comparado a otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales, requieren de poco personal para su mantenimiento, no presentan consumo energético o se reduce al necesario para bombeos de cabecera, es posible la reutilización del agua ya tratada en labores domésticas y de campo que no conlleven el consumo de estas de forma directa o indirecta (riego de cultivos) y no generan grandes cantidades de lodos de forma continuada.

Los humedales artificiales tienen otros beneficios que ayudan la conservación del medioambiente y les brindan un elemento atractivo a las personas, principalmente al momento de decidirse en la instalación de estos tipos de sistemas en sus propiedades, pues los segmentos que los conforman son capaces de embellecer la zona donde se construya, aprovechando los materiales para que combinen con la vegetación del lugar y el sitio de la construcción del hogar.

En vista a la necesidad, la conciencia social se ha sumado a reconocer el valor del agua. Uno de los mejores ejemplos es el uso y la popularidad de los mecanismos de tratamiento de aguas residuales, sistemas que en la experiencia demostrada por otros investigadores son buena opción por las ventajas que estos conllevan, también, la construcción de estos sistemas alternativos se puede llevar a un proceso de sensibilización y replicación para que se mejoren las condiciones ambientales en el saneamiento, reducción de la recarga sobre los sistemas de abastecimiento de agua y salud ambiental en la comunidad. Cabe recalcar que el agua residual ya tratada se podrá reutilizar para regar zonas verdes, parques, lavado de automóviles, inodoros y otros usos con similar acceso, como la dicta el tipo 1 de reuso urbano del Decreto Ejecutivo 33601 Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, con esto se llega a disminuir el consumo de agua potable, que normalmente se utiliza para este tipo de actividades.

3. Metodología

3.1. Enfoque de la investigación

El enfoque del proyecto de graduación es mixto, ya que se divide en enfoque cualitativo, materializado en la recolección de información, mediante literatura y visitas al sitio de estudio, con el fin de realizar una guía para el diseño de una biojardinera. Además, utiliza un enfoque cuantitativo al determinar indicadores biofísicos de las aguas para diseñar la alternativa de tratamiento, construirla y evaluar la remoción de contaminantes de las aguas residuales grises.

3.2. Diseño metodológico

El diseño aplicado a esta investigación es transformativo concurrente (DISTRAC): en este tipo de diseños se recolectan, analizan e interpretan datos cualitativos o cuantitativos en diferentes niveles y variaciones (Hernández, Collado y Batista, 2014, p. 556). En la recolección de la información para la implementación de la biojardinera se analizan, simultáneamente, datos cualitativos y cuantitativos, desde ángulos diferentes, tales como teoría y criterio propio.

3.3. Alcance de investigación

Dicha investigación se realizó con el método descriptivo, el cual consistió en analizar cómo es un fenómeno, sus componentes y manifestaciones. El fenómeno que se analizó en esta investigación es la contaminación del agua por desechos líquidos residuales de uso domiciliario. Los componentes son las características de las aguas, el sitio y el sistema de tratamiento. Finalmente, las manifestaciones son los datos de los análisis de laboratorio iniciales implementados en el diseño y la construcción de la biojardinera.

3.4. Proceso metodológico

3.4.1. Fase 1 Caracterización de las aguas residuales grises y condiciones de sitio.

En el desarrollo de las tres fases, se utilizaron fuentes de información primaria y secundaria. Se utilizó fuentes secundarias de información como libros, artículos de revistas, tesis y manuales para indagar sobre diferentes aspectos como sistemas de tratamiento, parámetros de diseño, entre otros.

Además, se tomó en consideración fuentes primarias de información como sujetos, en este caso, las personas que aportaron información a través de entrevistas, y objetos como el agua y el sitio que proveen información de sus características mediante observación y mediciones para el diseño del sistema de tratamiento. Para la selección de los sujetos informantes no se realizó un muestreo, y el muestreo del agua residual gris para la caracterización se dirigió puntual al sitio donde se va a realizar la construcción de la biojardinera,

La información primaria que provino de la evaluación del agua y el sitio se considera un muestreo no probabilístico, por conveniencia, basado en criterios técnicos como facilidad de acceso, disponibilidad de las personas de formar parte de la muestra, en un intervalo de tiempo dado. La biojardinera se pretendió instalar en un sitio representativo del distrito Juan Viñas, como el Centro Diurno de Adulto Mayor.

Las variables contempladas para la recolección de información en esta fase fueron: a) la calidad del agua con indicadores como pH, temperatura, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, b) sustancias activas al azul de metileno y grasas y aceites; c) las condiciones del sitio con indicadores como ubicación de la biojardinera con respecto al vertedero de la casa, pendiente del terreno, textura del suelo, área del sitio, movimiento de agua en el suelo (drenajes), vegetación e infraestructura preexistente y, d) el caudal de las aguas domésticas grises con indicadores como número de personas del centro diurno y consumo de agua por mes (m^3).

Con estas variables se realizó la revisión de literatura, instrumentos cualitativos, mediciones en campo y análisis fisicoquímicos en el laboratorio. Los

instrumentos se pueden consultar en anexos 1 y 2: ficha de inspección del sitio de construcción de la biojardinera y formulario de toma de datos.

Con esta información, se identificaron los parámetros operativos apropiados para tratar la carga contaminante del afluente. Además, estos datos se tomaron en cuenta para realizar el diseño a través de cálculos hidráulicos y parámetros de funcionamiento del sistema de humedal artificial. Se realizó un muestreo puntual, para la recolección de cada submuestra de agua residual gris, durante las actividades de mayor aumento de caudal (desayuno o almuerzo).

Entre las consideraciones a tomar, están que los recipientes para las submuestras deben estar limpios y secos, luego realizarle un triple lavado, seguidamente, se procede a agregar la muestra al recipiente y a rotularlo; una vez tomadas las muestras, se conservan a una temperatura menor a los 4 °C y se trasladan al laboratorio para efectuar los análisis respectivos.

3.4.2. Fase 2 Diseño de la biojardinera

En esta fase, las dimensiones espacio temporales con indicadores como tiempos de retención hidráulica, superficie del humedal, ancho, largo, área y profundidad son las variables fundamentales para la recolección de información.

Para efectuar los cálculos hidráulicos, se utilizaron los modelos matemáticos recomendados por García y Corzo (2008) y para el diseño se tienen resultados de la caracterización del agua residual gris y del sitio, además de la información primaria obtenida en campo.

A continuación, en los cuadros 2, 3 y 4 se muestran los modelos matemáticos para el diseño de humedales artificiales, sus componentes y sistemas complementarios.

Cuadro 2

Tiempo de retención hidráulico.

Modelo Matemático	Componentes del modelo
$t = \frac{V}{Q} = \frac{\varepsilon * S * h}{Q}$	V: volumen del humedal, m ³ Q: caudal medio, m ³ /día ε: porosidad, adimensional S: superficie del humedal, m ² h: profundidad media del humedal, m

Fuente: García y Corzo (2008).

Cuadro 3

Superficie del humedal.

Modelo Matemático	Componentes del modelo
$S = \frac{Q}{k_A} \ln \left[\frac{C_0}{C_1} \right]$	S: superficie del humedal, m ² Q: caudal medio, m ³ /día K _A : constante cinética de primer orden, m/d C ₀ : concentración inicial, mg/l C ₁ : límite de vertido

Fuente: García y Corzo (2008).

Cuadro 4

Ancho y largo.

Modelo Matemático	Componentes del modelo
$W = \frac{Q}{(K_F I h)}$	W: ancho, m Q: caudal medio, m ³ /día K _F : Conductividad hidráulica I: Pendiente (%) h: profundidad media del humedal, m
$L = \frac{Q}{(W C_H)}$	L: longitud del humedal, m Q: caudal medio, m ³ /día W: ancho, m C _H : Carga hidráulica

Fuente: García y Corzo (2008).

Las variables anteriores se realizaron aplicando los modelos matemáticos, los cuales se obtienen de la revisión de literatura, instrumentos cualitativos aplicados a sujetos de investigación y mediciones en campo. Además, se toma en cuenta los

resultados obtenidos para realizar una representación gráfica de las dimensiones del sistema, esto mediante un *software* llamado AutoCAD.

3.4.3. Fase 3 Construir la biojardinera

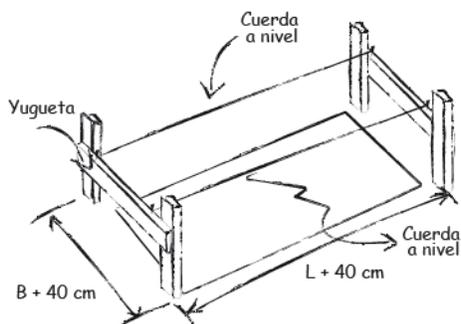
Para llevar a cabo esta fase, se mantuvo comunicación con personas con experiencia en la instalación de biojardineras como lo es la Asociación centroamericana para la economía, la salud y el ambiente (ACEPESA) y también por medio de visitas de campo para la recolección de información.

Las variables contempladas para realizar la construcción de la biojardinera en esta fase son: primero los materiales de construcción con indicadores como tanques plásticos, tuberías de PVC, uniones de PVC, piedra bola, plástico para impermeabilizar, tapones de PVC, cemento, válvulas o llaves de paso, piedra cuarta y codos PVC. Seguidamente, la operación y monitoreo con indicadores como bitácora de etapas y actividades a realizar; luego el manual de mantenimiento de la biojardinera con indicadores como limpieza del tratamiento preliminar, cajas de registros, trampas de grasas y tanque de recolección de agua tratada.

Las variables antes mencionadas son las que se utilizaron para realizar las fases de construcción, operación y seguimiento y la parte de mantenimiento de esta y como instrumento se utilizó una libreta de campo, en la cual se pretende evidenciar las etapas de instalación de la biojardinera.

En la parte constructiva del humedal se debe verificar que en el terreno donde se construyó no existieran tuberías de agua potable, drenajes viejos, tanques sépticos u otros. Una vez que se tiene la longitud, ancho y la profundidad de la biojardinera, se procede a estimar los niveles, y para esto se colocan al menos 4 estacas de madera, alrededor del sitio, una en cada esquina.

Figura 3. Dimensionamiento de la biojardinera.



Fuente: Rosales y Marín (2010).

Luego de esto, se prepara el terreno para la excavación, y cuando se termina de hacer esta fase se verifica las medidas para evitar fallos de cálculos en cuanto a la estimación de los materiales requeridos. Inmediatamente se prepara la tubería por donde ingresa y sale el agua, seguidamente se realiza la colocación de los materiales (plástico impermeable, sarán, piedra bola, piedra cuarta, etc.).

Figura 4. Dimensionamiento de la biojardinera.

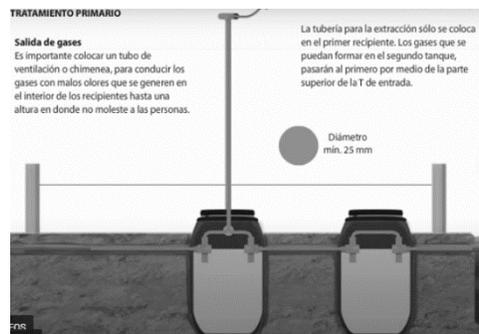


Fuente: Rosales y Marín (2010).

Una vez terminada esta fase, se procede a la construcción del tratamiento primario, etapa fundamental para el buen funcionamiento del humedal. Aquí se tiene pensado colocar dos estañones de plástico con sus respectivas tapas, pero fáciles de

quitar para luego realizar el mantenimiento, estos deben tener una distancia adecuada para el buen recorrido del agua y favorecer a una buena sedimentación, los recipientes se comunican por medio de tubería PVC y, como última etapa, se procede a sembrar las plantas, con una distancia adecuada entre sí para evitar problemas con las raíces dentro del humedal.

Figura 5. Tratamiento primario.



Fuente: Alianza por el agua (2020).

En la parte de operación y seguimiento realiza un documento de actividades similar a una bitácora para control del cumplimiento de fases constructivas al momento de la instalación del humedal. Cuando se construyó la biojardinera, se generó un manual de mantenimiento para que quien vaya a verificar el funcionamiento tenga una guía de los cuidados y el equipo necesario para el uso, entre ellos está un colador construido de malla plástica o metálica con una porosidad suficiente para retirar los sólidos que se encuentran en la trampa de grasa y los tanques de tratamiento preliminar.

También, una bomba hidráulica con manguera, de pequeña potencia, para sacar el agua tratada del tanque receptor o, en su defecto, baldes de plástico y un cepillo de tamaño adecuado para limpiar periódicamente (1 o 2 veces al mes) las tuberías de entrada y salida de la biojardinera.

En la parte del equipo de protección personal se debe utilizar guantes plásticos o de látex, gafas de plástico y cubre bocas y las labores necesarias para que el sistema funcione de la mejor manera son: retirar los restos de comida y basura de la trampa de

grasas, al menos, una vez por semana, para que no atasquen la salida del equipo y haya un buen avance de las aguas. En caso de atascos o acumulación de sólidos, estos se deben eliminar lo más pronto posible para que las aguas no se rebalsen, además, es importante utilizar cepillos de cerdas duras, ya sean de plásticas o metálicas, para limpiar las paredes de la trampa cuando ocurran acumulaciones de residuos en estas.

Seguidamente, en los tanques de tratamiento preliminar se deben recoger los aceites y grasas en la superficie una o dos veces por semana, especialmente cuando se note una capa de “nata” espesa. Los sólidos sedimentables se recogen con un colador de un largo adecuado, de modo que el contacto con las aguas sea mínimo.

Luego, en la biojardinera, el sustrato superior se debe mantener libre de residuos vegetales como hojas secas, ramas y basura en general. En caso de zonas de mucho calor, con largas horas de luz directa, se debe utilizar un toldo de vivero para proteger la vegetación. En caso de que el terreno tenga animales como perros, gallinas, cerdos y similares, es importante cercar el área alrededor de la biojardinera para que no exista la posibilidad de entrada a la zona con el sustrato.

En el tanque receptor de agua tratada se requiere una limpieza mínima comparado a los otros procesos, cuando se retire el agua de reúso, se puede verificar el estado de las paredes, y en caso de que existan acumulaciones calcáreas o similares, se pueden restregar con un cepillo, evitando el uso de jabones o detergentes.

4. Resultados y Discusión

El análisis e interpretación de resultados se presenta de manera integrada considerando los datos obtenidos de la aplicación de los instrumentos, tomando las variables más relevantes, además, las observaciones que se muestran ordenadamente según los objetivos que guiaron la investigación. A continuación, se detalla las fases expresadas en el capítulo anterior.

4.1. Descripción del sitio de estudio

El distrito de Juan Viñas, ubicado en el cantón de Jiménez provincia de Cartago, presenta condiciones climáticas. Según el Instituto de Desarrollo Rural de Costa Rica (INDER) (2014), los niveles de precipitación abarcan desde 2 100 mm/año (en sus zonas moderadamente secas) hasta los 5 889 mm/año (en sus zonas muy húmedas), además, destaca como uno de los cantones más lluviosos del país, también se registran temperaturas promedio de 5 °C a 26 °C.

El centro está construido en un terreno de la Asociación de Juan Viñas para el Adulto Mayor (AJUVIPA), conformada por 7 personas de la comunidad, la cual beneficia aproximadamente a 35 personas adultas mayores durante el día, quienes participan en actividades de mantenimiento ocupacional, recreación, de fortalecimiento espiritual, alimentación, fisioterapia, psicología, servicio de transporte, así como acompañamiento al EBAIS y retiro de medicamentos.

Las actividades cotidianas que se desarrollan en el centro son similares a las de un hogar, realizando aspectos domésticos como lavados de mano, trapos de limpieza, comestibles y la preparación de alimentos. Actualmente, estas aguas se vierten a un drenaje y tanque séptico que se encuentra en la zona trasera de la propiedad.

Esta población de adultos mayores pertenece a la comunidad de Juan Viñas en donde se ha evidenciado que el 28 % es atribuido al desconocimiento de las personas sobre el manejo de las aguas residuales y donde en la mayoría de estos casos no se le dan ningún tipo de tratamiento a los vertidos, esto se convierte en uno de problemas graves de la zona (Alvarado, Rojas y Sibaja, 2019, p. 34).

4.2. Caracterización del agua gris

En el cuadro 5, se detallan resultados de la medición de campo que se realizó a la hora de la recolección de la muestra de agua residual gris, estos parámetros básicos obtenidos expresan a simple vista características del agua residual.

Cuadro 5

Datos obtenidos en las mediciones de campo.

Medición	pH	Temperatura (TC°)	Conductividad Eléctrica (μ s)	Observaciones de campo
1	6,8	26,2	512	Espuma producto de jabones
2	7,7	23,1	254	Salida de residuos orgánicos
3	7,4	20,7	216	Agua residual gris turbia

Fuente: elaboración propia.

Para realizar la toma de la muestra, se realizó un muestreo puntual en la salida de la tubería existente del Centro Diurno, el cual se llevó a cabo en las horas con mayor aumento de caudal. Tomadas las submuestras, se etiquetan debidamente y se almacenan en una hielera, luego son enviadas al laboratorio para su respectivo análisis.

Figura 6. Recolección de muestra



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 6

Datos obtenidos de la caracterización físico-química del agua residual gris del Centro Diurno de Adulto Mayor de Juan Viñas

Parámetro	Fechas de muestreo			Promedios	kg/día	Valores máximos permisibles
	10/09/2020	26/02/2021	14/04/2021			
pH	8,3	8,3	9,8	8,8	0,02	5 a 9
Temperatura	19,2	21,7	20,4	20,4	0,04	15°C<T<40°C1
Sólidos Sedimentables (ml/l)	2	1,9	2,7	2,2	0,004	1 mg/l
Demanda Química de Oxígeno (mg /l)	425	347	1218	663	1,2	150 mg/l
Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg/l)	0,6	17,4	10,9	9,6	0,02	5 mg/l
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	41	219	196	152	0,3	50 mg/l
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	452	504	309	422	0,7	50 mg/l
Grasas y Aceites (mg/l)	71,5	262	31,5	122	0,2	30 mg/l

Fuente: elaboración propia.

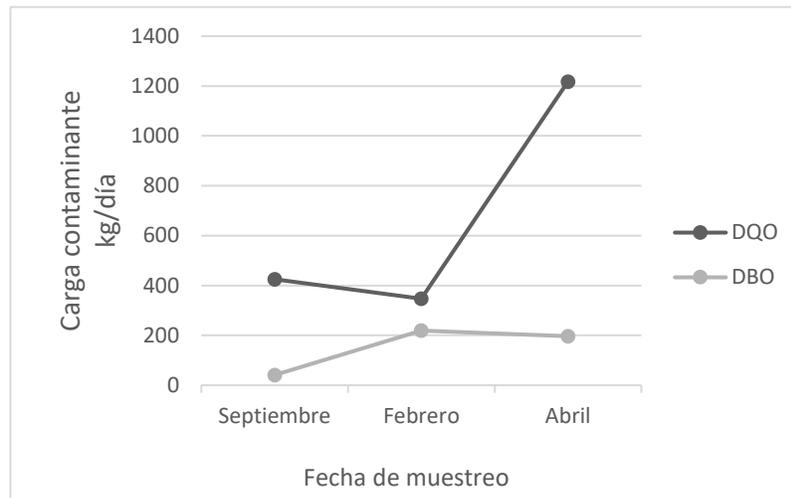
El pH del agua residual osciló entre 8,3 a 9,8 con un promedio de 8,8 (cuadro 6), el cual es un valor que no influye como parámetro limitante y que es apto para cualquier tipo de reuso, según el Reglamento de Vertido de Aguas Residuales.

La temperatura de las aguas domésticas osciló entre los 19,2 y 21,7 °C con un promedio de los muestreos de 20,4 °C, evidenciando que el promedio diario del agua no es igual que la temperatura ambiental. En el momento de realizar el muestreo es donde generalmente el agua residual se encuentra entre 1 a 2 grados menor que la temperatura ambiental, además, la temperatura de 20,4 °C, según el reglamento de vertido, no excede ningún límite para el vertido en un cuerpo de agua ni menos para reusó.

El promedio de los sólidos sedimentables se mantuvo en 2,2 ml/l/h, superando el máximo permisible de 1 ml/l/h. Cabe destacar la importancia del tratamiento

preliminar en la remoción de la mayor parte de estos sólidos, lo que contribuye con evitar la obstrucción del lecho del humedal.

Figura 7. Comportamiento de los valores de materia orgánica DQO y DBO₅ en la composición de las aguas residuales grises, en el periodo de muestreo.



Fuente: elaboración propia.

La concentración promedio de la demanda química de oxígeno (DQO) es de 663 mg/l con una carga promedio de 1,2 kg/día. El pico máximo de carga contaminante detectado fue de 2,13 kg/día el 14 de abril, mientras que la menor carga obtenida fue en el mes de febrero con un valor 0,61 kg/día. En el reglamento el parámetro DQO no tiene límites máximos permitidos para las aguas ordinarias, por lo que no existe prohibición de vertido a los cuerpos de agua con respecto a este parámetro, para el tipo de reuso tampoco posee un límite de concentración, según la DQO, puede utilizar para cualquier tipo de reuso estipulado en la legislación.

El valor de sustancias activas al azul de metileno tuvo un promedio de 9,6 mg/l, el cual excede el límite máximo permisible que establece el decreto de vertido y reuso.

El DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno) obtuvo un valor promedio de 152 mg/l y una carga promedio de contaminante de 0,3 kg/día, la mayor carga detectada fue de 0,38 kg/día en el mes de febrero y fue la mayor descarga de materia orgánica

evaluada antes de ser vertida a la quebrada Chiz-Maravilla, además, la menor carga de DBO₅ fue 0,07 kg/día en el mes de setiembre. El reglamento establece el límite de descarga a un cuerpo receptor de agua residual ordinaria en 50 mg/l, pues el DBO₅ promedio es de 152 mg/l se puede decir que este tipo de agua residual gris está disminuyendo la calidad ambiental de la quebrada Chiz-Maravilla.

El valor promedio de los sólidos suspendidos totales es 422 mg/l, con una carga de 0,7 kg/día con un límite máximo permitido de 50 mg/l. Es importante destacar que este valor sobrepasa el límite de vertido, lo cual demuestra la necesidad de dimensionar un sistema de tratamiento preliminar, para evitar principalmente los sólidos sedimentables y la materia orgánica originada por estos. Asimismo, con la eliminación de este contaminante se obtendrá un tiempo de vida mayor para el humedal. Con respecto a estos valores, se espera obtener un rendimiento mayor al 33 % en la remoción de los sólidos totales del efluente.

Para las grasas y aceites presentan un promedio de 122 mg/l y gran varianza en los valores en los muestreos, el agua residual doméstica presenta considerables componentes grasosos. La concentración de grasas y aceites esté por arriba del límite máximo permisible por la legislación vigente (262 mg/l) y su carga promedio es de 0,2 kg/día.

4.3. Condiciones del sitio

En el cuadro 7, se comprueba que las condiciones del sitio sí cumplen en su totalidad para la construcción de la biojardinera. Entre los indicadores evaluados se encuentran: ubicación del sitio, se pretende que el lugar donde se va a construir la biojardinera se encuentre más bajo que el lugar de donde salen las aguas residuales grises que provienen de la pila de lavar o lavadero, lo apropiado es una diferencia de nivel de 25 cm; pendiente del terreno, en este punto se busca que el lugar sea más o menos plano, esto significa que la inclinación del terreno no debe ser mayor a un 5 %.

Cuadro 7

Inspección del sitio seleccionado.

Descripción	Cumple	No cumple	Observaciones de campo
Ubicación del sitio donde se va a construir la biojardinera con respecto al vertedero de la casa	x		El área para la construcción de la biojardinera se encuentra en óptimas condiciones.
Pendiente del terreno (5 %)	x		
Textura del suelo	x		
Área del sitio	x		
Movimiento de agua en el suelo (drenajes)	x		
Vegetación e infraestructura preexistente	x		

Fuente: elaboración propia.

En la textura del suelo se verifica su tipo: si es arenoso, arcilloso o mixto. El más recomendable para el fondo y las paredes de la biojardinera es el arcilloso, en la visita de campo realizada se hizo una prueba básica de tacto, donde se pudo constatar que presenta características mixtas, siendo adecuado para la implementación del sistema.

En cuanto al área del sitio, se consideró el espacio para la colocación de las unidades para el tratamiento primario y biojardinera, así como el espacio adicional, con el objetivo de colocar al final del sistema un tanque para el almacenamiento del agua ya tratada.

Figura 8. Medición del área del sitio.



Fuente: Elaboración propia.

En el punto de movimiento de agua en el suelo, es importante identificar que en el terreno donde se va a construir no existan tuberías de agua potable, drenajes viejos, tanques sépticos u otros y vegetación e infraestructura preexistente. Se observa que no haya ninguna obstrucción que impida aprovechar el terreno para la construcción, y con la visita de campo se identificó que el terreno nada más posee hortalizas sembradas por el personal del centro, lo cual no afecta la ejecución del proyecto.

Figura 9. Identificación del sitio.



Fuente: elaboración propia.

4.4. Caudal de las aguas domésticas

En un inicio, se propuso realizar las mediciones del caudal por el método volumétrico, sin embargo, no fue posible, pues las condiciones de la infraestructura no permitían ejecutar la comprobación. Por esto, se decidió evaluar los comportamientos promedio del consumo de agua respecto a los meses del año, y una vez analizados los resultados del centro diurno, se detecta que la información obtenida de los historiales de consumos es muy elevada y se llega a la conclusión de posibles fugas, las cuales no se logran comprobar.

Por lo anterior, se descarta utilizar los datos del historial de consumo brindado por la Municipalidad de Jiménez y se decide tomar como referencia el documento Manual Técnico de Dotación de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía de Dirección de Agua, del cual se extraen las dotaciones para consumo humano, usando la categoría de servicios con su actividad de restaurantes/alimentos y bebidas, el cual posee una dotación de 35 l/día, pues estos datos tienen similitud con el comportamiento de consumo del centro diurno.

No obstante, no todo el líquido es utilizado para labores que producen aguas residuales grises, por ejemplo, el agua usada para los retretes, lavado de aceras, riego de plantas y otras tareas similares no se deberían tomar en cuenta en un principio para la determinación del flujo volumétrico entrante a la biojardinería.

4.5. Diseño del humedal artificial

Según la literatura existente, las concentraciones de contaminantes de los afluentes visiblemente disminuyen con todos los sistemas de humedales artificiales, sin embargo, el sistema de flujo subsuperficial horizontal es el más construido en Costa Rica para el tratamiento del agua residual doméstica, por lo que se considera importante instalar uno similar en el centro diurno.

Este sistema ha dado resultados positivos con la normativa vigente, produciendo un porcentaje de eliminación hasta del 95 % de contaminantes del efluente dependiendo del área del humedal, generando así condiciones de reutilización de esta agua para zonas verdes o simplemente para verter a través de un sistema de conducción

de infiltración al agua freática, pero con una calidad del agua adecuada que genere sustentabilidad a este recurso natural.

También, de acuerdo con las características que presentan los diferentes tipos de sistemas de tratamientos de aguas residuales grises, donde existen emisión de olores y la probabilidad de aparición de vectores, el sistema que mejor aborda este tipo de condiciones es el humedal artificial subsuperficial horizontal, pues el agua contaminada fluye debajo del material de soporte, por lo cual existe disminución de olores y también permite que no haya contacto directo entre la atmósfera y el agua, evitando la generación de mosquitos e insectos.

4.6. Dimensionamiento

El dimensionamiento del humedal de flujo superficial se realizó en dos etapas: en la primera se determinó la superficie necesaria de tratamiento (dimensionamiento biológico) y en la segunda se establecieron las dimensiones geométricas del sistema (dimensionamiento hidráulico).

4.7. Dimensionamiento biológico

Según García y Corzo (2008), las ecuaciones matemáticas más utilizadas para expresar el comportamiento de las biojardineras se basan en características de primer orden, donde se utilizan concentraciones de entrada y salida de los contaminantes en el agua. Es posible definir el humedal como un reactor de flujo ideal en pistón, siguiendo los siguientes modelos de cinética:

$$\frac{dC}{dt} = -k_v C$$

Donde,

C: concentración del contaminante, mg/l

t: tiempo, días

k_v : constante cinética de primer orden, días⁻¹

Se fijan las concentraciones iniciales de contaminante (C_0 para $t=0$) y finales, (C_1 para $t=t$, siendo este último el tiempo medio de retención hidráulico, en días). Se obtiene:

$$\frac{C_1}{C_0} = \exp(-k_v t)$$

Donde,

C_0 : concentración inicial, mg/l

C_1 : concentración final, mg/l

k_v : constante cinética de primer orden, días⁻¹

t : tiempo medio de retención hidráulico, días.

García y Corzo (2008) definen el comportamiento del material granulado dentro del humedal artificial y su interacción con los demás elementos. Si se utiliza el volumen del humedal y el caudal medio de las aguas residuales al pasar por la biojardinera, se pueden establecer propiedades importantes para el diseño del equipo. El tiempo medio de retención hidráulico es:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{\varepsilon * S * h}{Q}$$

Ecuación 1 Tiempo de retención hidráulico

Donde,

V : volumen del humedal, m³

Q : caudal medio, m³/día

ε : porosidad, adimensional

S : superficie del humedal, m²

h : profundidad media del humedal, m

Sustituyendo t en las dos ecuaciones anteriores y definiendo una nueva constante cinética de primer orden (k_A , en m/d):

$$k_A = k_v * \varepsilon * h$$

$$\frac{C1}{C0} = \exp\left(-k_v \frac{S}{Q}\right)$$

Finalmente, se despeja la ecuación, tomando como variable dependiente la superficie de la biojardinera, puesto que resulta un dato esencial para calcular las dimensiones necesarias para la construcción del humedal superficial de flujo horizontal. Se tiene, entonces:

$$S = \frac{Q}{k_A} \ln\left[\frac{C_0}{C_1}\right]$$

Ecuación 2 Superficie del humedal

Donde,

S: superficie del humedal, m²

Q: caudal medio, m³/día

K_A: constante cinética de primer orden, m/d

C₀: concentración inicial, mg/l

C₁: límite de vertido

Los parámetros de K_v , ε y h corresponden a la constante de proporcionalidad para reacciones de primer orden, la porosidad y la profundidad respectivamente. Los dos primeros se obtienen de la literatura, con valores que corresponden a humedales construidos con rellenos de piedra pequeña, por lo que equivalen a 1,472 d⁻¹ y 36,5 %, y el tercero es la profundidad que se va a utilizar para la construcción de la biojardinera. Además, se utiliza una concentración inicial de DBO₅ igual a 152 mg/l, por ser el promedio de los análisis de laboratorio, estos son los valores de DBO₅ antes de que las aguas ingresen al equipo depurador.

De acuerdo con Tousignant, Frankhauser y Hurd (1999), el valor de la constante k_A variará dependiendo del contaminante en razón y la necesidad del humedal para depurar las aguas residuales grises. Según datos recopilados, el valor de la constante de 0,08 m/d es suficiente en muchos casos para eliminar DBO₅ necesario en las aguas residuales para ser vertidas apropiadamente, en cualquier caso, el diseño escogido se considerará correcto cuando un 95 % de las concentraciones de contaminantes de los

efluentes se encuentren por debajo del límite de vertido, pues los valores después de realizar esta reducción son adecuados para cumplir un desecho o reuso de estas aguas.

Es importante mencionar que los humedales subsuperficiales de flujo horizontal tienen una alta invariabilidad ante los cambios de temperatura, por lo que las correcciones a la expresión de Arrhenius debido a esta variable no serán necesarias, especialmente en zonas con cambios reducidos de temperatura a lo largo del año.

4.8. Dimensionamiento hidráulico

Como menciona García y Corzo (2008), la ley de Darcy evalúa el dimensionamiento hidráulico de la biojardinera, y a su vez ayuda a determinar las dimensiones del sistema, que describe el régimen del flujo en un medio poroso como se ve a continuación:

$$Q = K_S * A_S * S$$

Donde,

Q: caudal medio, m³/día

K_s: conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo, m³/m²d

A_s: sección de humedal perpendicular a 1 dirección de flujo, m²

S: gradiente hidráulico o pendiente, m/m

Posteriormente, se realizan los cálculos respectivos en donde se determinan el ancho y largo del humedal con las fórmulas que siguen:

$$W = \frac{Q}{(K_F l h)}$$

$$L = \frac{Q}{(B C_H)}$$

Ecuación 3 Ancho y Largo

Donde,

$Q_{\text{medio,d}}$: caudal medio, $\text{m}^3/\text{día}$

W: ancho, m

h: profundidad media del humedal, m

L: longitud del humedal, m

K_F : Conductividad hidráulica

I: Pendiente (%)

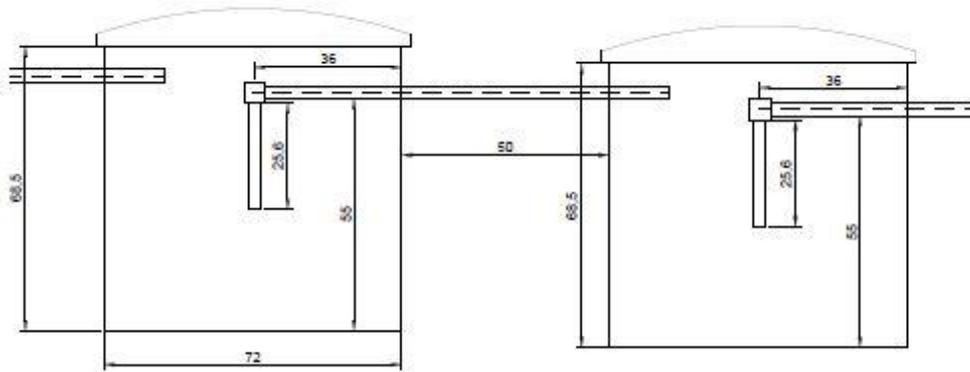
C_H : Carga hidráulica

Las fórmulas anteriores se aplican para llevar a cabo el diseño de la biojardinera tomando en cuenta la calidad y flujo de las aguas residuales, una de las partes importantes es que no se debe realizar un dimensionamiento menor al requerido, pues la calidad del fluido a la salida será inferior al necesario para que estas aguas se puedan reutilizar o eliminar mediante filtración, en caso contrario, un sobredimensionamiento representa el uso de recursos innecesarios, tiempo y dinero debido a un mal diseño inicial.

4.9. Elementos principales del diseño de la biojardinera

En las siguientes figuras representaran cada uno de los elementos importantes del humedal artificial.

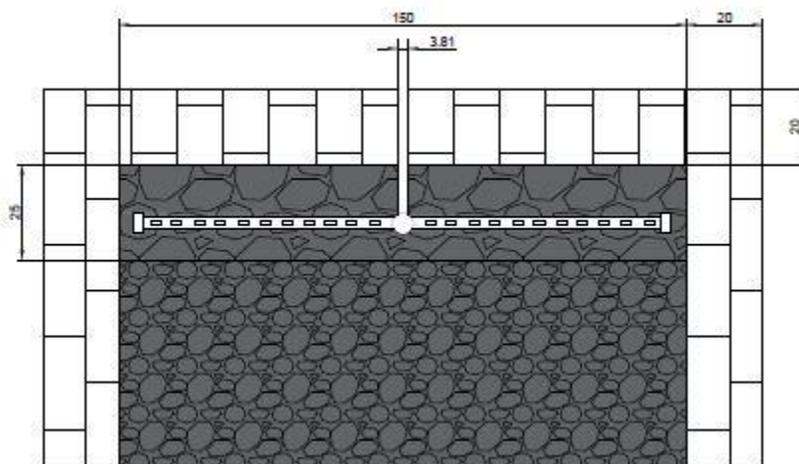
Figura 10. Sistema de dos tanques de tratamiento preliminar en serie.



Fuente: elaboración propia.

Las dimensiones detalladas corresponden a tanques estándar con un volumen de 250 L, los cuales se entierran dejando en el suelo las tuberías de entrada de flujo. Es importante mencionar que los tanques se deben sepultar con una profundidad de 5 cm mayor que el anterior para que exista esa diferencia mínima de altura entre tuberías de entrada y salida.

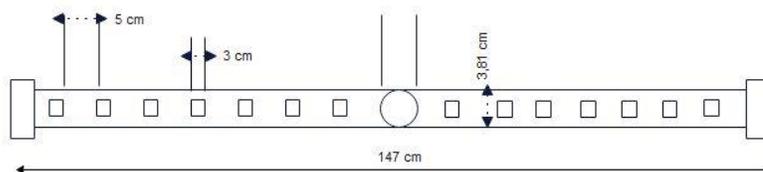
Figura 11. Sección de entrada de agua residual a la biojardinera.



Fuente: elaboración propia.

Con base en las recomendaciones encontradas en la literatura y los resultados de los análisis de laboratorio, se realiza una sección inicial del humedal de 50 cm de piedra bola, y a su vez se tiene un aumento de la cantidad de piedra cuarta, esto llega a ampliar el área superficial para el avance de agua y mejorar la degradación de contaminantes.

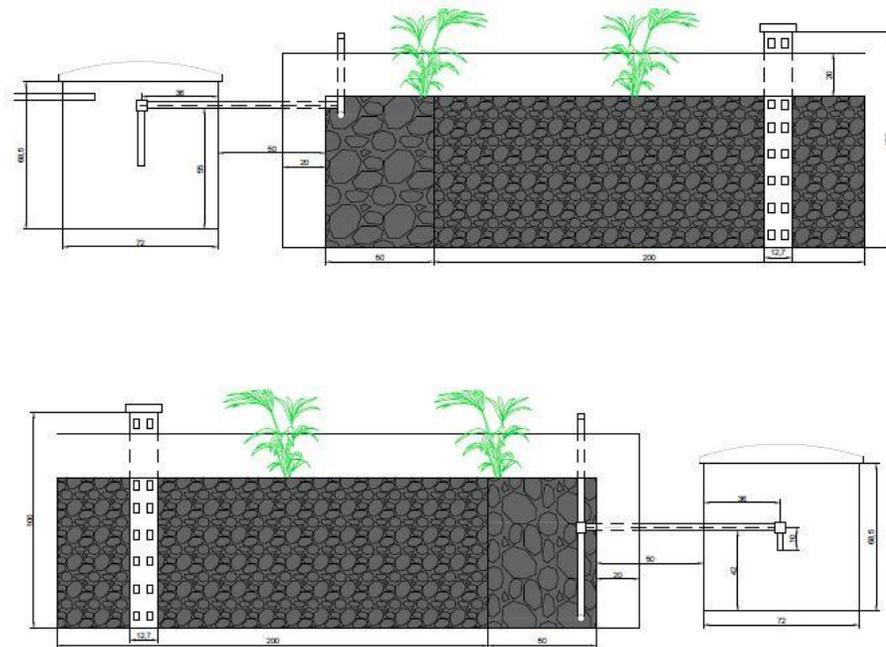
Figura 12. Tubería interna para distribución de las aguas.



Fuente: elaboración propia.

Las tuberías internas de la biojardinera se encargan de realizar la distribución del líquido entrante al inicio del proceso y luego enviarlo al tanque de recolección del agua ya tratada. Las perforaciones de la tubería se deben realizar a 3 cm de ancho aproximadamente y la separación entre ellas es de 5 cm.

Figura 13. Diseño lateral de la biojardinera, etapa inicial (arriba) y etapa final del proceso (abajo).



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 13 se muestra una representación gráfica de la biojardinera. En primera instancia, está la tubería de entrada de las aguas residuales, instaladas a una altura de 55 cm del nivel del tanque; esta primera fase tiene como nombre tanque de tratamiento preliminar, y su función sedimentar y separar las grasas para que no ingresen a la biojardinera.

Seguidamente, la sección de piedra bola posee un tamaño de 15 a 25 cm de diámetro y se encarga de sostener los elementos iniciales del proceso, principalmente,

la tubería interna de ingreso de aguas. Próximamente, el sustrato de piedra cuarta es de menor tamaño y se encarga de sostener las raíces de la vegetación, también trabaja como filtro que va reteniendo las partículas disueltas que aún le quedan al agua después del tratamiento primario.

En breve se observan las plantas encargadas de realizar la depuración de las aguas. Para tener una buena eficiencia del equipo se debe garantizar que estén en óptimo estado mediante supervisión y mantenimiento constante; enseguida se coloca una chimenea en medio del trayecto de las aguas grises con el fin de mejorar la oxigenación del agua y las raíces de las plantas, además, sirve como prevista para efectuar muestreos del líquido.

Por último, se encuentra la tubería de entrada al tanque de recolección donde se conducen las aguas tratadas en el humedal para ser almacenadas y después de esto está el tanque de recolección; una vez reducida la carga orgánica, las aguas se pueden almacenar para su posterior uso.

4.10. Construcción del humedal artificial

Es importante mencionar que, desde el inicio de la tecnología de humedales artificiales, se han elaborado guías y manuales para el diseño de este tipo de sistemas de tratamiento y han enseñado que se debe tener conocimientos en fontanería, hidráulica y en la formulación para el diseño de biojardineras de uso doméstico. Esto resulta beneficioso para que sea posible realizar la instalación de este tipo de sistemas sin inconvenientes.

El periodo de construcción de la biojardinera inició el 12 de enero de 2022 y se extendió hasta el viernes 14 de enero de 2022. Durante los tres días se trabajó en conjunto con estudiantes y profesores de la Universidad Nacional interesados en aprender y apoyar con el proyecto, así mismo, miembros de la Municipalidad de Juan Viñas; además, estuvieron presente las personas que realizan el mantenimiento al Centro Diurno del Adulto Mayor, así como Rosaura Rodríguez, su administradora.

Tres semanas antes del periodo de construcción, se coordinó con Rosaura Rodríguez y miembros de la Municipalidad de Juan Viñas para realizar la excavación

donde se colocaría el humedal, los tanques de almacenamiento de agua y los canales de tubería. Fue fundamental realizar este paso antes del 12 de enero, pues requería de mucho tiempo y esfuerzo para retirar toda la tierra de la zona de construcción, además, se necesitaba que el agujero tuviese las dimensiones exactas para que el eficiente funcionamiento del humedal.

Al llegar al sitio de construcción se comprobó que las excavaciones realizadas en días anteriores estuviesen bien demarcadas y con las dimensiones apropiadas para la biojardinera, pues es importante que el ancho, largo y profundidad sean lo más cercanos posible al diseño original, siendo en este caso de 2 m, 8 m y 0,7 m, respectivamente.

Asimismo, se verificó que los agujeros para los tanques de tratamiento primario sean de 50 cm de largo, uno del otro, para que no haya una distancia muy grande y no desperdiciar el campo del terreno donde se instaló el equipo.

Se pasa a nivelar las excavaciones, siguiendo las direcciones de los encargados de diseño. Primero, se aplana el suelo de la biojardinera para tener una profundidad homogénea a lo largo de todo el humedal; esta profundidad se mide tomando como punto de referencia un nivel sobre la superficie del suelo, marcado en etapas previas de excavación. Luego, se rectifican los canales donde pasaran las tuberías que llevan las aguas residuales desde el domicilio hasta la entrada de la biojardinera, esto para que maneje sin problemas las aguas de salida.

De forma simultánea a la revisión de las excavaciones, se preparan las tuberías interiores de la biojardinera. En primer lugar, se tienen las utilizadas en las entradas y salidas, las cuales aseguran que las aguas se repartan bien a lo largo del humedal, y no existen zonas que tengan exceso o deficiencia de líquido, por lo que se deben elaborar con mucha precisión.

Una vez lista la etapa de rectificación, se inicia con la instalación del área de sedimentación, filtración y absorción de nutrientes, es decir, el proceso principal de trabajo de la biojardinera. Es importante mencionar que se debe seguir un orden específico para colocar los materiales, pues esto asegurara un proceso adecuado, con

el cual no habrá posibilidad que las aguas se filtren en la tierra antes de terminar el proceso.

Los pasos en el orden definido son los siguientes:

- 4.10.1 Plástico grueso: se utiliza plástico para biodigestores de al menos 0,7 mm de grosor, el cual funciona como el elemento permeable principal en el equipo. El material se coloca entre varias personas sobre la excavación, teniendo cuidado de que no se dañe durante el montaje. Es esencial acomodar el plástico correctamente, de modo que no queden espacios sin cubrir o con dobleces, puesto que este material es la barrera principal que evita la filtración de agua en la tierra.
- 4.10.2. Sarán: se coloca sobre el plástico y recostado a las paredes de la excavación, para evitar que las piedras que se colocan luego lleguen a dañar el material impermeabilizante.
- 4.10.3. Piedra bola: esta piedra de mayor tamaño se coloca en los muros de la biojardinera, por donde entra y sale el agua, y por todo el suelo (figura 12). Tiene la función de dar soporte a las tuberías de entrada y salida y a las chimeneas que se encuentran en medio de la biojardinera, además, ayudan a repartir las aguas más homogéneamente a través del equipo. El tamaño del material es de 15 a 25 cm de diámetro.
- 4.10.4. Piedra cuarta: una vez verificada la posición de todas las tuberías y accesorios, tanto internos como externos, se rellena la biojardinera con piedra cuarta (figura 14), hasta alcanzar los 70 cm de altura desde el nivel más profundo de la biojardinera hasta el suelo del terreno. La piedra cuarta es el material filtrante y medio de interacción entre la mayor porosidad y brinda un mejor acabado al proyecto. El diámetro es de 1 a 2 cm.
- 4.10.5. Tuberías: como se mencionó en el punto 4, antes de colocar la piedra cuarta, se debe verificar que las tuberías estén conectadas y bien alineadas, de modo que el agua pueda fluir por todo el sistema sin inconvenientes, hasta llegar al tanque de tratamiento preliminar, en medio del sistema de tuberías. Es necesario

colocar accesorios de control y de separación de sólidos de mayor tamaño, como cajas de registro y trampa de grasa, para que la biojardinera funcione de la manera más eficiente posible.

Figura 14. Colocación de relleno en la biojardinera. (a) Piedra bola. (b) Piedra cuarta.



Fuente: elaboración propia.

Se utilizaron dos tipos de tubería con diferente ancho para las distintas partes de la construcción. Las tuberías de 2 pulgadas se colocan desde la salida del centro diurno hasta la entrada del tanque de tratamiento preliminar; en el caso de las tuberías interiores de la biojardinera, se escoge un ancho de 1,5 pulgadas, el cual ofrece un flujo de líquido adecuado para la entrada y salida de aguas sin ocupar demasiado espacio. Es importante que se aproveche la altura y el ancho del humedal en la mayor medida posible, por lo que usar una tubería de mayor tamaño podría reducir la eficiencia del equipo. Finalmente, en el tanque de tratamiento preliminar se instala una chimenea para ventilar la acumulación de metano producida en el tanque, la cual se construye con una tubería de 1 pulgadas de diámetro y al menos 3 m de altura.

El tanque de tratamiento preliminar (figura 15) se instala antes de la entrada de agua al humedal; se entierra a una profundidad tal que sea posible retirar la tapa del tanque para realizar verificaciones y limpieza rutinaria. De igual manera, el tanque recolector de agua tratada (figura 15) se conecta a la salida de la biojardinera, el cual

tiene a su vez una salida a un drenaje, para que no se den rebalses de agua. Como se mencionó anteriormente, la distancia entre cada uno de estos tanques y la biojardinera es de 50 cm, con las tuberías enterradas para que se mantengan en las mejores condiciones posibles. Después de aproximadamente 15 días se pueden sembrar las especies vegetales, para que la biojardinera tenga tiempo de llenarse de agua y las plantas puedan desarrollarse y arraigarse sin problemas.

Figura 15. (a) Tanque tratamiento preliminar. (b) Tanque recolector de agua tratada.



Fuente: Elaboración propia.

4.11. Materiales utilizados

Los materiales utilizados para la confección de la biojardinera fueron comprados con el presupuesto del proyecto “Procesos de Gestión Integrada del Recurso Hídrico en las subcuencas Chiz-Maravilla y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica” (cuadro 8), por lo que fue posible conseguir todos los elementos necesarios para su elaboración.

Cuadro 8

Materiales utilizados en la construcción de la biojardinera.

MATERIALES PARA TRATAMIENTO PRIMARIO			
2	uni. =	Recipientes plásticos, con tapa.	
4	uni. =	T's PVC sanitarias de 38 mm (1,5 pulg)	
2	m =	Tubería PVC, sanitaria de 38 mm (1,5 pulg)	
4	uni. =	Uniones PVC de 38 mm (1,5 pulg)	
3	m =	Tubería PVC, sanitaria de 25 mm, (1,0 pulg) para línea de ventilación	
1	uni. =	Unión PVC de 25 mm (1,0 pulg)	
3	uni. =	T's codos sanitarios de 25 mm (1,0 pulg)	
1	uni. =	Colador/pascón de mediano a grande, para limpiezas	
1	uni. =	tubo silicón	
MATERIALES PARA BIOJARDINERA			
3	m ³ =	Piedra tipo gavión, entre 4 y 5 pulgadas	
10	m ³ =	Piedra cuarta, entre 3/4 y 1 pulgada	
11	m =	Plástico de 0,7 mm de espesor, 3 m ancho útil (doble)	
5.70	m =	Tubería PVC, sanitaria de 38 mm (1,5 pulg)	
6	uni. =	Tapones PVC, sanitarios de 38 mm (1,5 pulg)	
4	uni. =	T's PVC sanitarias de 38 mm (1,5 pulg)	
1	uni. =	tubo "pegamento" PVC	
4	sacos =	cemento o pegamix	
10	m=	Saran 3 m ancho útil (doble)	
MATERIALES PARA LA UNIDAD DE SALIDA			
1	uni. =	Recipiente plástico, con tapa	
2	uni. =	Válvulas o llaves de paso PVC de 38 mm (1,5 pulg)	
2	m =	Tubería PVC, sanitaria de 38 mm (1,5 pulg)	

Fuente: Marín y Rosales (2010).

Se debe tener en cuenta que también se necesita cantidad mínima de herramienta para completar la labor, como palas, taladro eléctrico, martillo, seguetas, carretillos y demás. En muchos casos estas herramientas ya se tendrán en los domicilios donde se hace la instalación o serán parte del equipo de trabajo encargado de la obra, por lo que no siempre es necesario comprarlas.

Luego de varios días de trabajo, se termina la construcción del humedal (Figura 16). Es importante recalcar la necesidad de un equipo de trabajo dedicado y con una

buena coordinación. Existen varias etapas que se pueden realizar al mismo tiempo, por lo que la repartición de labores es esencial para la pronta realización del proyecto.

Figura 16. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se muestra la tabla de bitácora de fases constructivas, donde se muestran los días en los que se trabajaron las actividades destinadas para la construcción de la biojardinera, además, en esta se encontrarán las fechas estipuladas para la ejecución de estas y los plazos destinados, así como los estados en los que se encuentran las etapas.

Cuadro 9

Bitácora de fases constructivas

Bitácora de fases constructivas				
Día	Fechas	Actividad realizada	Plazo	Resultado
1	15/12/2021	1. Excavación de los espacios del humedal (tratamiento preliminar, biojardinera, tanque recolector de agua tratada)	Se realiza la actividad el mismo día	Concluido
2	01/12/2022	1. Verificar las medidas (Excavación, distancias de tanques y humedal).	Se realiza la actividad el mismo día	Ejecutado
		2. Preparación de la tubería.		

		3. Se colocan los tanques de tratamiento preliminar y tanque de recolección de agua tratada.		
3	13/01/2022	1. Se impermeabiliza la excavación, para luego agregar el sarán. 2. Se realiza la conexión de la tubería PVC, para luego colocarla en la excavación de la biojardinera. 3. Se distribuyen tres tubos de PVC dentro de la biojardinera como previstas para muestreos. 4. Se coloca la piedra bola en los dos extremos, seguidamente se agrega la piedra cuarta.	Se realiza la actividad el mismo día	Ejecutado
4	14/01/2022	1. Se realiza una pequeña acera alrededor de la biojardinera	Se realiza la actividad el mismo día	Concluido
5	02/02/2022	1. Se realiza la siembra de las plantas en el humedal	Se realiza la actividad el mismo día	Finalizado

Fuente: elaboración propia.

4.12. Manual de operación y mantenimiento

Esta guía detalla todo lo relacionado con la operación y mantenimiento de la biojardinera, con el fin de mantener el sistema en buenas condiciones de funcionamiento, todo esto se determina del Decreto N°33601-S-MINAE Reglamento de Vertido y Reusó de Aguas Residuales.

4.13. Descripción del Proceso Industrial

El humedal de flujo superficial, llamado comúnmente biojardinera, se encarga de tratar los efluentes de aguas residuales del hogar, específicamente las aguas grises

producidas en distintos puntos del domicilio. Las aguas grises consisten en todas aquellas aguas utilizadas que tienen restos de comida, jabón, detergentes y demás desechos generados en labores de limpieza, pero que no tienen cantidades considerables de orina o heces, es decir, no se toman en cuenta las aguas negras de retretes.

El proceso consiste en dirigir estas aguas por medio de tuberías hacia la biojardinera, de modo que los sustratos y la vegetación del equipo se encarguen de purificar el líquido para que pueda ser reutilizado o desechado. En este caso, se tienen tuberías que transportan los efluentes provenientes de varios puntos del centro diurno, específicamente, lavamanos, fregaderos, pila para lavar ropa y lavadora.

Durante las horas de mayor trabajo doméstico, usualmente en la mañana (entre las 6:00 am y 9:00 am), a la mitad del día (entre 11:00 am y 1:00 pm) y en la tarde, (entre 2:00 pm y 3:00 pm), se maneja un caudal aproximado de 1,75 m³/día. Se debe tomar en cuenta que durante parte del día existe un consumo de agua menor (aunque no despreciable), por lo que es poco común que deje de ingresar agua a la biojardinera por periodos largos de tiempo.

4.14. Procesos de tratamiento

El sistema de tratamiento consta de distintas partes necesarias para el funcionamiento del proceso. El flujo de agua se diseña de modo que el líquido avance por gravedad, es decir, existe un desnivel entre la salida de agua en los puntos del centro diurno, hasta la entrada de la biojardinera, que no permite estancamientos o devolución de las aguas. Se aconseja que exista un desnivel de al menos 1°, es decir, una diferencia de altura de 17 cm por cada 10 m de largo aproximadamente.

El procesamiento de las aguas a través de cada una de las partes ocurre en el siguiente orden: trampa de grasas, caja de registro, tanque de tratamiento preliminar, biojardinera, tanque receptor de agua tratada, drenaje. Estas se explican a continuación.

4.13.1. Trampa de grasa: se coloca en salidas de agua que contienen una cantidad considerable de contaminantes sólidos, es común usarlas en fregaderos de cocina para evitar el paso de sobros de comida, cascaras, restos animales, plástico y demás sólidos, para que no entorpezca el flujo de agua en las tuberías.

La trampa se suele hacer de cemento, con una cavidad de forrado con malla, la cual se puede sacar para limpiarla y retirar los contaminantes.

4.13.2. Caja de registro: posee un funcionamiento similar a la trampa de grasa, pues se usa para verificar el estado de las aguas antes de continuar el proceso. En caso de que exista algún sólido de gran tamaño, este puede ser retirado, además, la caja de registro reduce la velocidad de las aguas, lo cual es esencial al entrar a la biojardinera. Se construye con cemento y una tapa que se puede retirar en cualquier momento para realizar las revisiones.

4.13.3. Tanque de tratamiento preliminar: se encarga de separar los sólidos más pequeños que no se eliminaron en los pasos anteriores, mediante la sedimentación en el mismo fondo. Simultáneamente, las grasas y aceites se separan del agua y se trasladan a la superficie donde se pueden retirar fácilmente, ambos procesos necesitan de una cantidad de tiempo suficiente para que se dé la separación, además, las aguas estén relativamente calmas, por lo que la reducción de velocidad es de suma importancia. Se mantiene tapado en todo momento, a menos que se realice un control.

4.13.4. Biojardinera: el proceso más importante del procesamiento de aguas se lleva a cabo en este punto, las aguas entran a la biojardinera y se distribuyen a lo largo de esta, donde interaccionan con el filtro formado por piedras y las raíces de las plantas. Existe un desnivel entre la entrada y la salida que permite que las aguas salgan una vez terminada la purificación. Las plantas se deben cuidar con especial interés, pues son un factor muy importante para el buen funcionamiento del sistema, por lo que se deben proteger del clima, evitar la propagación de plagas o que las dañe algún animal de granja.

4.13.5. Tanque receptor: el agua tratada en la biojardinera se recolecta en el tanque para su posterior uso. Además de la entrada de agua, posee una salida que va a un drenaje para evitar un rebalse e inundación, se mantiene tapado en todo momento a menos que se realice un control.

4.13.6. Drenaje: se emplea para manejar el exceso de agua que no va a ser utilizada después de ser tratada, pues en muchos casos se produce mucha más agua de la que puede ser utilizada.

4.14. Información básica de diseño

A continuación, se muestra la información básica que se debe conocer para el buen funcionamiento de la biojardinera y los demás procesos involucrados.

4.14.1. Jornada de operación: el sistema de tratamiento trabaja principalmente en el día, por un periodo de 9 horas. Se utiliza todos los días de la semana de lunes a viernes y todas las semanas del año, a excepción de los sábados y domingos que no trabajan en el centro diurno.

4.14.2. Jornada de trabajo: la planta de tratamiento trabaja de forma continua, de modo que cada vez que ingresan aguas residuales, su tratamiento inicia de inmediato.

4.14.3. Diseño y capacidad: la biojardinera tiene un diseño rectangular de 8 m de largo, 2 m de ancho y 0,70 m de profundidad.

4.14.4. Caudal promedio diario: 1,75 m³/día.

4.14.5. Personal: el personal necesita de una capacitación en el uso, mantenimiento y limpieza de la trampa de grasa, caja de registro, tanque de tratamiento preliminar y tanque de recolección de agua tratada, por lo demás será necesario un nivel de escolaridad básico.

4.14.6. Equipo:

4.14.6.1. Colador: se utilizará un colador construido con malla plástica o metálica, con una porosidad suficiente para poder retirar los sólidos que se encuentran en la trampa de grasa, caja de registro y tanque de tratamiento preliminar.

4.14.6.2. Cepillo: las tuberías de entrada y salida de biojardinera se deben limpiar periódicamente (1 o 2 veces al mes) con un cepillo adecuado, que es capaz de retirar las acumulaciones sólidas.

4.14.7. Puesta en marcha: una vez terminada la instalación de los diferentes procesos y la conexión de las tuberías, se puede iniciar el paso de las aguas hacia la trampa de grasa y caja de registro. Es importante permitir que la biojardinera se llene complemente de agua antes de sembrar la vegetación, para que esta tenga los nutrientes suficientes de los cuales alimentarse, por lo que el sembrado se hace aproximadamente una semana después de iniciado el llenado; se puede remover una capa pequeña (unos 10 cm) de piedra para verificar que esté húmeda.

4.14.8. Operación: el transporte de las aguas a través del sistema es por medio de la gravedad, es decir, se procura desde el inicio que exista un desnivel en las tuberías para que el líquido fluya por sí solo. Por esta razón, no existen actividades que requieran de una operación por parte del personal.

4.14.9. Control operacional: se realizarán controles a las aguas en cada uno de los procesos involucrados, para verificar que su nivel se mantiene en la altura correcta, la cual será de la tubería de salida en la trampa de grasa, caja de registro y los tanques. De ser posible, se realizarán análisis fisicoquímicos para evaluar los niveles de sólidos totales, sólidos suspendidos, pH, DBO₅ y DQO, los cuales se comparan con las pautas requeridas por el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales (Decreto N° 33601 MINAE).

4.14.10. Posibles problemas: existen problemas que pueden surgir cuando se pone en marcha el procesamiento de aguas residuales mediante el uso de biojardineras. Las dificultades operativas más comunes y su solución se enlistan a continuación.

4.14.10.1. Desbordamiento de agua: es posible que se dé una acumulación de sólidos de tamaño considerable que evite el paso de las aguas por las tuberías, en este caso será necesario ubicar la sección en cual el flujo de líquido es menor de lo habitual, buscar obstrucciones entre las tuberías o en los puntos de proceso y retirarlas.

4.14.10.2. Problemas en la vegetación: existen varios factores que pueden poner en peligro el buen estado de las plantas, calor o frío excesivo, plagas de

insectos, animales que coman las hojas y demás elementos externos. En caso de que exista un deterioro evidente en las raíces u hojas, se puede utilizar repelentes naturales para proteger las plantas y poner cercas para que los animales no ingresen, si el daño es muy grande, las plantas tendrán que ser desenterradas, para reemplazarlas por especies en buen estado.

4.14.11. Mantenimiento: el buen funcionamiento y una larga vida útil del proceso dependen en gran medida de un mantenimiento adecuado y periódico y cada una de las partes lleva un mantenimiento mínimo. A continuación, se explican en detalle.

4.14.11.1. Trampa de grasas: se debe retirar los restos de comida y basura, al menos una vez por semana, para que no atasquen la salida del equipo y haya un buen avance de las aguas; en caso de atasco o acumulación de sólidos, estos se deben retirar lo más pronto posible para que las aguas no se rebalsen. Es importante utilizar un cepillo resistente, ya sea de plástico o metálico para limpiar las paredes de la trampa cuando ocurran acumulaciones de residuos en estas.

4.14.11.2. Caja de registro: de forma similar a la trampa de grasa, se limpia, al menos, una vez por semana y se retira del fondo cualquier sólido atrapado, en caso de que exista un buen paso de agua, se debe limpiar la entrada y salida por posibles obstrucciones en las tuberías de conexión, también es necesario usar un cepillo para asear las paredes y eliminar los desechos acumulados en estas.

4.14.11.3. Tanques de tratamiento preliminar: se debe recoger los aceites y grasas en la superficie una o dos veces por semana, especialmente cuando se note una capa de “nata” espesa. Los sólidos sedimentados se recogen con un colador de un largo adecuado, de modo que el contacto con las aguas sea mínimo. Debido a la abundancia de sólidos en el tanque de tratamiento preliminar, se debe vaciar, al menos, una vez cada tres meses o cuando se note que las paredes están sucias por el exceso de sólidos adheridos; una vez hecho

esto se pasa a limpiar con un cepillo de cerdas duras y largo adecuado para alcanzar el fondo del tanque.

4.14.11.4. Biojardinera: el sustrato superior se debe mantener libre de residuos vegetales, como hojas secas, ramas y basura en general. En caso de zonas de mucho calor, con largas horas de luz solar directa, se debe utilizar un toldo de vivero para proteger la vegetación. En caso de que el terreno tenga animales, como perros, gallinas, cerdos y similares, el área alrededor de la biojardinera se debe cercar para que no exista la posibilidad de entrada a la zona con el sustrato.

4.14.11.5. Tanque recolector del agua residual tratada: el tanque requiere una limpieza mínima comparado a los otros procesos, cuando se retire el agua de reuso, se puede verificar el estado de las paredes y en caso de que existan acumulaciones calcáreas o similares, se pueden restregar con un cepillo, evitando el uso de jabones o detergentes.

4.14.12. Desechos: los desechos generados en el proceso son mínimos y de fácil tratamiento.

4.14.12.1. Desechos gaseosos: debido a que el tanque de tratamiento preliminar se encuentra cerrado la mayor parte del tiempo, se dan acumulaciones de metano que pueden generar malos olores. Esto se resuelve instalando una chimenea de, al menos, 3 m de altura, por la cual fluyen los gases y se eliminan en el ambiente.

4.14.12.2. Desechos sólidos y pastosos: todos los sólidos, grasas y aceites recogidos en la trampa de grasa, caja de registro y tanque de tratamiento preliminar se pueden eliminar como basura convencional, la cual es recogida por la municipalidad.

4.14.13. Reportes operacionales: de acuerdo con el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales (Decreto N° 33601 MINAE), están exentas de la entrega de esta obligación las viviendas unifamiliares con un sistema de tratamiento individual.

4.14.14. Divulgación y material de sensibilización.

La biojardinera es un ejemplo de tratamiento alternativo de las aguas residuales, lo cual, se generó material de divulgación de la misma, que se utilizará en las visitas que realicen los miembros de la comunidad para conocer el sistema, así mismo el departamento de Gestión Ambiental de la Municipalidad de Jiménez en su programa de educación ambiental visitará los centros educativos para dar a conocer sobre el humedal artificial, por lo que se elaboraron los siguientes materiales de divulgación: Infografía de aguas residuales (Anexo 8), Infografía de la biojardinera (Anexo 9), Manual de procedimientos y mantenimiento de la biojardinera (Anexo 10) y un Video de divulgación sobre la construcción de la biojardinera <https://www.youtube.com/watch?v=U-dTE2Ad59E>. Todos los materiales se elaboraron junto con el proyecto del Laboratorio de Hidrología como parte del Trabajo Final de Graduación.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

En su mayoría, los valores de los parámetros no cumplen con los lineamientos del decreto N°33601 del MINAE, que dicta el reglamento de vertido y reúso de aguas residuales, por lo tanto, se espera que al pasar el tiempo la eficiencia del humedal se estabilice y presente una reducción significativa de los valores iniciales respecto a los finales. En relación con esto, se eliminó el uso de mallas plásticas tanto en las tuberías como en los respiraderos en el humedal, pues se evita el estancamiento de contaminantes en esos puntos.

La biojardinera presenta un flujo volumétrico de 1,75 m³/día, con un tiempo de retención de 5,6 días, el cual logra el valor mínimo recomendado de 24 horas, por ende, resulta eficiente para eliminar los parámetros que necesitan de un tiempo más elevado, primordialmente los sólidos suspendidos totales.

Por su baja complejidad de construcción, estos sistemas son ideales para la degradación de aguas residuales grises, y son una de las alternativas más eficientes y de bajo costo, lo cual facilita su implementación en casas, fincas, colegios, urbanizaciones, comunidades, entre otros.

La eliminación de malla plástica en las tuberías internas incrementa el flujo de las aguas residuales, pues reduce la presencia de sólidos totales y suspendidos, impidiendo así la acumulación de estos entre los agujeros del material. La realización del diseño y la construcción del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HASSFH) del Centro Diurno del Adulto Mayor, para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, servirá como modelo para dar solución al problema planteado en el distrito de Juan Viñas.

Durante el funcionamiento de la biojardinera no se ha percibido malos olores ni presencia de vectores como mosquitos y roedores, lo cual indica que este es un sistema adecuado para ponerlo en marcha en lugares cercanos a la comunidad.

Las biojardineras no requieren mano de obra especializada, pero es necesario realizar operaciones básicas de limpieza en los sistemas de tratamiento preliminar con el fin de aumentar la capacidad depuradora de estos sistemas.

Mejorar la calidad de vida de una comunidad se puede lograr a través de este tipo de iniciativas. Esto no se limita solamente a la zona de estudio, pues en Costa Rica existen poblaciones rurales con contaminación difusa difícil de tratar con plantas convencionales, debido a la relación costo-beneficio, por lo tanto, se podría plantear estos sistemas de humedales artificiales como una solución adecuada.

5.2. Recomendaciones

Incentivar buenas prácticas de separación de residuos sólidos en el área de cocina y en los demás espacios pertinentes, con el fin de evitar obstrucciones en las tuberías y garantizar una mayor duración del lecho del humedal.

Programar muestreos fisicoquímicos de aguas residuales de la biojardinera, esto con el fin de evaluar el desempeño en la remoción de la carga orgánica.

Además de los parámetros analizados desde un principio en esta investigación, realizar análisis microbiológicos, asimismo, la cuantificación de coliformes fecales y nematodos, esto con el fin de que haya un adecuado reuso de las aguas residuales.

Quienes vayan a realizar el mantenimiento de la biojardinera deben establecer un monitoreo mínimo semanal, principalmente cuidar que la zona de sustratos esté libre de desechos naturales como hojas secas, ramas y heces de animales.

6. Bibliografía

- Alfaro, C., Pérez, S. R. y Solano, M. (2013). Saneamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales en el Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional. *Revista de Ciencias Ambientales*, 45(1), 63-71. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/7306/7554>
- Alfaro, E. J. (2019). *Caracterización de la calidad del agua superficiales las cuencas Quebrada Honda y Chiz- Maravilla, Cartago, Costa Rica*. [Tesis de Licenciatura en Biología]. Universidad Nacional de Costa Rica. <https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/18785>
- Alianza por el agua. (2020). *Construye una biojardinera al tiempo que ahorras y ayudas al medioambiente*. <https://vincestudiocr.com/blog/construye-una-biojardinera/>
- Alvarado, S, N., Rojas, Q. A. L y Sibaja, A. F. J. (2019). *Propuesta de plan de gestión integral del recurso hídrico (GIRH) en la Microcuenca Maravilla-Chiz, Cartago, Costa Rica*. [Tesis de Licenciatura en Gestión Ambiental]. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Astorga, Y. (2006). Estado de la Nación. Duodécimo Informe sobre el Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Informe Final. Estado y Gestión del Recurso Hídrico en Costa Rica. https://repositorio.conare.ac.cr/bitstream/handle/20.500.12337/961/451.%20Estado%20y%20gestion%20del%20recurso%20hidrico_XII%20INFORME.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cruz, K., Brenes, A. y Granados M. (2000). *Grado de riesgo de contaminación de los acueductos municipales del cantón de Turrialba*. [Tesis de Maestría Administración de servicios de salud sostenible]. Universidad Nacional de Costa Rica. <http://repositorio.uned.ac.cr/reuned/handle/120809/1062>
- Cuesta, S, M, J., Sánchez, M, F., Crespo, V. G. y Fernández, V. S. (2010). Informe de vigilancia tecnológica. Situación actual de la producción de biogás y de su

aprovechamiento.

[http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/FC08010A98DEE05AC12576030022B6B2/\\$FILE/VT17_Situacion_actual_produccion_biogas_y_aprovechamiento.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/FC08010A98DEE05AC12576030022B6B2/$FILE/VT17_Situacion_actual_produccion_biogas_y_aprovechamiento.pdf)

Cueva, T. E. Y. y Rivadeneira, B. F. A. (2013). *Tratamiento de aguas Residuales Domésticas Mediante un humedal artificial de flujo sub superficial con vegetación herbácea. Informe Técnico del proyecto de investigación.*
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6543/1/T-ESPE-STO%20D.-002470.pdf>

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F. y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales.*
<https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>

Estrada, I. (2010). *Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales.* [Tesis de Tecnóloga de alimentos]. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://core.ac.uk/download/pdf/71396135.pdf>

Fernández-Alba, R. A., Letón, G. P., Rosal, G. R., Dorado, V. M., Villar, F. S. y Sanz, G. J. (2006). Informe de vigilancia tecnológica: Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales, Círculo de innovación en tecnologías medioambientales y energía (CITME).
https://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2_Tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf

Fonseca-Sánchez, A., Madrigal-Solís, H., Núñez-Solís, C., Calderón-Sánchez, H., Moraga-López, G. y Gómez-Cruz, A. (2019). Evaluación de la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección a manantiales en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. *Revista electrónica. UNICIENCIA*, 33.
<https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/11644/15260>

- García, S. J y Corzo, H. A. (2008). *Depuración con humedales construidos: guía práctica de diseño. Construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. Barcelona: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia_and_ACorzo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gómez. L. y García. J. (2018). *Construcción de Humedal artificial a nivel de laboratorio Vivo*. [Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil]. Universidad Católica de Colombia. <https://core.ac.uk/download/pdf/213559407.pdf>
- Hernández, S, R., Collado, F. C. y Batista, L. P. (2014). *Metodología de la investigación*. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Instituto de Desarrollo Rural de Costa Rica (INDER). (2014). *Informe de Caracterización Integral Básica Territorio Turrialba-Jiménez*. <https://www.inder.go.cr/turrialba-jimenez/Caracterizacion-Turrialba-Jimenez.pdf>
- Lahora, A. (2005). *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La Edar de los Gallardos (Almería)*. España: Gestión de aguas del Levante Almeriense, S.A. https://www.researchgate.net/publication/28152115_Depuracion_de_aguas_residuales_mediante_humedales_artificiales_la_EDAR_de_Los_Gallardos_ALMERIA
- Lara, J. A. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. [Tesis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental]. Universidad Politécnica de Catalunya. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/06/depuracionaguasresidualesconhumedalesartificiales.pdf>
- Llagas, W. A. y Gómez, E. G. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones*, 15(17),

85-96.

<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/699/552>

Lozano-Rivas, A. W. (2012). *Fundamentos de Diseño de Plantas Depuradoras de Aguas Residuales*. file:///C:/Users/alfonso/Downloads/Fund.DiseoDepuradorasAR.pdf

Marín, A. M. y Rosales, E. E. (2010). Manual para la construcción y mantenimiento de biojardineras.

Mata-González, R.; Gutiérrez, C. J. y Jurado G. P. (2005). La importancia del tratamiento de aguas residuales y el uso benéfico de biosólidos en México. *Calidad del agua*, 10. https://www.researchgate.net/publication/235413357_La_importancia_del_tratamiento_de_aguas_residuales_y_el_uso_benefico_de_biosolidos_en_Mexico

Mena, P. A. (2014). *Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el Colegio Comfamiliar Siglo XXI, sede campestre corregimiento de San Fernando, Municipio de Pasto, Colombia*. [Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales]. Universidad de Buenos Aires. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n5825_MenaCabrera.pdf

Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Salud. (2007). *Decreto Ejecutivo 33601 Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales*. <https://aresep.go.cr/normativa/868-reglamento-de-vertido-y-reuso-de-aguas-residuales-22-3-2007>

Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Salud. (2008). *Decreto Ejecutivo 34431-MINAE-S. Reglamento del Canon Ambiental por Vertidos*. <https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Decreto%20N%C2%BA%2034431-MINAE-S%20Reglamento%20del%20Canon%20Ambiental%20por%20Vertidos.pdf>

- Ministerio de Planificación y Política Económica. (2010). *Costa Rica: Objetivos de desarrollo del milenio, II Informe País 2010*.
file:///C:/Users/alfonso/Downloads/undp_cr_odm_2010.pdf
- Moncada, C. S. (2011). *Evaluación del diseño de una biojardinera de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises en Zapote, San José*. [Tesis de Licenciatura en Ingeniería Ambiental]. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/2874/Informe_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Mora, A. M. C. (2013). *Evaluación y optimización del funcionamiento de un sistema de humedales artificiales horizontales de flujo subsuperficial como alternativa de tratamiento de aguas residuales ordinarias ubicados en Playa Dominical*. [Tesis de Licenciatura en Química Industrial]. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Osorio, R. F. (2012). *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes: aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales*. Ediciones Díaz de Santos.
<https://elibro.net/es/ereader/biblioutn/62518?page=12>
- Peñuela, G. y Morató, J. (s.f). *Manual de Tecnologías Sostenibles en Tratamiento de Aguas*.
<http://www.comunidadism.es/wp-content/uploads/downloads/2017/10/Manual-de-Tecnologias-Sostenibles-en-Tratamiento-de-Aguas.pdf>
- Pérez, S. R. (2007). *Dimensionamiento de un humedal artificial como alternativa de tratamiento y reusó de aguas domésticas grises en la Finca Experimental Santa Lucia de la Universidad Nacional en Heredia*. [Tesis de Licenciatura en Química Industrial]. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Platzer, M., Cáceres, V. y Fong, N. (2002). *Investigación y experiencias con biofiltros en Nicaragua, Centroamérica*. <https://docplayer.es/21507199-Investigaciones-y-experiencias-con-biofiltros-en-nicaragua-centro-america.html>

Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales (2016). Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA)- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) Ministerio de salud (MS). <https://www.aya.go.cr/Noticias/Documents/Politica%20Nacional%20de%20Saneamiento%20en%20Aguas%20Residuales%20marzo%202017.pdf>

Quipuzco, U. L. E. (2002). Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con *Phragmites australis* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 5(10), 52-57. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/2295/1999>

Ramalho, R. S. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté S.A. https://books.google.com.pe/books?id=30etGjzPXyWC&printsec=copyright&hl=es&source=gbs_pub_info_r#v=onepage&q&f=false

Tousignant, E., Fankhauser, O. y Hurd, S. (1999). Guidance manual for the design, construction and operations of constructed wetlands for rural applications in Ontario. Ontario: Stantec Consulting Ltd. https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/bitstream/handle/10214/15203/FDMR_wetlands_manual.pdf?sequence=1&isAllowed=y

7. ANEXOS

Anexo 1. Ficha de inspección del sitio donde se va a construir la biojardinera

Descripción	Cumple	No cumple	Observaciones de campo
Ubicación del sitio donde se va a construir la biojardinera con respecto al vertedero de la casa	x		El área para la construcción de la biojardinera se encuentra en óptimas condiciones.
Pendiente del terreno (5 %)	x		
Textura del suelo	x		
Área del sitio	x		
Movimiento de agua en el suelo (drenajes)	x		
Vegetación e infraestructura preexistente	x		

Fuente: elaboración propia.

Anexo 1. Formulario de toma de datos.

Formulario de toma de datos						
pH	Temperatura (TC°)	Conductividad eléctrica	Color	Olor y turbiedad	Caudal	Observaciones de campo
6,8	26,2	512	Coloración gris	Presenta olor a grasa y turbio	No fue posible obtener dato	Se observa espuma producto de jabones

Fuente: elaboración propia.

Anexo 2. Bitácora de fases constructivas.

Bitácora de fases constructivas				
Día	Fechas	Actividad realizada	Plazo	Resultado
1	15/12/2021	1. Excavación de los espacios del humedal (tratamiento preliminar, biojardinera, tanque recolector de agua tratada)	Se realiza la actividad el mismo día	Concluido
2	12/01/2022	1. Verificar las medidas (excavación, distancias de tanques y humedal). 2. Preparación de la tubería. 3. Se colocan los tanques de tratamiento preliminar y tanque de recolección de agua tratada.	Se realiza la actividad el mismo día	Ejecutado
3		1. Se impermeabiliza la excavación, para luego agregar el sarán. 2. Se realiza la conexión de la tubería PVC, para luego		

	13/01/2022	colocarla en la excavación de la biojardinera. 3. Se distribuyen tres tubos de PVC dentro de la biojardinera como previstas para muestreos. 4. Se coloca la piedra bola en los dos extremos, seguidamente se agrega la piedra cuarta.	Se realiza la actividad el mismo día	Ejecutado
4	14/01/2022	1. Se realiza una pequeña acera alrededor de la biojardinera	Se realiza la actividad el mismo día	Concluido
5	2/02/2022	1. Se realiza la siembra de las plantas en el humedal	Se realiza la actividad el mismo día	Finalizado

Fuente: elaboración propia.

Anexo 4. Muestra de cálculos.

Cálculo del tiempo de retención hidráulica

$$t = \frac{0,37 * 44,3 \text{ m}^2 * 0,6\text{m}}{1,75 \text{ m}^3/\text{d}} = 5,6 \text{ días}$$

Cálculo del área superficial del humedal

$$S = \frac{1,75\text{m}^3/\text{d}}{0,08\text{m}/\text{d}} \ln \left[\frac{\frac{152\text{mg}}{l}}{\frac{20\text{mg}}{l}} \right] = 44,5 \text{ m}^2$$

Anexo 5. Resultados de análisis fisicoquímicos para la muestra de aguas residual gris, entregada el día 10 de septiembre del 2020.



LSQ-PG01-R06

Versión: 05/ Revisión: 00

Rige a partir de: 01 de setiembre del 2020

INFORME DE ANÁLISIS

Solicitud: Colaboración AJUPIVA
Solicitante: Laboratorio de Hidrología Ambiental
Contacto: M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez
Tel: 2277-3494

Recepción: 2020-09-10
Inicio del análisis: 2020-09-10
Fin del análisis: 2020-10-01
Informe: 2020-10-05

Resultado del análisis físico-químico realizado a una muestra de agua residual, la cual fue denominada de la siguiente manera:

Cuadro N° 1. Identificación

Código LASEQ	Descripción (código y/o nombre)
19283	AJUPIVA

Cuadro N° 2. Resultados

Parámetro	Código LASEQ	Valor Recomendado*
pH ($\pm 0,02$)	8,30	6 a 9
Temperatura ($\pm 0,2$ °C)	19,2	15 °C \leq T \leq 40 °C
Sólidos Sedimentables ($\pm 0,05$ mL/L*h)	2,00	1 mL/L*h
Demanda Química de Oxígeno (± 22 mg/L)	425	150 mg/L
Sustancias Activas al Azul de Metileno ($\pm 0,03$ mg/L)	0,55	5 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno ($\pm 3,2$ mg/L)	41,0	50 mg/L
Sólidos Suspendidos Totales ($\pm 4,0$ mg/L)	452,0	50 mg/L
Grasas y Aceites ($\pm 2,1$ mg/L)	71,5	30 mg/L

ND: No detectable NC: No cuantificable

* Valor máximo admisible (mg/L) según Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales: DECRETO N° 33601-MINAE-S.

Editado e impreso por: LASEQ

Todos los Derechos Reservados

COPIA NO CONTROLADA

"Al Servicio del Sector Productivo y la Comunidad Nacional"

Página 1 de 2

Fuente: Laboratorio de análisis y servicios químicos (2020).

Anexo 6. Resultados de análisis fisicoquímicos para la muestra de aguas residual gris, entregada el día 26 de febrero del 2021.



LSQ-PG01-F06
Versión: 07/ Revisión: 00
Rige a partir de: 24 de marzo 2021

INFORME DE ANÁLISIS

Consecutivo: LASEQ-10547-21
Solicitante: LABORATORIO DE HIDROLOGÍA AMBIENTAL
Establecimiento: NA
Atención: Alicia Fonseca Sánchez
Tel: 2277-3494

Muestreo:
Recepción: 2021/02/26
Inicio del análisis: 2021/02/26
Fin del análisis: 2021/03/17
Informe: 2021/04/05

Resultado del análisis físico-químico realizado a una muestra de agua residual, la cual fue denominada de la siguiente manera:

Cuadro N° 1. Identificación

Código LASEQ	Descripción (código y/o nombre)
19852	AJUPIVA

Cuadro N° 2. Resultados

Parámetro	Código LASEQ 19852	Valor Recomendado*
pH (± 0.02)	8.32	6 a 9
Temperatura (± 0.2 °C)	21,7	15 °C \leq T \leq 40 °C
Sólidos Sedimentables (± 0.05 mL/L*h)	1,90	1 mL/L*h
Demanda Química de Oxígeno (± 19 mg/L)	347	150 mg/L
Sustancias Activas al Azul de Metileno (± 0.9 mg/L)	17,4	5 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (± 18 mg/L)	219	50 mg/L
Sólidos Suspendidos Totales (± 22 mg/L)	504	50 mg/L
Grasas y Aceites (± 17 mg/L)	262	30 mg/L

* Valor máximo admisible (mg/L) según Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales: DECRETO N° 33601-MINAB-S.

Notas:

1. La muestra fue tomada y llevada al Laboratorio por la parte interesada.
2. Metodología modificada basada en: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22nd Ed.2012.
3. La incertidumbre expandida reportada se calculó con un nivel de confianza cercano al 95% utilizando un factor de cobertura k=2.
4. Este informe no podrá ser modificado en forma parcial o total sin la aprobación del LASEQ.
5. Los resultados de los análisis de este informe se refieren solamente a la muestra descrita en el mismo.
6. Para cualquier consulta refiérase al número de solicitud.

Editado e impreso por: LASEQ

Todos los Derechos Reservados
COPIA NO CONTROLADA

Página 1 de 2

"Al Servicio del Sector Productivo y la Comunidad Nacional"

Fuente: Laboratorio de análisis y servicios químicos (2021).

Anexo 7. Resultados de análisis fisicoquímicos para la muestra de aguas residual gris, entregada el día 14 de abril del 2021.



LSQ-PG01-F06
Versión: 07/ Revisión: 00
Rige a partir de: 24 de marzo 2021

INFORME DE ANÁLISIS

Consecutivo: LASEQ-10602-21 Muestreo: 2021/04/14
Solicitante: LABORATORIO DE HIDROLOGÍA AMBIENTAL Recepción: 2021/04/14
Establecimiento: NA Inicio del análisis: 2021/04/14
Atención: Alicia Fonseca Sánchez Fin del análisis: 2021/05/07
Tel: 2277-3494 Informe: 2021/05/11

Resultado del análisis físico-químico realizado a una muestra de agua residual, la cual fue denominada de la siguiente manera:

Cuadro N° 1. Identificación

Código LASEQ	Descripción (código y/o nombre)
19954	AJUPTIVA

Cuadro N° 2. Resultados

Parámetro	Código LASEQ 19954	Valor Recomendado*
pH (± 0,02)	9,84	6 a 9
Temperatura (± 0,2 °C)	20,4	15 °C < T <= 40 °C
Sólidos Sedimentables (± 0,05 mL/L*h)	2,70	1 mL/L*h
Demanda Química de Oxígeno (± 183 mg /L)	1218	150 mg/L
Sustancias Activas al Azul de Metileno (± 0,5 mg/L)	10,9	5 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (± 15 mg/L)	196	50 mg/L
Sólidos Suspendidos Totales (± 22 mg/L)	309	50 mg/L
Grasas y Aceites (± 2,1 mg/L)	31,5	30 mg/L

* Valor máximo admisible (mg/L) según Reglamento de Vertido y Retiro de Aguas Residuales: DECRETO N° 33601-MDNAE-S.

Notas:

1. La muestra fue tomada y llevada al Laboratorio por la parte interesada.
2. Metodología modificada basada en: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22nd Ed.2012.
3. La incertidumbre expandida reportada se calculó con un nivel de confianza cercano al 95% utilizando un factor de cobertura k=2.
4. Este informe no podrá ser modificado en forma parcial o total sin la aprobación del LASEQ.
5. Los resultados de los análisis de este informe se refieren solamente a la muestra descrita en el mismo.
6. Para cualquier consulta refiérase al número de solicitud.

Editado e impreso por: LASEQ

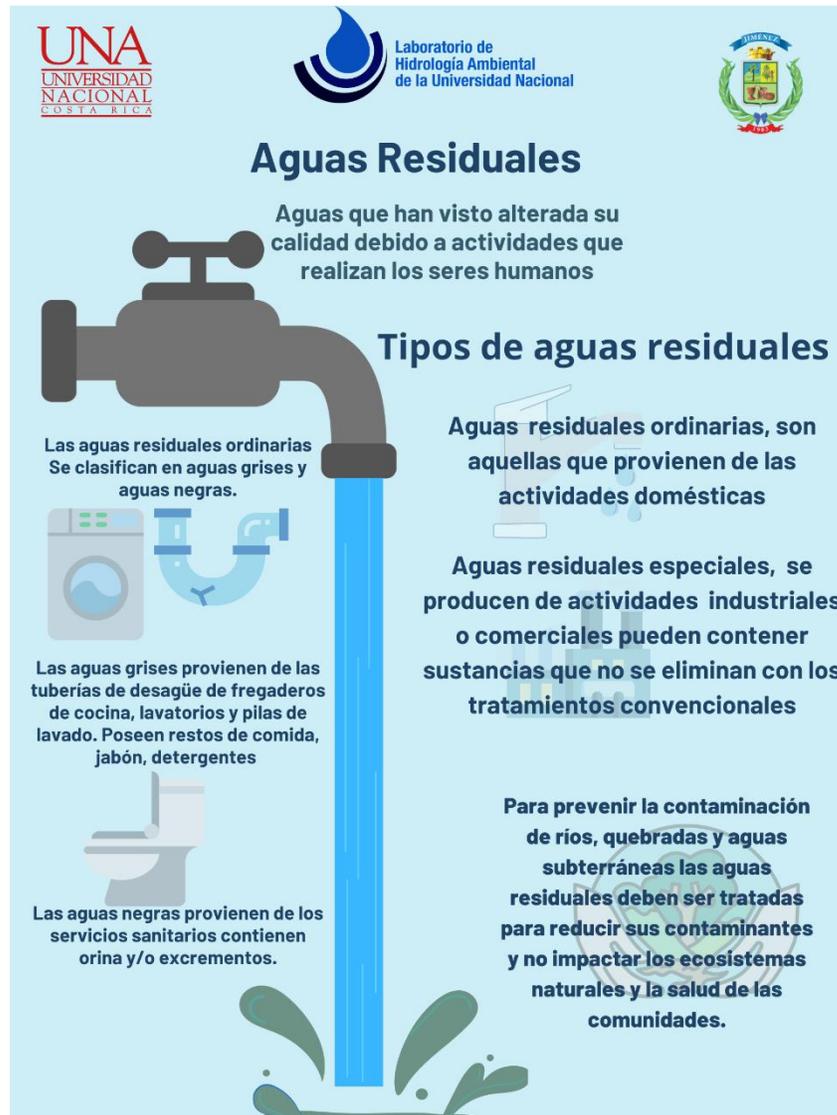
Todos los Derechos Reservados
COPIA NO CONTROLADA

Página 1 de 2

"Al Servicio del Sector Productivo y la Comunidad Nacional"

Fuente: Laboratorio de análisis y servicios químicos (2021).

Anexo 8. Infografía de aguas residuales



Fuente: Monroy y Sánchez (2022).

Anexo 9. Infografía de la biojardineria.



BIOJARDINERA / HUMEDAL ARTIFICIAL

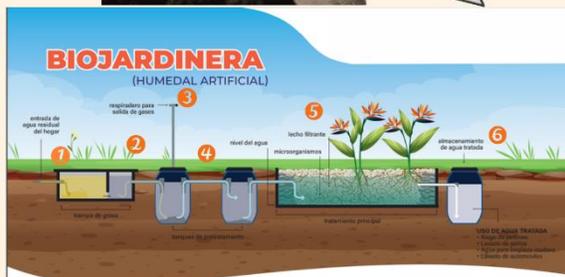
¿Qué es una Biojardineria?

- Una biojardineria o humedal artificial es un sistema alternativo de tratamiento de aguas residuales que por medio de filtros naturales tales como piedra de diferente granulometría, raíces de las plantas y microorganismos permite la depuración (limpieza) del agua, la cual posteriormente puede ser utilizada para diferentes usos como riego de jardines, uso en el servicio sanitario, lavado de aceras entre otros.



La Biojardineria o humedal artificial consta de varias partes:

1. Trampa de grasa (para evitar el paso de sólidos, grasas y aceites)
2. Caja de registro (evita paso de sólidos y reduce velocidad de las aguas a la hora de entrada)
3. Tanques de pretratamiento (se encargan de separar los sólidos más pequeños que no se eliminaron en los pasos anteriores, los cuales se sedimentan en el fondo y permite separar aceites y grasas en su superficie)
4. Respiradero (tubería que permite la salida de los gases que generan las aguas residuales)
5. Biojardineria (el tratamiento principal se desarrolla en esta parte, contienen las piedras y las plantas. Las aguas entran a la biojardineria y se distribuyen a lo largo de la misma, donde interactúan con el filtro formado por piedras y las raíces de las plantas las cuales funcionan como un biofiltro limpiando el agua residual)
6. Tanque receptor (recibe el agua tratada, de aquí puede ser reutilizada para riego o vertida en un cauce con las características de calidad aptas para ser vertida)

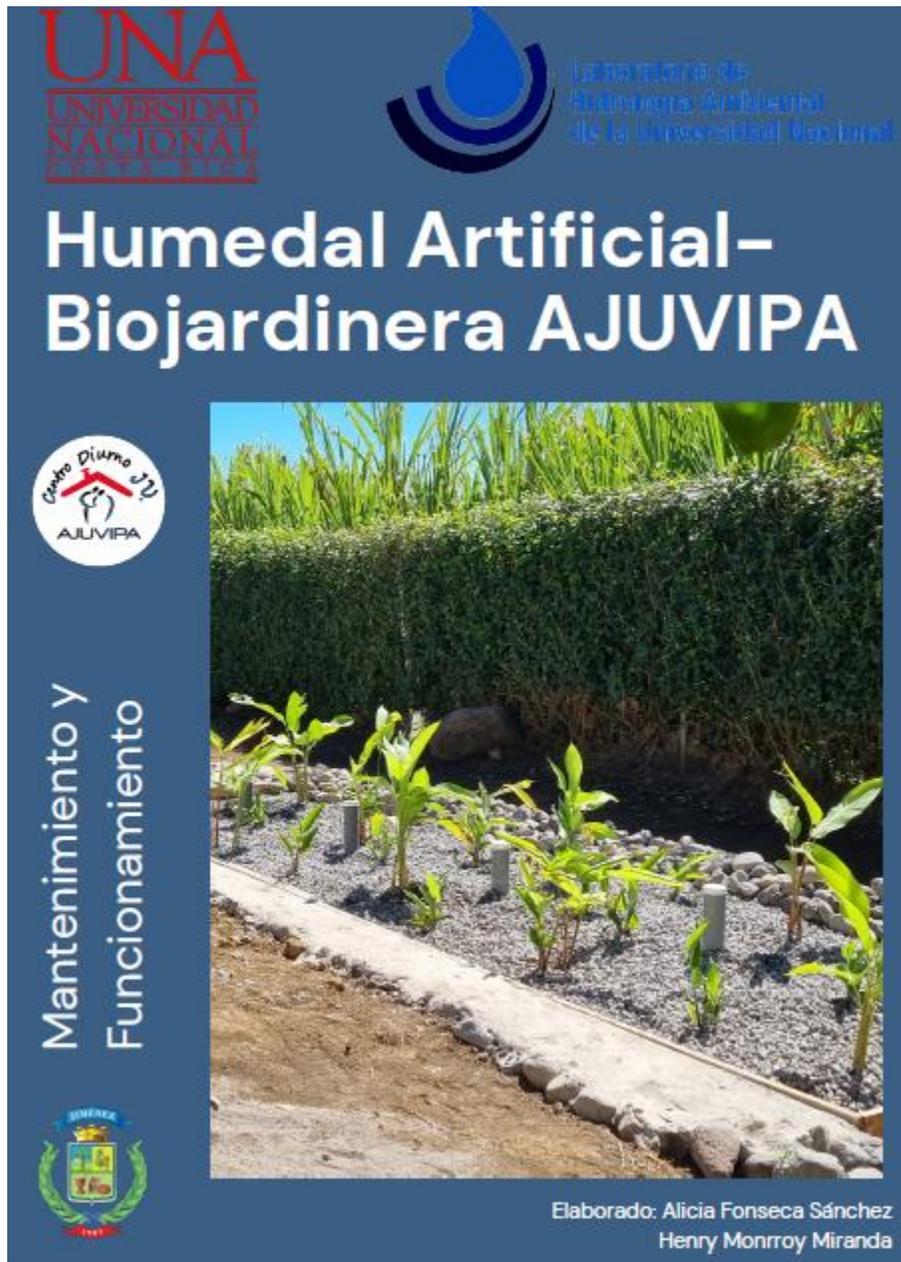


Universidad Nacional
Laboratorio de Hidrología Ambiental
Teléfono: 2277 34 94
<https://www.biologia.una.ac.cr/index.php/laboratorios/laboratorio-hidrologia-ambiental>
lab-hidrologia-ambiental@una.ac.cr
https://www.youtube.com/channel/UCfMCrcxvCpQ3vqHvR..._LA

Imagen tomada del proyecto Gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) como herramienta, para la adaptación al cambio climático (DESPO UNA).

Fuente: Monrroy y Sánchez (2022).

Anexo 10. Manual de procedimientos y mantenimiento de la biojardinera



Contenidos



01 Aguas Residuales

03 ¿Qué es un Humedal artificial?

04 Biojardinera de AJUVIPA

05 Funcionamiento de la Biojardinera

06 Mantenimiento de la Biojardinera



Aguas Residuales

Aguas que han visto alterada su calidad debido a actividades que realizan los seres humanos



Tipos de aguas residuales



Aguas residuales ordinarias

- Son aquellas que provienen de las casas
- Producidas de actividades domésticas



Aguas residuales especiales

- Son aquellas generadas en los procesos industriales o comerciales
- Contienen sustancias químicas que no se eliminan por un tratamiento convencional

Aguas residuales ordinarias

Se clasifican en aguas grises y aguas negras.

Las **aguas grises** consisten en todas aquellas aguas utilizadas que tienen restos de comida, jabón, detergentes y demás desechos que son generados en labores cotidianas domésticas como limpieza y preparación de alimentos.

Proviene de las tuberías de desagüe de fregaderos de cocina, lavatorios y pilas de lavado.

Las **aguas negras** provienen de los servicios sanitarios contienen orina y/o excrementos.



01

Problemática de Aguas Residuales

En la comunidad de Juan Viñas como en gran parte del territorio nacional existe un conflicto ambiental por la amenaza de contaminación a las aguas subterráneas, ríos y quebradas debido al vertido de aguas residuales sin previo tratamiento.

Los vertidos son producto de actividades realizadas por el ser humano. Por lo que dichos cuerpos de agua están siendo contaminados por las aguas residuales, lo que además, llega a afectar los ecosistemas aledaños y la salud de las comunidades.



Se planteó y realizó la construcción de una biojardinera como sistema de tratamiento alternativo de bajo costo para resolver un problema ambiental específico. Además, la construcción busca ser un proceso de sensibilización y educación hacia la comunidad, el cual permita que las personas adquieran conciencia y evidencien que estos sistemas pueden ser una posible solución al problema del manejo de las aguas residuales.

¿Qué es un humedal Artificial?

Una biojardinera o humedal artificial es un sistema alternativo de tratamiento de aguas residuales que por medio de filtros naturales tales como piedra de diferente granulometría, raíces de las plantas y microorganismos permite la depuración (limpieza) del agua, la cual posteriormente puede ser utilizada para diferentes usos como riego de jardines, uso en el servicio sanitario, lavado de aceras entre otros.

La Biojardinera o humedal artificial consta de varias partes:

1. Trampa de grasa (para evitar el paso de sólidos, grasas y aceites)
2. Caja de registro (evita paso de sólidos y reduce velocidad de las aguas a la hora de entrada)
3. Tanques pretratamiento (se encargan de separar los sólidos más pequeños que no se eliminaron en los pasos anteriores, los cuales se sedimentan en el fondo y permite separar aceites y grasas en su superficie)
4. Respiradero (tubería que permite la salida de gases que generan las aguas residuales)
5. Biojardinera (el tratamiento principal se desarrolla en esta parte, contienen las piedras y las plantas. Las aguas entran a la biojardinera y se distribuyen a lo largo de la misma, donde interaccionan con el filtro formado por piedras y las raíces de las plantas las cuales funcionan como un biofiltro)
6. Tanque receptor (recibe el agua tratada de aquí puede ser reutilizada para riego o vertida en un cauce con las características de calidad aptas para ser vertida)

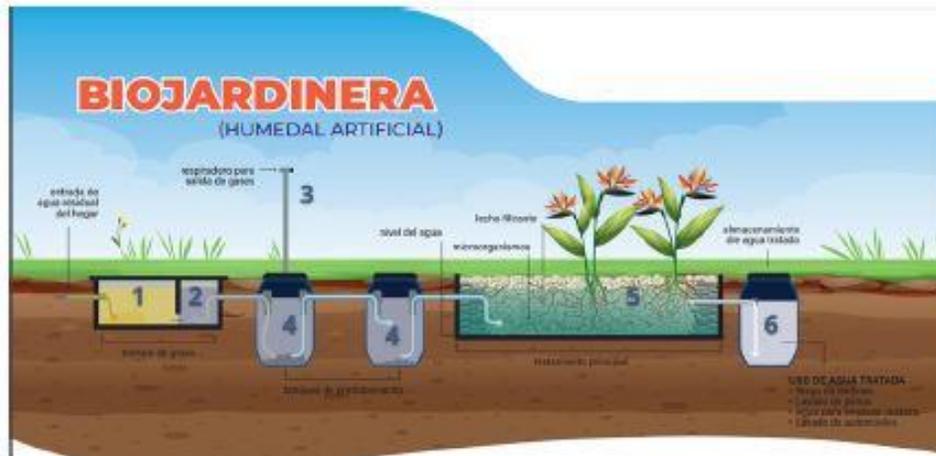


Imagen tomada del proyecto Gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) como herramienta, para la adaptación al cambio climático IDESPO UNA.

03

Biojardinera de AJUVIPA



El Laboratorio de Hidrología Ambiental de la Universidad Nacional en colaboración con ACEPESA y la Municipalidad de Jiménez realizó la construcción de la biojardinera en el Centro Diurno de Juan Vías para el adulto mayor.



La construcción de dicha biojardinera responde a las actividades del proyecto de investigación y extensión "Procesos de Gestión Integrada del Recurso Hídrico en las subcuencas Chiz-Maravilla y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. Código SIA: 0015-17 (2018-2021)" cuyo objetivo general se enfocó en fortalecer la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) mediante la consolidación de un grupo gestor, participación de actores claves e implementación de herramientas de protección del recurso hídrico para la mejora de la salud ambiental de la microcuenca de los ríos Quebrada Honda, Maravilla y Chiz, Cartago, Costa Rica.

La construcción inició en diciembre 2021 con la excavación de los huecos, en enero 2022 se realizó la construcción como tal, y la siembra en febrero 2022.

Las dimensiones de la misma son de 0.6m de profundidad por 2m de ancho y 8m de largo, para tratar un caudal aproximado de 1,75 m³/día. El agua a tratar proviene de las actividades de limpieza y preparación de alimentos.

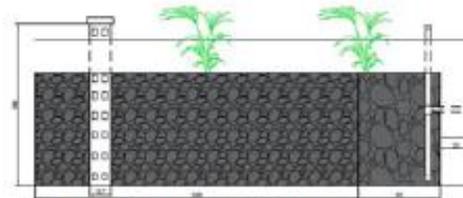
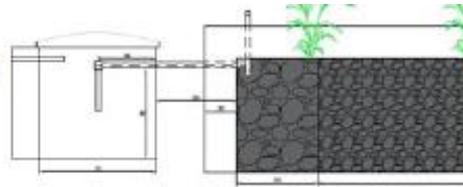
El humedal de flujo superficial, se encarga de tratar los efluentes de aguas residuales del hogar, específicamente las aguas grises producidas en distintos puntos del domicilio.



Funcionamiento de la Biojardinera

El proceso consiste en dirigir estas aguas por medio de tuberías hacia la biojardinera, de modo que los sustratos y la vegetación del equipo se encarguen de purificar el líquido para que pueda ser reutilizado o desechado. En este caso se tienen tuberías que transportan los efluentes provenientes de varios puntos del centro diurno, específicamente: lavamanos, fregaderos, pila para lavar ropa y lavadora.

Durante las horas de mayor trabajo doméstico, usualmente en la mañana entre las 6:00 y 9:00 am, a la mitad del día entre 11:00 am y 1:00 pm y en la tarde, entre 2:00 y 3:00 pm., se maneja un caudal aproximado de 1.75 m³/día. Se debe tomar en cuenta que durante parte del día existe un consumo de agua menor (aunque no despreciable), por lo que es poco común que deje de ingresar agua a la biojardinera por periodos largos de tiempo.



Proceso de tratamiento

El sistema de tratamiento consta de distintas partes necesarias para el funcionamiento del proceso, el flujo de agua se diseña de modo que el líquido avance por gravedad, es decir, existe un desnivel entre la salida de agua en los puntos del centro diurno, hasta la entrada de la biojardinera, que no permite que haya estancamientos o las aguas se devuelvan. Se aconseja que exista un desnivel de al menos 1°, es decir, una diferencia de altura de 17 cm por cada 10 m de largo aproximadamente.

El procesamiento de las aguas a través de cada una de las partes ocurre en el siguiente orden: trampa de grasas, caja de registro, tanque de tratamiento preliminar, biojardinera, tanque receptor de agua tratada y drenaje.

El sistema de tratamiento trabaja principalmente en el día, por un periodo de 9 horas. Se utiliza todos los días de la semana de lunes a viernes y todas las semanas del año, a excepción de los días sábados y domingos que no trabajan en el centro diurno.

El sistema trabaja de forma continua, de modo que cada vez que ingresan aguas residuales, el tratamiento de las mismas inicia de inmediato.

Mantenimiento de la Biojardinera

Se debe realizar mantenimiento y limpieza de la trampa de grasa, caja de registro, tanque de tratamiento preliminar y tanque de recolección de agua tratada.

Equipo

Colador: Se utilizara un colador construido con malla plástica o metálica, con una porosidad suficiente para poder retirar los sólidos que se encuentran en la trampa de grasa, caja de registro y tanque de tratamiento preliminar.

Cepillo: las tuberías de entrada y salida de biojardinera se deben de limpiar periódicamente (1 o 2 veces al mes) con un cepillo adecuado, que se capaz de retirar las acumulaciones sólidas.

En su operación se busca el transporte de las aguas a través del sistema por medio de la gravedad, es decir, se procura desde el inicio que exista un desnivel en las tuberías para que el líquido fluya por sí solo. Por esta razón, no existen actividades que requieran de una operación por parte del personal.

Se realizaran chequeos a las aguas en cada uno de los procesos involucrados, para verificar que el nivel de las aguas se mantiene en la altura correcta, la cual será el nivel de la tubería de salida en la trampa de grasa, caja de registro y los tanques. De ser posible, se realizaran análisis fisicoquímicos para evaluar los niveles de sólidos totales, sólidos suspendidos, pH, DBO y DQO, los cuales se comparan con los estándares requeridos por el Reglamento de Vertido y Reuso de aguas Residuales (Decreto N° 33601 MINAE).





Mantenimiento

Trampa de grasas:

Se debe retirar los restos de comida y basura, al menos, una vez por semana, para que no atasquen la salida del equipo y haya un buen avance de las aguas, en caso de atasco o acumulación de sólidos, estos se deben retirar lo más pronto posible para que las aguas no se rebalsen. Se debe utilizar un cepillo resistente, ya sea de plástico o metálico para limpiar las paredes de la trampa cuando ocurran acumulaciones de residuos en las mismas.



Caja de registro:

De forma similar a la trampa de grasa, se limpia, al menos, una vez por semana y se retira del fondo cualquier sólido atrapado, en caso que exista un buen paso de agua, se debe limpiar la entrada y salida por posibles obstrucciones en las tuberías de conexión, también es necesario usar un cepillo para asear las paredes y eliminar los desechos acumulados en las mismas.



Tanques de tratamiento preliminar:

Se debe recoger los aceites y grasas en la superficie una o dos veces por semana, especialmente cuando se note una capa de "nata" espesa. Los sólidos sedimentados se recogen con un colador de un largo adecuado, de modo que el contacto con las aguas sea mínimo, debido a la abundancia de sólidos en el tanque de tratamiento preliminar, se debe de vaciar, al menos, una vez cada tres meses o cuando se note que las paredes están sucias por el exceso de sólidos adheridos; una vez hecho esto se pasa a limpiar con un cepillo de cerdas duras y largo adecuado para alcanzar el fondo del tanque.

Mantenimiento



Biojardinera:

El sustrato superior se debe mantener libre de residuos vegetales como hojas secas, ramas y basura en general. En caso de zonas de mucho calor, con largas horas de luz solar directa, se puede utilizar un toldo de vivero para proteger la vegetación. En caso que el terreno tenga animales como perros, gallinas, cerdos y similares, el área alrededor de la biojardinera se debe cercar para que no exista la posibilidad de entrada a la zona con el sustrato. Se deben sustituir las plantas secas o podridas.



Tanque recolector del agua residual tratada:

El tanque requiere una limpieza mínima comparado a los otros procesos, cuando se retire el agua de reuso, se puede verificar el estado de las paredes y en caso que existan acumulaciones calcáreas o similares, se pueden restregar con un cepillo, evitando el uso de jabones o detergentes.



Desechos

Los desechos generados en el proceso son mínimos y de fácil tratamiento.

Desechos gaseosos: Debido a que el tanque de tratamiento preliminar se encuentra cerrado la mayor parte del tiempo, se dan acumulaciones de metano que pueden generar malos olores, esto se eliminan por medio del respiradero de, al menos, 3 m de altura, por la cual fluyen los gases.

Desechos sólidos y pastosos: Todos los sólidos, grasas y aceites recogidos en la trampa de grasa, caja de registro y tanque de tratamiento preliminar se pueden eliminar como basura convencional, la cual es dispuesta con los desechos ordinarios.

Contacto



Agradecimiento especial:

Universidad Nacional
Laboratorio de Hidrología Ambiental



Teléfono :2277 34 94

<https://www.biologia.una.ac.cr/index.php/laboratorios/laboratorio-hidrologia-ambiental>

lab.hidrologia.ambiental@una.cr

https://www.youtube.com/channel/UCHMCrciuvCpQ3vqHpVR-_iA

Video

2022



Fuente: Monroy y Sánchez (2022)