

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DE BIOSISTEMAS

“Análisis del ciclo de vida de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales domésticas ubicados en el cantón de Monteverde, provincia de Puntarenas”

TIPO TFG:
PROYECTO DE GRADUACIÓN

ESTUDIANTE:
SOFIA SOLIS NARANJO

CARNET:
B97667

DIRECTOR:
ING. RONALD AGUILAR ÁLVAREZ, PH.D

ASESORES:
ING. MARÍA JOSÉ RODRÍGUEZ VASQUEZ, PH.D

ING. PABLO CORNEJO, PH.D

2025

Acta de la Presentación Oral del Trabajo Final de Graduación ante el Tribunal Examinador para Optar por el Grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas
 Modalidad: Proyecto de Graduación
 Defensa pública mixta

Lugar: Sala de Audiovisuales 1, Facultad de Ingeniería y zoom Meeting ID: 852 3048 9272
 Passcode: 108550

Fecha: 16/07/2025

Hora: 09:00 am

Consecutivo: 12-2025

Artículo 1: Presentación de los miembros del Tribunal del Trabajo Final y de la estudiante. Se explica el procedimiento que consiste en la presentación oral de 45 min, el espacio para preguntas, la deliberación del Tribunal y la comunicación del acuerdo, según los artículos 26 y 27 del Reglamento de Trabajos Finales de Graduación.

Tribunal Examinador

MIEMBROS DEL TRIBUNAL	ROL
Ph.D. Ronald Aguilar Álvarez	Director TFG
Ph.D. María José Rodríguez Vásquez	Miembro del Comité Asesor
Ph.D. Pablo K. Cornejo	Miembro del Comité Asesor
Ph.D. María Melissa Rojas Downing	Lectora Invitada
Ph.D. Alejandra Rojas González	Presidenta

Artículo 2: Exposición oral del estudiante

Nombre del TFG: "Análisis del ciclo de vida de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales domésticas ubicados en el cantón de Monteverde, provincia de Puntarenas"

NOMBRE DEL POSTULANTE	CARNÉ
Sofía Solís Naranjo	897667

Artículo 3: Sesión de preguntas sobre aspectos propios del trabajo presentado

Artículo 4: Deliberación del Tribunal. Sale de la sala de sesiones el sustentante para la deliberación del Tribunal. Se le avisará a la sustentante vía llamada telefónica o el medio acordado con la estudiante.

Observaciones: *Atender las observaciones de Melissa Rojas en el documento*

Artículo 5: Producto de la deliberación se realiza la votación pública:

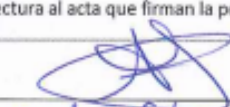
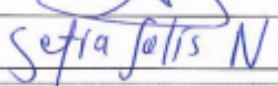
Votación pública obteniendo : 5 votos a favor y 0 votos en contra.

Voto disidente: *No hay*

Calificación del Trabajo Final de Graduación:	Aprobado	☒	No aprobado	☐
Aprobación con distinción el Trabajo Final de Graduación:	Sí	☒	No	☐

Artículo 6: La persona que preside el Tribunal comunica a la persona postulante el resultado de la deliberación y se le declara acreedora al grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas. Se le indica la obligación de presentarse al acto público de graduación, para ser juramentada y recibir el diploma correspondiente.

Se da lectura al acta que firma la persona que preside el Tribunal Examinador y la persona postulante, a las 11:05 horas.

 _____ Ph.D. Alejandra Rojas González, persona que preside
 _____ Sofia Solís Naranjo, Estudiante

Nota: De conformidad con los artículos 28, 29 y 36, el estudiante deberá entregar las copias con la versión final, incluyendo las modificaciones formuladas en ocasión de la presentación pública, un resumen de 200-500 palabras y la autorización de publicación del trabajo en el repositorio Kéruwá. El director del trabajo final de graduación será responsable de que se realicen las correcciones propuestas en la presentación pública y de que la versión final del documento quede debidamente confeccionada.

DEDICATORIA

A mi papá, por ser un pilar fundamental en mi vida, nada de esto sería posible sin usted

A mi familia, gracias por todo el apoyo durante estos años

A mi Abuela Amparo

A Homero, Lucrecia y Juli

A mi profesor Naun Arce, gracias por inculcarme la ciencia en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Ronald Aguilar, gracias de corazón. Ha sido una figura clave en estos últimos años, y sinceramente, no hay palabras que alcancen para expresar lo agradecida que estoy. Gracias por todo lo que me enseñó, por las experiencias compartidas, y por cada gira a Monteverde llena de buenos momentos. Gracias también por confiar en mí, por abrirme las puertas como su asistente de investigación y darme la oportunidad de representar proyectos en distintos congresos y abrirme las puertas a oportunidades nuevas.

Gran parte de mi crecimiento, tanto personal como profesional en la universidad, se lo debo a usted. Quién iba a pensar que una gira a Talamanca me regalaría a un gran mentor.

A la profesora María José Rodríguez y a Pablo Cornejo, gracias por estar siempre dispuestos a ayudarme y por acompañarme de cerca en todo este proceso. Nada de esto habría sido posible sin su apoyo. Gracias por ser una guía tan valiosa en mi camino.

A Rebeca Gamboa por siempre tener toda la disposición de ayudarme en todo lo que fuera necesario y por siempre tener una respuesta ante mis consultas.

A Daniel y David García por siempre tener la disposición de ayudarme.

A mis amigos de la universidad, Harold, Pamela, Mariana, Samuel, Santiago, Rebeca, Zhen, Jafeth, Juan Pablo, Valeria y Ignacio. Sin ustedes la etapa de universidad no hubiera sido la misma. Les agradezco por todo el recorrido juntos y experiencias vividas.

RESUMEN

Actualmente, en Monteverde, una zona rural con alta afluencia turística estacionaria, existe una clara falta de tratamiento adecuado de aguas residuales, ya que los sistemas de tratamiento existentes no están dimensionados para manejar los picos de caudal ocasionados por el turismo. Ante esta problemática, se busca promover el uso de humedales artificiales como una solución sostenible y eficiente para el tratamiento de aguas residuales en esta región. Para ello, se llevó a cabo un análisis de ciclo de vida (ACV) enfocado en dos sitios de estudio específicos: la Escuela Creativa y el Hotel Los Pinos, con el objetivo de evaluar el impacto ambiental y la eficacia del tratamiento mediante humedales artificiales. Este análisis permitió examinar tanto los materiales de construcción utilizados en la infraestructura del humedal, como los parámetros de calidad del agua antes y después del tratamiento, ofreciendo una visión integral de su desempeño ambiental y funcional. Para realizar el ACV se utilizó el software SimaPro, que facilitó la evaluación detallada de las categorías de impacto como cambio climático, eutrofización en agua dulce y eutrofización en agua salada. Dentro de los materiales analizados, tuberías de PVC, piedra cuarta, piedra cuartilla y estañones de HDPE demostraron tener una contribución significativa en estas categorías. De modo que, la posible sustitución o reemplazo de estos materiales por alternativas con menor carga ambiental podría representar una estrategia clave para mejorar la sostenibilidad y desempeño ambiental de los humedales artificiales en Monteverde. Se logró evidenciar que los humedales artificiales generan un menor impacto ambiental con respecto a las categorías de eutrofización de agua dulce y salada. Este enfoque no solo aporta a la solución del déficit en el tratamiento de aguas residuales en una zona rural con características particulares, sino que también contribuye a minimizar el impacto ambiental asociado con la construcción y operación de los sistemas, garantizando una gestión más eficiente y amigable con el entorno natural, especialmente en contextos turísticos donde la presión sobre los recursos hídricos es alta y variable.

Palabras clave: Humedal artificial, análisis de ciclo de vida, tratamiento de aguas residuales.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación.....	1
1.2 Delimitación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Marco Conceptual.....	4
2.1.1 Aguas residuales.....	4
2.1.2 Humedales artificiales.....	5
2.1.3 Elementos del humedal artificial subsuperficial horizontal.....	6
2.1.4 Análisis de ciclo de vida.....	7
2.2 Antecedentes.....	9
3. METODOLOGÍA.....	10
3.1 Sitio de Estudio.....	10
3.2 Inventario.....	15
3.3.1 Análisis de sensibilidad e incertidumbre.....	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
4.1. Inventario.....	19
4.1.1 Escuela Creativa.....	19
Unidad 1: Interceptor de sólidos.....	22
Unidad 2: Humedal artificial.....	23
Unidad 3: Tanque recolector.....	26
Caracterización del agua residual y caudal.....	27
4.1.2 Hotel Los Pinos.....	28
Unidad 1: Interceptor de sólidos.....	31
Unidad 2: Humedal artificial.....	35
Unidad 3: Tanque recolector.....	37
Caracterización del agua residual y caudal.....	38
4.2 Evaluación e interpretación del impacto ambiental.....	39
4.2.1 Escuela Creativa.....	40
Unidad 1: Interceptor de sólidos.....	40
Unidad 2: Humedal artificial.....	42
Unidad 3: Tanque recolector.....	44
Comparación entre línea base y sistema de tratamiento.....	46
Análisis de sensibilidad y incertidumbre.....	49
4.2.2 Hotel Los Pinos.....	50

Unidad 1: Interceptor de sólidos.....	50
Unidad 2: Humedal artificial.....	52
Unidad 3: Tanque recolector.....	54
Comparación entre línea base y sistema de tratamiento.....	55
Análisis de sensibilidad e incertidumbre.....	58
4.3 Estrategias de mitigación.....	59
4.3.1 Escuela Creativa.....	60
4.3.2 Hotel Los Pinos.....	61
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
5.1 Conclusiones.....	63
5.2 Recomendaciones.....	64
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
7. APÉNDICE.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	<i>Esquema conceptual ACV</i>	8
Figura 2.	<i>Ubicación del Centro Educativo Creativa</i>	11
Figura 3.	<i>Ubicación del Hotel Los Pinos</i>	13
Figura 4.	<i>Diagrama de flujo de la metodología</i>	14
Figura 5.	<i>Etapas de funcionamiento</i>	15
Figura 6.	<i>Recorrido del flujo de agua residual dentro del volumen de control</i>	19
Figura 7.	<i>Interceptores de sólidos, Escuela Creativa</i>	20
Figura 8.	<i>Humedal artificial de la Escuela Creativa</i>	21
Figura 9.	<i>Tanque recolector, Escuela Creativa</i>	21
Figura 10.	<i>Disposición del sustrato en un humedal artificial subsuperficial horizontal</i>	24
Figura 11.	<i>Recorrido del flujo de agua residual del Hotel Los Pinos</i>	29
Figura 12.	<i>Tanque interceptor, Hotel Los Pinos</i>	29
Figura 13.	<i>Humedal artificial, Hotel Los Pinos</i>	30
Figura 14.	<i>Tanque recolector, Hotel Los Pinos</i>	31
Figura 15.	<i>Resultados para el interceptor de sólidos de la Escuela Creativa</i>	41
Figura 16.	<i>Resultados para el humedal artificial de la Escuela Creativa</i>	43
Figura 17.	<i>Resultados para el tanque recolector de la Escuela Creativa</i>	45
Figura 18.	<i>Resultados para el interceptor de sólidos del Hotel Los Pinos</i>	52
Figura 19.	<i>Resultados para el humedal artificial del Hotel Los Pinos</i>	53
Figura 20.	<i>Resultados para el tanque recolector del Hotel Los Pinos</i>	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	<i>Inventario ACV interceptor de sólidos Escuela Creativa</i>	23
Tabla 2.	<i>Cálculo de impermeabilizante humedal artificial Escuela Creativa</i>	24
Tabla 3.	<i>Inventario ACV humedal artificial Escuela Creativa</i>	25
Tabla 4.	<i>Inventario ACV tanque recolector Escuela Creativa</i>	26
Tabla 5.	<i>Valores de calidad de agua Escuela Creativa</i>	27
Tabla 6.	<i>Cálculo de varillas deformadas y grafiladas</i>	33
Tabla 7.	<i>Cálculo mezcla cemento, arena, piedra y agua</i>	34
Tabla 8.	<i>Inventario ACV interceptor de sólidos Hotel Los Pinos</i>	34
Tabla 9.	<i>Cálculo de impermeabilizante humedal artificial Hotel Los Pinos</i>	35
Tabla 10.	<i>Inventario ACV humedal artificial Hotel Los Pinos</i>	36
Tabla 11.	<i>Inventario ACV tanque recolector Hotel Los Pinos</i>	37
Tabla 12.	<i>Valores de calidad de agua Hotel Los Pinos</i>	38
Tabla 13.	<i>Evaluación ACV del interceptor de sólidos Escuela Creativa</i>	40
Tabla 14.	<i>Evaluación ACV humedal artificial Escuela Creativa</i>	42
Tabla 15.	<i>Evaluación ACV tanque recolector Escuela Creativa</i>	44
Tabla 16.	<i>Evaluación parámetros calidad de agua Escuela Creativa escenario 1</i>	47
Tabla 17.	<i>Evaluación parámetros de calidad de agua Escuela Creativa escenario 2</i>	48
Tabla 18.	<i>Evaluación ACV del interceptor de sólidos Hotel Los Pinos</i>	50
Tabla 19.	<i>Evaluación ACV del humedal artificial Hotel Los Pinos</i>	52
Tabla 20.	<i>Evaluación ACV tanque recolector Hotel Los Pinos</i>	54
Tabla 21.	<i>Evaluación parámetros de calidad de agua Hotel Los Pinos escenario 1</i>	56
Tabla 22.	<i>Evaluación parámetros de calidad de agua Hotel Los Pinos escenario 2</i>	57
Tabla 23.	<i>Estrategias de mitigación para Escuela Creativa</i>	60
Tabla 24.	<i>Estrategias de mitigación para Hotel Los Pinos</i>	61

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

En la actualidad la falta de tratamientos de aguas residuales es un problema crucial que afecta tanto el medio ambiente como la salud humana. El agua sin tratar en el ambiente puede albergar gran cantidad de patógenos, virus, protozoos y bacterias que pueden propagar diferentes enfermedades. Por ejemplo, la diarrea y la gastroenteritis, provocada por contacto de la población con agua contaminada, se encuentran dentro de las 3 principales causas de muerte en el mundo y en Latinoamérica (Reynolds, 2002).

En la región Centroamericana y del Caribe, se estima que alrededor del 94 % de las aguas residuales se descargan al medio ambiente sin ser tratadas, provocando efectos negativos en la salud pública (Oakley & Salguero, 2011). En el contexto de Costa Rica, aunque la red de distribución nacional garantiza el acceso al agua potable para el 91 % de la población, solo el 13,4 % del total de aguas residuales producidas recibe tratamiento después de su uso (García, 2018). Adicionalmente, el aumento poblacional, el crecimiento urbanístico e industrial y la intensificación de las actividades agrícolas repercuten en la cantidad y frecuencia de residuos que se descargan en los diferentes cuerpos de aguas superficiales (Salgado & Ortiz, 2023). Según la Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales (2016) se estima que alrededor de 1 097 531 viviendas (76,42%) están conectadas a tanque séptico, solo 17 626 (1,6%) viviendas cuentan con un tanque séptico con tratamientos, unidades adicionales y las restantes 30 871 (2,15%) no tienen servicio sanitario o utilizan otro sistema, hueco, pozo o uso de letrina.

Consecuentemente, debido a la falta de infraestructura sanitaria adecuada y a la sobrecarga por el crecimiento urbanístico, los sistemas existentes como, por ejemplo, los tanques sépticos no son aptos para manejar los picos de caudal provocados por el turismo estacional. Además, las aguas grises generadas aumentan por actividades domésticas como lavandería, cocina, entre otras que, por lo general, estas aguas son liberadas al ambiente. Un ejemplo de esto, se puede observar en Monteverde, Puntarenas, donde la alta afluencia de turistas resulta en un incremento significativo de la carga de aguas residuales, lo que conduce a un aumento de aguas residuales no tratadas. Afectando los cuerpos de aguas en la zona, e inhabilitando su uso seguro.

El problema de las aguas residuales vertidas sin tratar prevalece por los altos costos de la implementación de sistemas de tratamientos de aguas residuales convencionales. En estos sistemas, la conducción de las aguas residuales hacia un punto en común es caro. Por tanto, la implementación adecuada de sistemas unitarios que contemplen el uso de los humedales

artificiales como un elemento dentro del tren de tratamiento resulta en una alternativa innovadora, eficiente y sostenible para tratar las aguas residuales (Magwaza et al. 2020).

Los humedales artificiales cuentan con el mismo funcionamiento que los humedales naturales, donde se da la limpieza de las aguas contaminadas mediante procesos biológicos, químicos y físicos (Parrao, 2018). En la zona de Monteverde se han implementado esfuerzos para establecer estas tecnologías. Con el fin de promover su expansión en la región, se ha decidido realizar un análisis de ciclo de vida para demostrar sus beneficios.

Dicho esto, al considerar los humedales artificiales como una opción viable para el tratamiento de aguas grises, se busca evidenciar mediante un análisis de ciclo de vida los beneficios ambientales de esta tecnología, con respecto a verter el agua en el ambiente. El objetivo es demostrar que los humedales artificiales generan un menor impacto ambiental en comparación con verter el agua sin tratar al medio ambiente. Además, se pretende promover el uso de los humedales artificiales como una alternativa de tratamiento de aguas residuales en el sitio, con el fin de incrementar el porcentaje de aguas residuales tratadas en el país.

Este proyecto final de graduación pretende contribuir con los objetivos de desarrollo sostenible, en particular con el objetivo seis (meta 6.3) que se centra en “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y saneamiento para todas las personas” (ONU, 2023). Esto con el fin de promover sistemas de tratamiento de aguas residuales para poder disminuir el impacto ambiental generado por las actividades domésticas e industriales y a la misma vez reducir el porcentaje de aguas residuales sin tratar.

1.2 Delimitación del problema

La Organización Mundial de la Salud (2010) “reconoció explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que un agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos.” El agua es esencial para el uso doméstico y debe ser segura, libre de microorganismos, sustancias químicas y peligros radiológicos que representen una amenaza para la salud humana.

En el contexto de Costa Rica, en el 2016 se estableció la Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016 - 2045. La política tiene como objetivo lograr, para el año 2045, un manejo seguro del total de las aguas residuales generadas en Costa Rica. Esto se logra mediante la implementación de sistemas de tratamiento tanto individuales como colectivos. También, se identifican los problemas y se brindan soluciones para abordarlos, tales como la generación de nueva infraestructura (Sistema Costarricense de Información Jurídica, 2020).

Considerando lo anterior, como una posible solución para abordar la Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016-2045, se propone el empleo de humedales artificiales. La literatura respalda esta opción debido a sus ventajas sobre los sistemas convencionales, como sus bajos costos de construcción y mantenimiento, así como la estética que ofrecen las plantas. Sin embargo, dada su necesidad de espacio, su aplicación es más adecuada en áreas rurales como, por ejemplo, Monteverde (Ruiz, 2019). Es crucial destacar que la falta de infraestructura adecuada en esta región para el tratamiento de aguas residuales debe ser considerada, especialmente debido al aumento de caudales generados por el turismo estacional.

La presente investigación pretende interpretar el impacto ambiental que conlleva la construcción y operación de los humedales artificiales subsuperficiales, esto mediante un análisis de ciclo de vida. De igual manera, se comparó los resultados obtenidos con su respectiva agua cruda, asumiendo que esta no recibe ningún tratamiento y es descargada directamente al ambiente.

Se parametrizó una base de datos para registrar entradas y salidas de la construcción y funcionamiento de los humedales artificiales, abarcando desde la compra de materia prima hasta su disposición final en campo, excluyendo impactos de extracción, fabricación y transporte. La unidad funcional es el metro cúbico en el afluente, debido a que es la unidad comúnmente utilizada en estudios de tratamiento de aguas residuales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el impacto ambiental derivado del proceso constructivo y funcionamiento de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal destinados al tratamiento de aguas residuales ubicadas en Monteverde, Puntarenas, mediante la aplicación del método de análisis de ciclo de vida.

1.3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar el inventario para el análisis de ciclo de vida de los elementos constructivos y funcionamiento de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.
- Evaluar el impacto ambiental de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con respecto al agua no tratada.

- Proponer mejoras en el funcionamiento del sistema y estrategias de mitigación de impactos para las etapas más críticas de cada humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Aguas residuales

La contaminación de las aguas produce una alteración en su calidad, un cambio en los parámetros físicos, químicos y biológicos. La contaminación del agua repercute en la vida humana y en los seres vivos. En otras palabras, el agua residual es aquella que contiene agentes contaminantes y representa una alteración negativa de la calidad del agua (Medrano, 2001).

Las actividades humanas, industriales, mineras y agrícolas son las principales causas de la contaminación del agua. La mayoría de las áreas urbanas vierten sus desechos en cuerpos de agua, arrastrando detergentes, residuos industriales, petróleo, entre otros (Ministerio del Ambiente, 2010). Las aguas residuales se clasifican en ordinarias y especiales según su origen. Las ordinarias incluyen aguas negras, drenaje, lluvia, lavado doméstico y lixiviados, mientras que las especiales provienen de la industria y tienen una composición variable (Estopà, 2018).

Ahora bien, el tratamiento de aguas residuales en las zonas urbanas se trata de manera centralizada, ya sea mediante de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) a nivel municipal. Los sistemas centralizados implican procesos avanzados de recolección, tratamiento y la descarga de grandes caudales (Sánchez, 2017).

En las zonas rurales, los sistemas de tratamiento de aguas residuales suelen ser descentralizados. Los sistemas descentralizados son instalaciones sanitarias más pequeñas y localizadas. Generalmente son diseñadas para gestionar aguas residuales cerca de su fuente de generación. Estos sistemas ofrecen la ventaja de tratar las aguas residuales domésticas cerca de su fuente de origen. El uso de sistemas descentralizados es ideal para las áreas rurales debido a que el acceso a una red centralizada es nulo (Galban, 2009).

De acuerdo a la literatura existen diversas tecnologías para tratar las aguas residuales y mitigar un poco el impacto ambiental que se genera gracias a las actividades humanas. Sin embargo, estas tecnologías se enfocan generalmente en grandes zonas urbanizadas, dejando de lado las comunidades alejadas. Debido a las limitaciones monetarias y sociales que

enfrentan estas comunidades, es necesario contar con opciones más viables y económicas para estas personas.

Dicho esto, el tratamiento de las aguas residuales tanto domésticas como industriales se debe integrar con nuevas tecnologías, nuevos procesos y además considerar nuevas líneas de tratamiento, así como la modificación de las antiguas (Ramalho, 2021). Una opción es la incorporación de los humedales artificiales en los sistemas de tratamiento.

2.1.2 Humedales artificiales

Los humedales artificiales son una solución para el tratamiento de las aguas residuales. Son sistemas de depuración constituidos por lagunas o canales de poca profundidad. Se utilizan principalmente plantas que facilitan la descontaminación mediante la interacción entre el agua, los microorganismos, el sustrato sólido, la vegetación circundante e incluso la fauna (Estopà, 2018).

Los humedales artificiales se clasifican en dos tipos: flujo superficial y flujo subsuperficial. En los sistemas de flujo superficial, el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula a través de los tallos y hojas de las plantas. En contraste, los humedales de flujo subsuperficial, el agua circula subterráneamente a través de un medio granular (Estopà, 2018).

Los humedales subsuperficiales pueden clasificarse según la dirección del flujo, ya sea vertical u horizontal. Los humedales subsuperficiales de flujo vertical se caracterizan por el flujo del agua de manera vertical a través de un filtro formado por raíces de plantas acuáticas (Paredes, 2018). Los humedales subsuperficiales de flujo horizontal se caracterizan debido a que el agua residual va a circular de manera lenta y horizontal a través del humedal (Rodríguez et al., 2019). Generalmente, trabajan en condiciones anaeróbicas y presentan tiempos de retención hidráulica de días (Estopà, 2018). Los humedales subsuperficiales de flujo horizontal trabajan mediante el uso de un sustrato generalmente, grava. La grava permite que los microorganismos puedan adherirse. En Costa Rica predominan este tipo de sistemas por lo que, en esta investigación se va centrar en este tipo de humedal artificial.

El tren de tratamiento suele iniciar por una unidad de pretratamiento diseñada para acondicionar las aguas y retener sólidos suspendidos. Esta unidad generalmente emplea tanques de concreto o plástico que son interconectados mediante tuberías. Seguidamente, se conecta al humedal artificial, seguido de un tanque de captación de agua destinado a su posterior reutilización.

El funcionamiento de los humedales artificiales se basa en tres principios: la actividad bioquímica de los microorganismos que se encuentran dentro del sistema, el aporte de oxígeno a través de las especies durante el día y finalmente, de un apoyo físico como es el sustrato. Estos elementos principales eliminan los materiales disueltos y suspendidos en el agua residual, por lo que degradan la materia orgánica hasta mineralizarla (Lara, 1999).

El tratamiento modifica las características del agua residual, reduciendo su concentración de contaminantes de niveles inadecuados a valores aceptables que no afectan negativamente al medio ambiente. Este cambio es posible gracias a los diversos elementos que integran el humedal artificial, los cuales se describen a continuación.

2.1.3 Elementos del humedal artificial subsuperficial horizontal

Dentro de los principales elementos que constituyen el funcionamiento de los humedales artificiales Carvajal et al. (2008), mencionan los siguientes:

- Sustrato: típicamente arena o grava, sirve como base para la vegetación, facilitando así la fijación microbiana. Es fundamental que el sustrato sea permeable para permitir el flujo de agua a través de él. Además, tiene la funcionalidad de ser un soporte y a la vez un material filtrante.
- Impermeabilizante: tiene como función principal evitar la infiltración del agua hacia el suelo circundante, esto es para prevenir la contaminación del subsuelo y las aguas subterráneas.
- Tubería PVC y accesorios: su función principal es la conducción y distribución del agua a través de las diferentes etapas del sistema. Permiten el transporte del agua residual desde la unidad de pretratamiento hacia el humedal, así como también la descarga del agua tratada hacia el tanque de captación.
- Caudal: aguas residuales que circulan a través del sustrato filtrante y de la vegetación.
- Vegetación: Se utilizan macrófitas adaptadas para crecer en suelos saturados de agua. Estas plantas tienen un sistema desarrollado de espacios aéreos grandes, lo que facilita el suministro de aire desde la atmósfera hasta las raíces y rizomas de las especies (Muñoz & Vásquez, 2020). Proporcionan una superficie para la formación de películas bacterianas, permiten la filtración y la adsorción de los constituyentes.
- Microorganismos: intervienen en los procesos de degradación de materia orgánica, eliminación de nutrientes y desinfección de patógenos (Delgadillo et al., 2010). Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico, en la zona superior del humedal. En la zona superior se encuentran los microorganismos aerobios y en la zona inferior se encuentran los anaerobios.

2.1.4 Análisis de ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) corresponde a una metodología para evaluar los aspectos, tratamientos e impactos ambientales relacionados a un producto o un servicio. Esta metodología permite identificar oportunidades para mejora en aspectos ambientales (ISO, 2006).

Según la norma ISO 14040:2006 el análisis de ciclo de vida puede ayudar a:

- Identificación de oportunidades para la mejora del desempeño ambiental de productos en las diferentes etapas de su ciclo de vida.
- Aportación de información valiosa para la toma de decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales, para la planificación estratégica, el diseño y rediseño de procesos o productos.
- Selección de indicadores de desempeño ambiental pertinentes, agregando técnicas de medición.
- Marketing (etiquetado ambiental, reivindicación ambiental, declaración ambiental de producto).

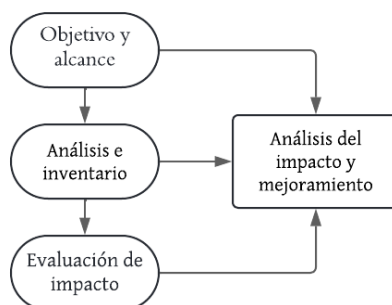
En resumen, el ACV evalúa los aspectos e impactos ambientales potenciales, valorando la utilización de recursos y las consecuencias ambientales de las emisiones y vertidos. El ACV puede abarcar todo el ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización y tratamiento, hasta su disposición final. Este enfoque integral es conocido como "de la cuna a la tumba" (ISO, 2004).

De acuerdo a la norma ISO 14040:2006, el análisis de ciclo de vida se divide en cuatro fases principales (Figura 1):

1. Definición del objetivo y alcance del estudio.
2. Inventario del ciclo de vida.
3. Evaluación de impactos ambientales potenciales.
4. Análisis del impacto y mejoramiento (interpretación).

Figura 1.

Esquema conceptual del ACV.



Definición de objetivos y alcance

El alcance debe de estar suficientemente definido para asegurar la profundidad y el nivel de detalle de la investigación, con el fin de alcanzar el objetivo propuesto. La primera fase del análisis de ciclo de vida implica establecer el propósito del estudio, el público dirigido y la justificación del porqué y para que se lleva a cabo. Es importante, además definir la unidad funcional y la línea base del estudio (ISO, 2006).

Inventario de ciclo de vida

Corresponde a la segunda fase del ACV. Se describe como un inventario del sistema o del producto a evaluar. Incluye la recopilación de la información, datos necesarios para cumplir con los objetivos previamente establecidos. Se definen los límites del sistema y es preferible el uso de diagramas de flujo que relacionen cada parte del sistema, además de incluir los métodos utilizados y las técnicas de cálculo para recolectar esos datos (ISO, 2006).

Evaluación del impacto del ciclo de vida

La tercera fase se enfoca en evaluar la relevancia de los diferentes impactos ambientales potenciales, mediante un análisis del inventario del ciclo de vida. En otras palabras, se trata de asociar los datos del inventario con los impactos ambientales específicos. Estos impactos se pueden clasificar en diversas categorías, como cambio climático, acidificación, toxicidad terrestre, entre otros. Dentro de esta etapa, se contempla los análisis de sensibilidad e incertidumbre con el fin de evaluar la robustez del ACV y su utilidad para la toma de decisiones ambientales.

Interpretación del impacto

Corresponde a la fase final. En esta etapa se discuten los impactos obtenidos, se evalúan en relación al objetivo y al alcance con el fin de llegar a conclusiones y recomendaciones.

2.2 Antecedentes

El análisis de ciclo de vida es una herramienta que permite identificar y evaluar los impactos ambientales derivados a un producto, proceso u operación. A continuación, se presentan diferentes estudios que tienen como objetivo demostrar la metodología utilizada, los resultados obtenidos según la comparación entre los distintos escenarios, así como sus principales conclusiones.

Riffo (2016), realizó una investigación en Chile, la cual se enfoca en la evaluación ambiental de la planta de aguas residuales centralizada ubicada en Talagante. Dicha evaluación es mediante un análisis de ciclo de vida (ACV). El objetivo fue evaluar el impacto ambiental en escenarios presentes y futuros. Se analizó tres escenarios: en el primero, se usa alrededor del 40 % del biogás en la caldera para proveer energía al biodigestor; en el segundo, se emplea el 100 % del biogás; y en el tercero, se amplía la planta con un nuevo módulo de la línea de agua. La similitud con la presente investigación radica en que el estudio busca identificar las actividades con mayor impacto ambiental y recomendar alternativas para reducir dicho impacto, sin comprometer la operación normal de la planta. Se encontró que el óxido nitroso es el principal contaminante, representando más del 70 % de las emisiones directas en todos los escenarios. Dentro de las estrategias de mitigación incluyen mejorar la eficiencia de la aireación en el tratamiento biológico y realizar campañas para medir el óxido nitroso (Riffo, 2016).

Belmonte (2018), desarrolló en Perú una investigación en una planta de tratamiento descentralizada. Aborda el tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas en una zona rural de productores de cacao. Se analizan los impactos ambientales generados en el escenario actual, donde el agua se bombea desde una fuente lejana, comparándolos con un escenario futuro que implica la implementación de un humedal artificial, utilizando la metodología de ACV. La similitud se evidencia en los resultados, ya que el estudio demuestra que los materiales utilizados en la construcción del humedal artificial tienen un impacto significativo en varias categorías ambientales. En el escenario actual, el consumo eléctrico del sistema de bombeo representa casi la totalidad del impacto en estas categorías. Al contrastar ambos escenarios, la implementación del humedal artificial reduce el impacto ambiental entre un 96 % y un 99 % en todas las categorías evaluadas (Belmonte, 2018).

Corbella et al. (2017) realizaron un estudio similar, evaluando el impacto ambiental de diferentes materiales utilizados como medio de sustrato, como las pilas de combustible microbianas (PCM). El estudio analizó tres escenarios: un humedal artificial convencional, un humedal artificial con PCM a base de grava y un sistema utilizando grafito. Todos los escenarios mostraron un desempeño similar en las categorías de impacto, excepto en el

potencial de agotamiento abiótico. El segundo escenario mostró un mayor impacto debido a la cantidad de materiales utilizados, mientras que el tercer escenario, utilizando grafito, tuvo el menor impacto ambiental, sugiriendo su posible reemplazo por los humedales artificiales tradicionales.

Hube et al. (2023) evaluaron la viabilidad técnica, ambiental y económica de usar concreto reciclado como sustrato en humedales construidos para tratar aguas residuales domésticas en climas fríos. Compararon tres sistemas mediante un ACV tanque séptico solo, tanque séptico con humedal artificial utilizando con concreto reciclado y sistema de membrana cerámica impulsada por gravedad. El sistema con humedal redujo en un 50 % el potencial de eutrofización respecto al tanque séptico solo, sin aumentar el impacto climático. Frente al sistema de membrana cerámica impulsada por gravedad, tuvo un 40 % menos de eutrofización, aunque un 90 % más de impacto climático. Económicamente, su costo fue solo 3,5 % mayor que el del tanque séptico solo y 49 % menor que el de la membrana cerámica. Los resultados respaldan esta combinación como una alternativa sostenible en regiones sensibles a la eutrofización.

Si bien el ACV ha sido aplicado en diversos contextos a nivel internacional para evaluar impactos ambientales en sistemas de tratamiento de aguas residuales, en Costa Rica aún son escasos los estudios que integren esta herramienta específicamente en humedales artificiales, y menos aún aquellos que consideren tanto los materiales constructivos como los parámetros de calidad del agua. Esta ausencia de investigaciones representa una brecha importante en el conocimiento local, especialmente considerando la creciente implementación de estos sistemas en zonas rurales como Monteverde, Puntarenas. En respuesta a esta necesidad, el presente estudio tiene como fin evaluar el impacto ambiental asociado al proceso constructivo y al funcionamiento de humedales artificiales ubicados en la Escuela Creativa y el Hotel Los Pinos.

3. METODOLOGÍA

3.1 Sitio de Estudio

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial que fueron objeto de análisis se encuentran en el cantón de Monteverde, en la provincia de Puntarenas. Se evaluaron dos humedales artificiales con distintas características constructivas, tales como el tipo de impermeabilizante, el tipo de sustrato, entre otros. Estos humedales también difieren en cuanto a su uso: uno pertenece al Hotel Los Pinos y el otro a la Escuela Creativa.

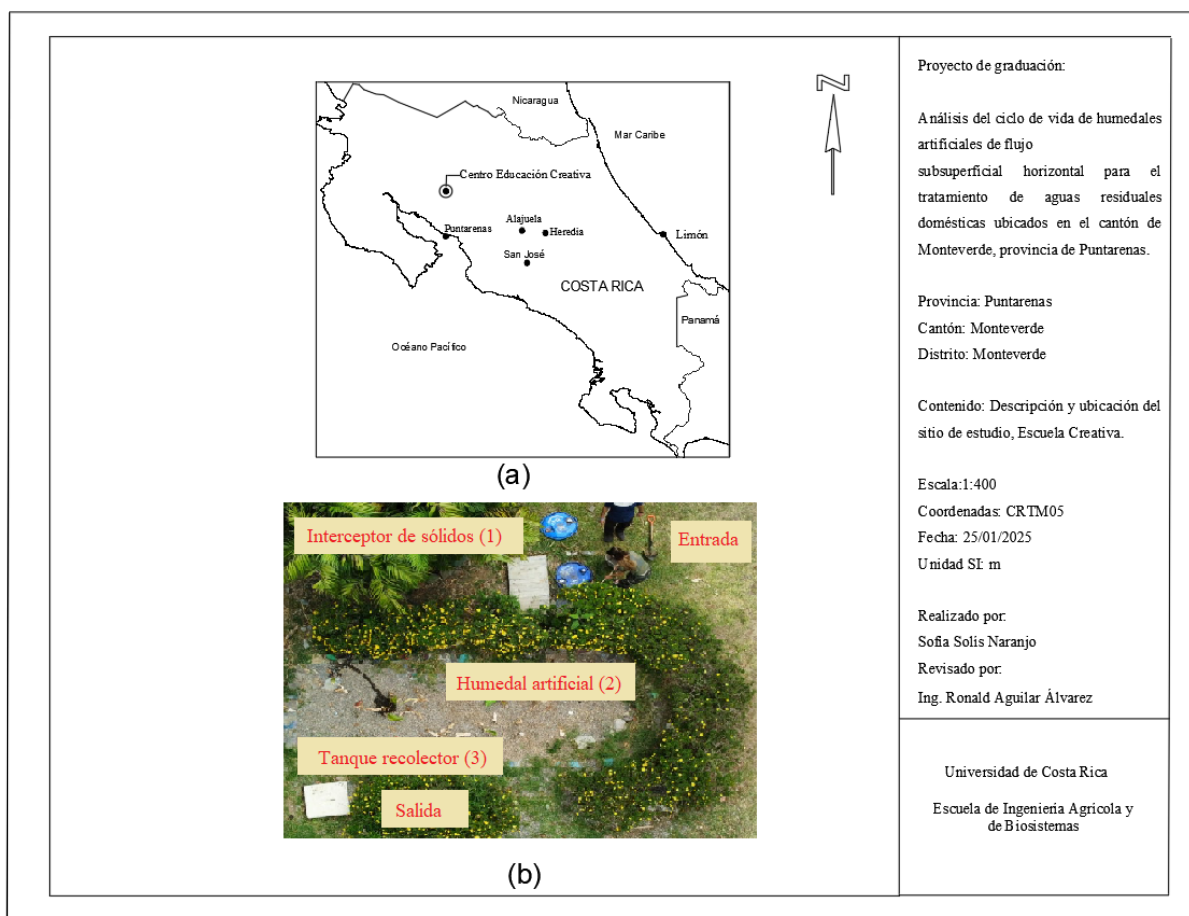
Con el objetivo de caracterizar los sitios de estudio, se realizaron visitas de campo orientadas a levantar un inventario de la infraestructura existente, reconocer espacialmente el entorno e identificar las fuentes generadoras de agua residual que alimentan el volumen de control (Figura 5). Este volumen comprende tres unidades principales: el tanque interceptor de sólidos, el humedal artificial y el tanque recolector, las cuales se describen en secciones posteriores.

Durante estas visitas, se recolectó información detallada sobre cada etapa del sistema de tratamiento, incluyendo la cantidad y tipo de tuberías, accesorios de PVC, estañones plásticos y otros componentes constructivos. Asimismo, se documentaron las dimensiones, el tipo de sustrato y el material impermeabilizante presente en cada unidad. La información recabada permitió estimar con precisión los materiales de construcción requeridos, así como calcular el caudal tratado por el sistema.

El primer sitio de estudio corresponde a la Escuela Creativa, un centro educativo fundado en 1991, situado en el bosque nuboso de Monteverde. El tren de tratamiento de aguas residuales que se analizó, su agua residual proviene de la cocina. A continuación, en la Figura 2, se muestra la ubicación general del sitio y se muestra la ubicación específica del tren de tratamiento analizado. Posteriormente, se encuentra la caracterización del Hotel Los Pinos (Figura 3).

Figura 2.

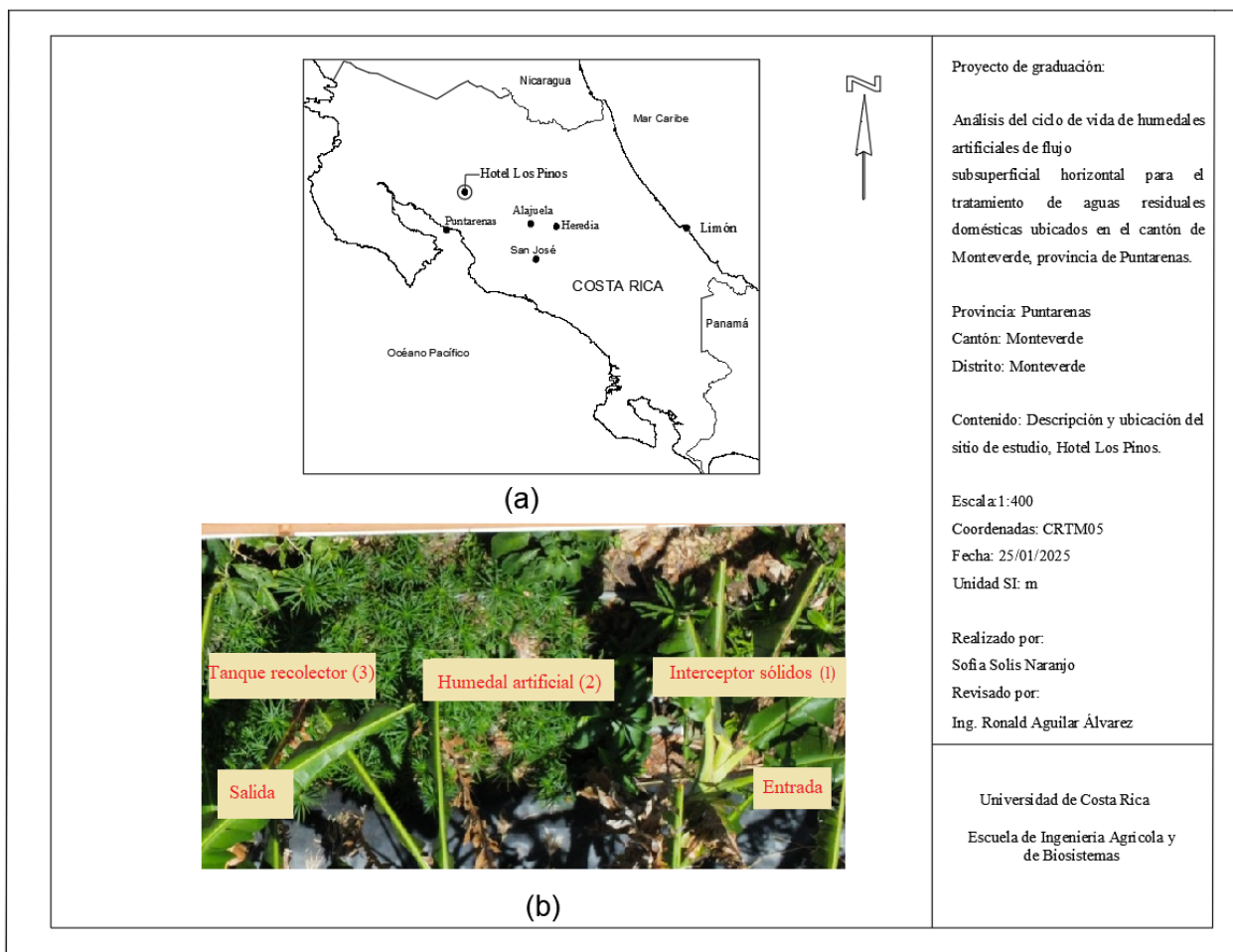
Ubicación del Centro Educativo Creativa. La imagen A muestra la ubicación general del sitio de estudio cuyas coordenadas son latitud 10°19'13" N y longitud 84°49'2" W (EcuRed, sf). La imagen B ilustra la localización específica del tren de tratamiento para las aguas residuales generadas de la cocina. Los números indican el flujo del agua.



El segundo sitio de estudio corresponde al Hotel Los Pinos, un establecimiento destinado al turismo, pero que también experimenta el fenómeno del turismo estacional, característico de la zona. El tren de tratamiento de aguas residuales que se analizó, su agua residual proviene de la cocina de una casa habitación y la lavandería del hotel. A continuación, en la Figura 3, se muestra la ubicación general del sitio y se muestra la ubicación específica del tren de tratamiento analizado.

Figura 3.

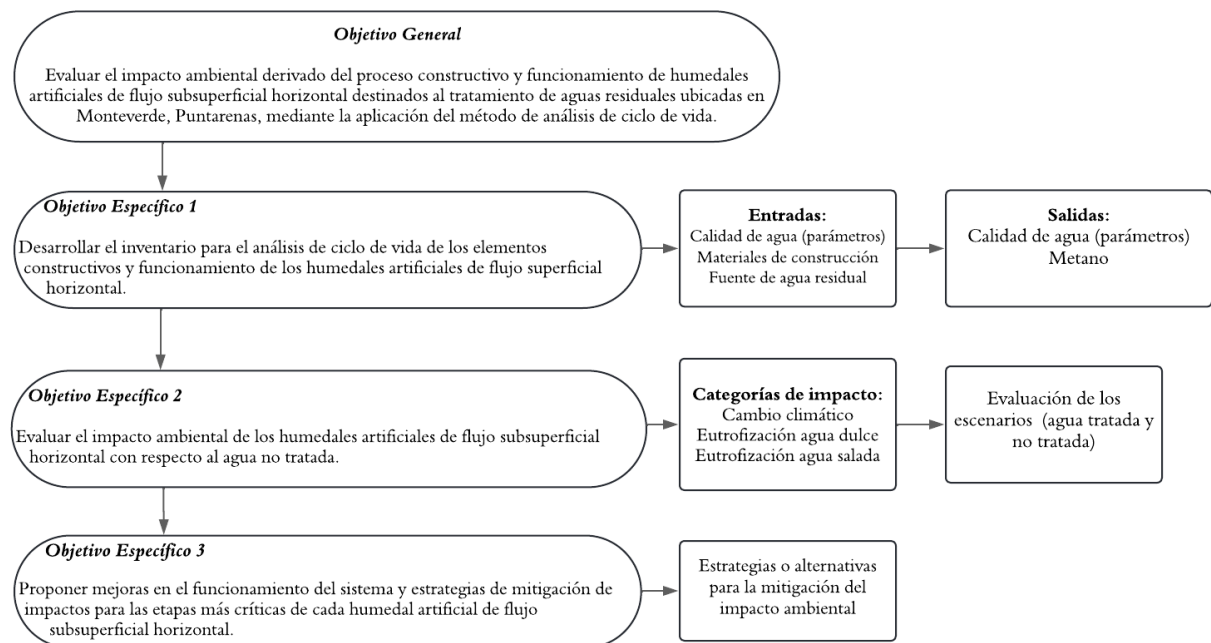
Ubicación del Hotel Los Pinos. La Imagen A muestra la ubicación general del sitio de estudio, cuyas coordenadas geográficas son latitud 10°18'45.05" N y longitud 84°48'53.43" W (EcuRed, sf). Por otro lado, la Imagen B ilustra la localización específica del tren de tratamiento de aguas residuales, que procesa las aguas generadas en la cocina y la lavandería. Los números indican el flujo del agua.



Para ambos sitios de estudio, se evaluó el impacto ambiental del volumen de control, considerando tanto los elementos constructivos que los conforman como su operación. Para ello, se analizaron de forma individual las unidades que componen el tren de tratamiento de aguas residuales (interceptor de sólidos, humedal artificial y tanque recolector). El objetivo fue identificar qué unidad y qué material generan mayores emisiones en cada categoría de impacto: cambio climático, eutrofización agua dulce y eutrofización agua salada. Además, se comparó el agua cruda con el agua tratada de cada humedal artificial según las categorías de impacto. A continuación, como se muestra en la Figura 4, se va a describir la metodología utilizada.

Figura 4.

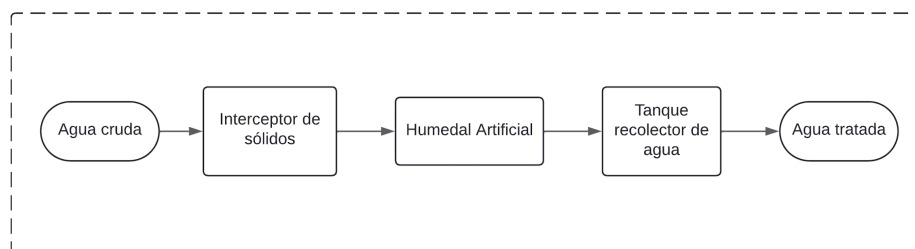
Diagrama de flujo de la metodología.



3.2 Inventario análisis de ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida aplicado a los humedales artificiales (Figura 5) permitió evaluar el impacto ambiental total del sistema, abarcando tanto los elementos constructivos como su funcionamiento. Para cumplir con el objetivo 1 se definen, para el análisis de ciclo de vida, los límites del sistema: la unidad de pretratamiento (interceptor de sólidos), el humedal artificial y el tanque de captación de agua. Dentro de estos límites, se parametrizó una base de datos que registró las entradas y salidas durante el proceso de construcción y operación de los humedales artificiales. Se valoró desde la compra de la materia prima hasta su disposición final en campo instalado para tratar las aguas. Sin embargo, quedan excluidas las cargas ambientales relacionadas con el transporte asociado. En cuanto a la unidad funcional corresponde al metro cúbico aforado en el afluente.

Figura 5.
Etapas de funcionamiento.



A continuación, se va a explicar cómo se determinaron los aspectos constructivos para el humedal artificial.

3.2 Inventario

Dado que el ACV incluye el proceso constructivo del volumen de control, es necesario considerar los materiales de construcción requeridos. Para ello, se recopiló los datos sobre las dimensiones y características de los humedales artificiales a través de visitas de campo en el sitio de estudio. Entre los aspectos a considerar se encuentran: las dimensiones del humedal artificial, el tipo de impermeabilizante (geomembrana o plástico), el tipo de sustrato como las piedras (cuarta y bola). También se incluyó los blocks de concreto, la mezcla de concreto (cemento, agua, piedra y arena), las varillas, la tubería y accesorios de PVC, y los estañones de plástico tanto del pretratamiento como el tanque recolector.

Dentro de las consideraciones para la recolección de datos y los procedimientos de cálculo destinados a cuantificar los límites del sistema, se incluyen las entradas, entre las cuales se encuentran los parámetros de calidad del agua. Se encuentran la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el amoníaco (NH_3), los nitratos (NO_3^-), los fosfatos (PO_4^{3-}). Estos parámetros permitieron caracterizar tanto el agua cruda como el agua residual mediante el funcionamiento del humedal artificial. La recolección de estos datos se llevó a cabo durante el año 2023, con una medición mensual, utilizando la mediana de cada parámetro. Este trabajo se realizó en el marco del proyecto de investigación C2451 de la Escuela de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.

Para estimar el caudal que ingresa al sistema, en el caso de la Escuela Creativa se contó con un caudalímetro que mide directamente el flujo de agua residual que ingresa. Mientras que para el Hotel Los Pinos, el caudalímetro mide el flujo de agua potable entrante a la casa de habitación y a la lavandería. Por lo tanto, se utilizó este dato aplicando un factor de retorno del 90% recomendado por el AyA. La medición del caudal se realizó durante un período de aproximadamente 30 días (diciembre 2023), con una medición diaria que se efectuaba a la misma hora todos los días.

Con respecto a las salidas se contempló los parámetros de calidad de agua anteriormente mencionados, esto tomando en cuenta tanto el agua cruda como el agua ya tratada. Además, se registra la emisión de metano debido a las características propias de un humedal artificial de flujo subsuperficial, donde la ausencia de oxígeno favorece la generación de este gas.

Se definió como escenario 1 la condición en la que el agua residual es liberada al ambiente sin recibir ningún tipo de tratamiento, tal como ocurre habitualmente. En este caso, no se consideró la emisión de metano, ya que la presencia de oxígeno en el entorno inhibe los procesos anaeróbicos responsables de su generación. Por lo tanto, no se estimó producción de metano en el afluente.

En contraste, para el efluente del humedal artificial, sí se contempló la emisión de metano, debido a las condiciones anaeróbicas características del sistema de flujo subsuperficial horizontal, las cuales favorecen la actividad de microorganismos metanogénicos.

Una vez completado el inventario de cada sitio de estudio, fue necesario convertir la masa total de materiales a la unidad funcional expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) de agua tratada. Esta transformación permitió estandarizar los resultados y facilitar su comparación con valores reportados en la literatura especializada.

Para ello, se utilizó el caudal anual ($\text{m}^3/\text{año}$) y se multiplicó por un factor de vida útil de 20 años, comúnmente empleado en ingeniería civil. Este cálculo permitió obtener el volumen total de agua tratada. Luego, la masa total de cada material se dividió entre dicho volumen, obteniendo así la masa expresada en kilogramos por metro cúbico de agua tratada, para la Escuela Creativa se detalla en el Apéndice 3 y para el Hotel Los Pinos se detalla en el Apéndice 4.

Esta conversión se aplicó a cada unidad de funcionamiento y posteriormente se empleó el software SimaPro para evaluar las categorías de impacto.

3.3 Evaluación del impacto ambiental

Para la evaluación del impacto ambiental, se empleó el uso del software SimaPro 9.6.0.1, con licencia proporcionada por la Universidad de Costa Rica. Se llevó a cabo un análisis multicriterio utilizando el método ReCiPe, que facilitó el cálculo de impactos de los elementos constructivos. Además de interpretar el funcionamiento del humedal artificial, en las etapas de punto medio o punto final. En el caso de las categorías de punto medio, ReCiPe ofreció resultados tanto a nivel de caracterización como de normalización. Para dicha evaluación se realizó mediante 3 categorías de impacto: eutrofización en agua dulce ($\text{kg P}_2 - \text{Eq}$), cambio climático ($\text{kg CO}_2 - \text{Eq}$) y eutrofización en salada ($\text{kg N}_2 - \text{Eq}$). Generalmente, es más recomendado utilizar categorías de impacto intermedias, debido a que brinda más información de en qué punto y de qué forma afecta al medio ambiente. A

diferencia que cuando se realiza de manera más general no hay desarrollo de metodologías para su estudio, por lo que hay más incertidumbre asociada (Vallejo, 2004). Por lo general, la evaluación del impacto ambiental se complementa con un análisis de incertidumbre.

Se realizó una evaluación individual de cada sistema (interceptor de sólidos, humedal artificial y tanque recolector), considerando también sus respectivos elementos constructivos. Además, se comparó el agua cruda con el agua tratada de cada humedal artificial según las categorías de impacto.

3.3.1 Análisis de sensibilidad e incertidumbre

La norma ISO 14044 exige la inclusión de un análisis de sensibilidad como parte de la fase de interpretación del ACV. Este análisis tiene como objetivo evaluar cómo las variaciones en los supuestos, métodos y datos influyen en los resultados del estudio. Su propósito principal es verificar que la información obtenida sea relevante para sustentar las conclusiones, lo cual implica introducir variaciones controladas para comprobar la robustez de los resultados (Curran, DeRosa & Zimmerman, 2021).

La norma no establece un porcentaje fijo para dichas variaciones. En su lugar, recomienda aplicar un rango de cambio definido según el juicio técnico y el alcance del estudio. Un valor de partida comúnmente aceptado es una variación de $\pm 10\%$, considerado como un estándar práctico en muchos ACV (Curran, DeRosa & Zimmerman, 2021).

En este estudio se aplicó un análisis de sensibilidad local mediante perturbaciones, en el cual se modifica un parámetro a la vez por un pequeño porcentaje. Este enfoque permite observar cómo varían los impactos como resultado de cambios uniformes introducidos arbitrariamente en los datos de entrada. En este contexto, una variación de $\pm 10\%$ se considera suficientemente pequeña como para mantener la linealidad local del modelo, pero lo bastante significativa para medir la sensibilidad de los resultados. Esta magnitud de cambio proporciona un criterio uniforme y claro para todos los parámetros relevantes (Canada Mortgage and Housing Corporation, 2004).

El uso de $\pm 10\%$ facilita la comparación de la influencia relativa de diferentes insumos, tanto dentro del mismo estudio como entre estudios similares. En ciertos casos, se pueden aplicar variaciones mayores, como $\pm 15\text{--}20\%$, para capturar incertidumbres más conservadoras o efectos no lineales. Este enfoque es útil en estudios comparativos cuando la dispersión real de los datos es desconocida o se desea probar la robustez del modelo frente a cambios significativos. No obstante, perturbaciones de esta magnitud pueden alejar al modelo de su comportamiento lineal, por lo que deben estar respaldadas por datos reales de incertidumbre (Canada Mortgage and Housing Corporation, 2004). El análisis de sensibilidad identifica qué variables influyen más en los resultados, al modificar

individualmente ciertos parámetros del modelo. Esto permite detectar los datos más críticos y priorizar su mejora.

En contraste, la variación de $\pm 10\%$ se interpreta como una perturbación menor que mantiene el modelo dentro de su régimen local, permitiendo realizar un análisis sin distorsionar su comportamiento. (Canada Mortgage and Housing Corporation, 2004). Así, representa un “escenario cercano” al caso base. Para ello, se aplicó un rango de variación del $\pm 10\%$ en la masa de cada material de construcción y en los parámetros de calidad de agua, tanto para el agua sin tratamiento (escenario 1) como para el agua tratada (escenario 2).

El análisis de incertidumbre en un ACV permite evaluar la confiabilidad de los resultados al considerar la variabilidad e imprecisión de los datos de entrada, como consumos energéticos, factores de emisión o suposiciones del modelo. Este enfoque cuantifica el impacto de dichas incertidumbres en los resultados finales, como las emisiones o el uso de recursos, y permite expresar los resultados en intervalos de confianza, en lugar de valores únicos, aportando mayor transparencia al estudio.

Ambos análisis son complementarios, mientras el análisis de incertidumbre ofrece una visión general de la robustez del ACV, el de sensibilidad orienta sobre qué aspectos deben refinarse. En conjunto, fortalecen la solidez del estudio y su utilidad para la toma de decisiones ambientales.

3.4 Etapas críticas

La evaluación del impacto ambiental, utilizando la herramienta SimaPro y sus distintas categorías de impacto, permitió identificar las etapas críticas en los diferentes escenarios. Esta evaluación consideró tanto el uso del humedal artificial para el tratamiento del agua residual como su respectiva agua sin tratar. Al poder identificar las etapas clave dentro de este sistema, el objetivo fue proponer mejoras o alternativas que contribuyan a reducir el impacto ambiental asociado tanto del proceso constructivo como del funcionamiento. Finalmente, se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo para organizar y presentar de forma clara los resultados obtenidos, con el propósito de identificar con mayor precisión las etapas más críticas del sistema en función de las categorías de impacto.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Inventario

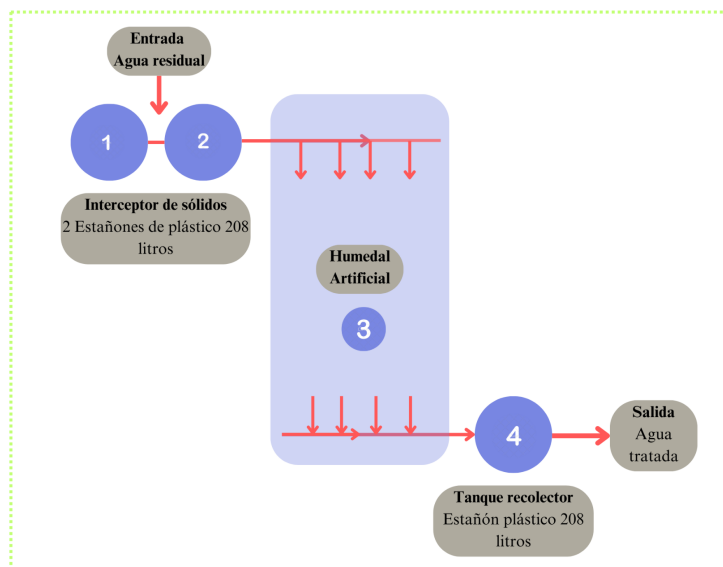
A continuación, se presenta el inventario del sistema de tratamiento de aguas residuales instalado en la Escuela Creativa y en el Hotel Los Pinos. Para el ACV, se optó por dividir el sistema de tratamiento en tres unidades principales: el interceptor de sólidos, el humedal artificial y el tanque recolector. La división del sistema de tratamiento se realiza con el objetivo de evaluar qué unidad del sistema y qué material de construcción generan un mayor impacto ambiental con respecto a las categorías de impacto.

4.1.1 Escuela Creativa

En la Escuela Creativa, la fuente de agua residual proviene de la cocina, clasificándose como aguas grises. A continuación, en la Figura 6, se muestra, para el volumen de control establecido, el recorrido del flujo de agua residual. El agua residual ingresa a los interceptores de sólidos, luego se dirige al humedal artificial para su tratamiento, y finalmente, el agua tratada se recoge en el tanque recolector.

Figura 6.

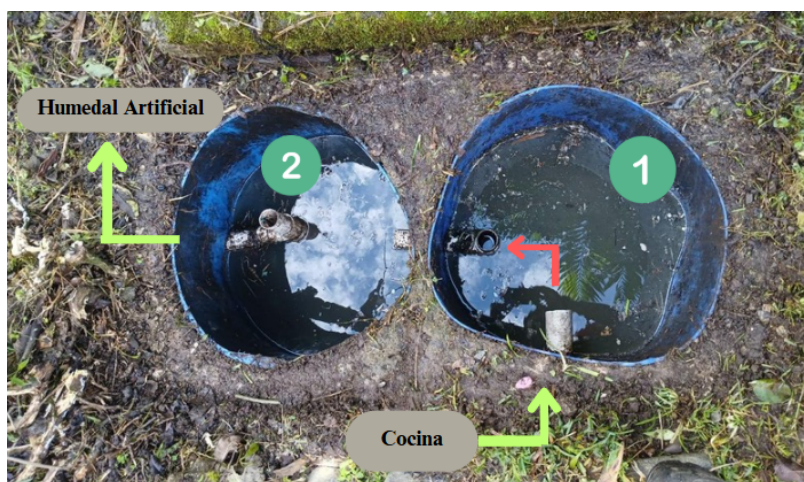
Recorrido del flujo de agua residual dentro del volumen de control establecido para ACV. El flujo del agua se representa mediante flechas. Primero, el agua residual ingresa al interceptor de sólidos el cual corresponde al estañón número 1, luego pasa al estañón número 2. A continuación, el agua se dirige al humedal artificial, enumerado con el número 3, y finalmente, llega al tanque recolector, número 4.



El interceptor de sólidos está compuesto por dos estañones plásticos de polietileno de alta densidad (HDPE), tal como se muestra en la Figura 7. Cada estañón cuenta con una capacidad nominal de 208 l. En cada estañón solo se almacena 164 l. Dicha capacidad de almacenamiento de líquido del estañón se debe a que la tubería de salida está a 0,38 m del nivel superior (ver tubo blanco, señalado con la flecha, Figura 7).

Figura 7.

Interceptores de sólidos, Escuela Creativa. El agua proveniente de la cocina ingresa inicialmente al primer estañón, identificado con el número 1, y posteriormente fluye hacia el segundo estañón, marcado con el número 2. La dirección del flujo del agua está representada mediante las flechas.



Después del interceptor de sólidos, las aguas son conducidas mediante tuberías y accesorios de PVC de dos pulgadas (SDR 41), hacia un humedal artificial (Figura 8). El humedal artificial tiene dimensiones de 4,6 m de largo, 1,3 m de ancho y 0,9 m de profundidad. El humedal artificial está constituido de plástico de construcción transparente de invernadero (HDPE) como material impermeabilizante y emplea piedra bola y piedra cuarta como sustrato. Además, el humedal artificial está plantado con platanilla (*Heliconia sp.*) y sagú (*Canna indica*), cuya densidad es una distribución aleatoria.

Figura 8.
Humedal artificial de la Escuela Creativa.



El agua tratada se almacena en un tanque recolector de plástico de polietileno de alta densidad (HDPE) tal como se muestra en la Figura 9. El tanque recolector cuenta con una capacidad nominal de 208 l. En el tanque solo se almacena 190 l. Dicha capacidad de almacenamiento de líquido del estanón se debe a que la tubería de salida está a 0,28 m del nivel superior (ver tubo blanco, señalado con la flecha Figura 9).

Figura 9.
Tanque recolector, Escuela Creativa.



Se llevó a cabo una visita de campo en la que se cuantificaron, por cada fase de tratamiento de las tres unidades definidas en el volumen de control, la cantidad de tuberías y accesorios de PVC, los estañones plásticos y elementos constructivos generales. Además, se registraron las dimensiones y se caracterizaron tanto el tipo de sustrato como el impermeabilizante utilizado. La visita contribuyó para calcular con exactitud materiales de construcción como el impermeabilizante y la cantidad de sustrato. También, facilitó el cálculo del caudal.

A continuación, se describe por unidad de tratamiento dentro del volumen de control establecido, la lista de materiales que los constituyen y el procedimiento empleado para obtener cada una de las entradas relacionadas con los elementos constructivos del inventario.

Unidad 1: Interceptor de sólidos

En el caso del interceptor de sólidos de la Escuela Creativa, se ubicaron dos estañones de plástico de HDPE, cuyo diámetro corresponde a 0,58 m y su almacenamiento comercial corresponde a 208 l (ver Figura 7). En la Tabla 1 se detalla la cantidad de cada material, la observación menciona si se trata de una entrada o salida del volumen de control a analizar, la masa unitaria de cada material y la masa total, expresada en kilogramos.

Tabla 1.

Inventario del análisis de ciclo de vida para los materiales de construcción de la Escuela Creativa para el interceptor de sólidos.

Material	Cantidad	Unidad	Observación	Masa unitaria (kg)	Masa total (kg)
Interceptor de sólidos					
Estañones (HDPE)	2,00	unidad	Entrada	6,00	12,00
Tee 2" PVC	2,00	unidad	Entrada	0,25	0,50
Tubería 2 " PVC	0,35	m	Entrada	2,49 [1]	0,14

[1] La masa de 2,49 kg corresponde a 6 m lineales de tubería PVC de 2" SDR 41. A partir de esta relación, se puede calcular la masa correspondiente a 0,35 m lineales de tubería PVC de 2".

Unidad 2: Humedal artificial

Para el humedal artificial (ver Figura 8), se tomaron dimensiones y se contabilizó lo que es el impermeabilizante, el sustrato utilizado de piedra bola y piedra cuarta, y la tubería y accesorios PVC. A continuación, se muestra el procedimiento utilizado para calcular los materiales listados en la Tabla 3.

Impermeabilizante

En la Escuela Creativa, el impermeabilizante empleado fue plástico de construcción transparente de tipo invernadero. Este plástico se caracteriza como un HDPE, con un espesor aproximado de 175 μm . Para calcular el área mínima requerida de impermeabilizante, se determinaron las dimensiones del humedal artificial. Además, se añadió 1 m adicional en cada extremo. A continuación, se calcularon el área lateral del humedal artificial (paredes largas), el área del fondo y, consecuentemente, el área de las

paredes cortas. Finalmente, se sumaron todas las áreas para obtener el área total de impermeabilizante necesario. Según lo indicado en la Tabla 2, el área total de impermeabilizante necesaria para cubrir el humedal artificial de la Escuela Creativa es de 23,80 m².

Tabla 2.

Cálculo de impermeabilizante para el humedal artificial de la Escuela Creativa.

Largo b (m)	Ancho c (m)	Profundidad a (m)	Área lateral (m ²)	Área fondo (m ²)	Área pared corta (m ²)	Área total (m ²)
4,60	1,30	0,90	11,88	5,98	5,94	23,80

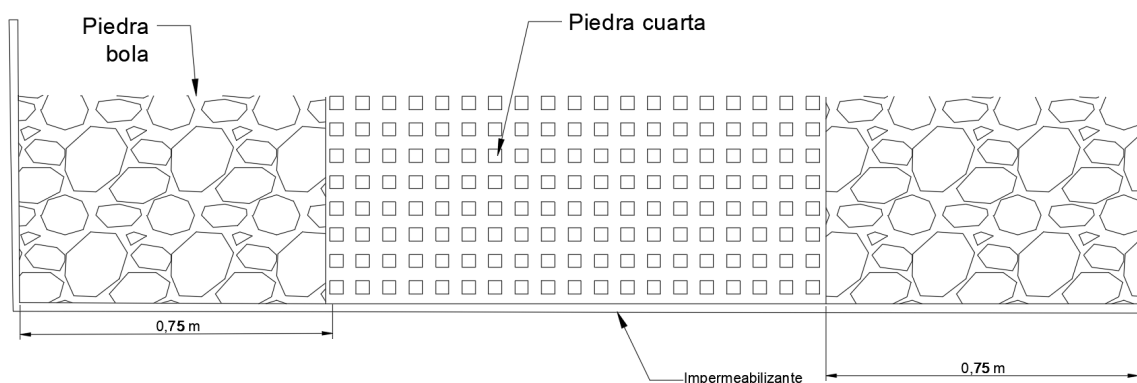
Nota: Área lateral = 2((b+1+1)*a). Área fondo = b*c. Área pared corta = 2*(c+1+1)*a. Área total = área lateral + área fondo + área pared corta.*

Sustrato

Para el cálculo del sustrato de piedra bola, se consultó el Manual de Humedales Artificiales de la ONU (2008). En el manual se establece que la piedra bola debe colocarse a lo ancho del humedal artificial, 0,75 m de piedra bola desde cada extremo hacia el interior del humedal artificial, como se observa en la Figura 10 (UN-Habitat, 2008, p. 24).

Figura 10.

Disposición del sustrato en un humedal artificial subsuperficial horizontal.



Basándose en las dimensiones especificadas en la Tabla 2 de largo, ancho y profundidad, el humedal artificial tiene un volumen total de 5,38 m³. El volumen que requiere a cada extremo la zona con piedra bola es de 0,88 m³, lo que da por resultado un volumen total de

1,75 m^3 . La piedra bola tiene una densidad de 1314,24 kg/ m^3 por lo que, la masa total es de 2306,49 kg.

El volumen total del humedal artificial es de 5,38 m^3 , de los cuales 1,75 m^3 están ocupados por piedra bola. El volumen restante, en la parte interior del humedal (ver sección de piedra cuarta en la figura 10), equivalente a 3,63 m^3 , corresponde a la cantidad de piedra cuarta requerida. Considerando una densidad de 1455,55 kg/ m^3 , para la masa total de piedra cuarta se obtiene 5279,27 kg.

Tabla 3.

Inventario del análisis de ciclo de vida para los materiales de construcción para el humedal artificial de la Escuela Creativa.

Material	Cantidad	Unidad	Observación	Masa unitaria (kg)	Masa total (kg)
Humedal Artificial					
Impermeabilizante	23,80	m^2	Entrada	0,014 [1]	3,91
Piedra bola	1793,94	kg	Entrada	-	1793,94
Piedra cuarta	4106,10	kg	Entrada	-	4106,10
Tubería 2" PVC	3,63	m^2	Entrada	2,49 [2]	1,49
Tapa 2" PVC	2,00	unidad	Entrada	0,02	0,04
Tee 2" PVC	3,00	unidad	Entrada	0,25	0,75
Adaptador macho 2"PVC	2,00	unidad	Entrada	0,10	0,20

[1] La masa de 3,91 kg se calcula considerando un área de 23,80 m^2 , un espesor de 175 μm (Coverttech, 2024) y una densidad de 940 kg/ m^3 , correspondiente al material HDPE (Rojas, 2023).

[2] La masa de 2,49 kg corresponde a 6 m lineales de tubería PVC de 2" SDR 41. A partir de esta relación, se puede calcular la masa correspondiente a 3,63 m lineales de tubería PVC de 2".

Unidad 3: Tanque recolector

El tanque recolector se constituye de un estañón de plástico de HDPE, con una capacidad comercial de 208 l y un diámetro de 0,58 m (ver Figura 9). Además del estañón, se identifican componentes de tubería PVC. En la Tabla 4 se detalla la cantidad de cada material, la observación menciona si se trata de una entrada o salida del volumen de control a analizar, la masa unitaria de cada material y la masa total, expresada en kilogramos.

Tabla 4.

Inventario del análisis de ciclo de vida de los elementos constructivos para el tanque recolector de la Escuela Creativa.

Material	Cantidad	Unidad	Observación	Masa unitaria (kg)	Masa total (kg)
Tanque recolector					
Estañón (208 l)	1,00	unidad	Entrada	6,00	6,00
Tee 2" PVC	2,00	unidad	Entrada	0,25	0,50
Tubería 2" PVC	1,40	m	Entrada	2,49 [1]	0,57

[1] La masa de 2,49 kg corresponde a 6 m lineales de tubería PVC de 2" SDR 41. A partir de esta relación, se puede calcular la masa correspondiente a 1,40 m lineales de tubería PVC de 2".

Caracterización del agua residual y caudal

Es fundamental que el inventario contemple los parámetros de calidad del agua y caudal correspondientes al funcionamiento y tratamiento realizado por el humedal artificial. En la Tabla 5 se presentan los parámetros utilizados para caracterizar el agua residual.

Tabla 5.

Valores de calidad de agua (mediana, n =8) del agua de entrada y salida del humedal artificial de la Escuela Creativa.

Ubicación	Observación	Parámetro			
		DQO (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	NH_3 (mg/l)	NO_3^- (mg/l)
Humedal artificial	Entrada	312,50	23,50	3,20	4,50
	Salida	45,00	13,60	1,50	0,95

Nota: Datos obtenidos en el marco del proyecto de investigación C2451, llevado a cabo por la Escuela de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.

La calidad del agua residual en la entrada del humedal artificial, presentada en la tabla anterior, representa un flujo sin tratamiento previo. Este tipo de descarga es común en vertimientos domésticos directos hacia cuerpos de agua superficiales o sistemas de drenaje pluvial, donde la probabilidad de generar condiciones anaeróbicas es baja. Por esta razón, no se consideró generación de metano en el afluente.

En contraste, en el efluente del humedal artificial sí se contempló la emisión de metano, debido a las condiciones anaeróbicas propias del sistema de flujo subsuperficial horizontal. Valverde (2012) estimó las tasas de emisión de metano en humedales de este tipo, considerando específicamente la presencia de *Heliconias*, la misma especie utilizada en el sistema de la Escuela Creativa. Según este estudio, la producción media de metano es de 3255 mg/m²/día.

Para estimar la emisión en el humedal de estudio, se multiplicó esta tasa (3255 mg/m²/día) por el área superficial del sistema 5,98 m², obteniendo una emisión diaria de 19474,9

mg/día. Considerando el tiempo de retención hidráulica (TRH) de 21,53 días, se calculó una emisión total de aproximadamente 0,4194 kilogramos de metano.

El TRH es un parámetro clave en ACV, ya que influye directamente en la generación de emisiones al aire. Para su cálculo, se emplearon las dimensiones del humedal artificial, área superficial de 5,98 m² y profundidad de 0,90 m, junto con una porosidad estimada del medio filtrante del 40 %. El volumen útil se obtuvo considerando solo el volumen poroso, ya que corresponde al espacio real disponible para el flujo del agua. A continuación, se muestra la ecuación utilizada.

$$\text{TRH (días)} = \frac{As (m^2) * P (m) * \eta (\%)}{Q (m^3/día)} = \frac{5,98 (m^2) * 0,90 (m) * 0,40}{0,10 (m^3/día)}$$

$$\text{TRH (días)} = 21,53 \text{ días}$$

Donde:

Q corresponde a caudal (m³/día)

As corresponde a el área superficial (m²)

P corresponde a la profundidad del humedal artificial (m)

η corresponde a la porosidad (%)

Finalmente, para estimar el caudal de agua residual tratado por el sistema, se empleó el uso de un caudalímetro que midió directamente el flujo de agua residual entrante. El caudal registrado para la Escuela Creativa, detallado en el Apéndice 1, fue de 0,10 m³/día.

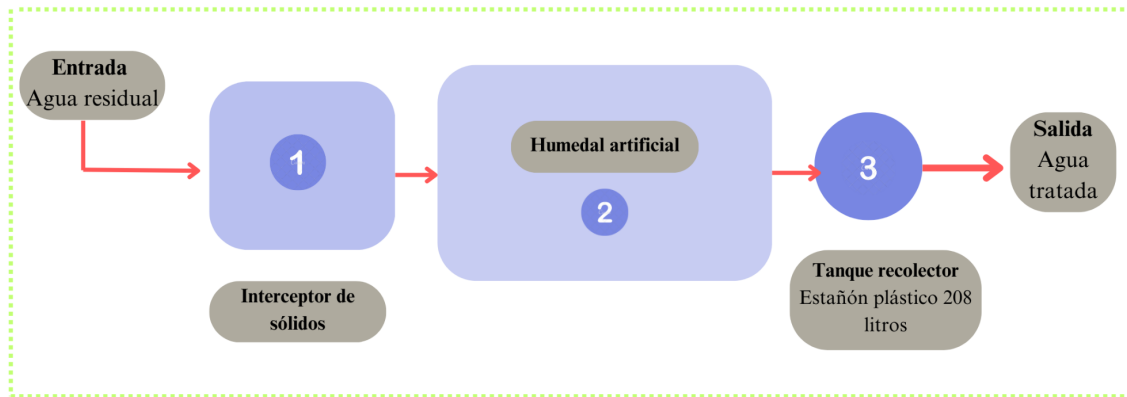
4.1.2 Hotel Los Pinos

Por su parte, en el Hotel Los Pinos, la fuente de agua residual proviene de la cocina de la casa de habitación de los dueños y de la lavandería del hotel, clasificándose igualmente como aguas grises. Se consideran tres unidades dentro del sistema general para evaluarlas por separado y determinar cuál de ellas genera más emisiones, así como también para analizar los materiales de construcción utilizados en cada unidad.

A continuación, en la Figura 11, se muestra el recorrido del flujo de agua residual dentro del tren de tratamiento del Hotel Los Pinos. El agua residual ingresa a los interceptores de sólidos, luego se dirige al humedal artificial para su tratamiento, y finalmente, el agua tratada se recoge en el tanque recolector.

Figura 11.

Recorrido del flujo de agua residual del Hotel Los Pinos: El flujo del agua se representa mediante flechas. Primero, el agua residual ingresa al interceptor de sólidos número 1. A continuación, el agua se conduce al humedal artificial, enumerado con el número 2, y finalmente, llega al tanque recolector, número 3.



El sistema de tratamiento comienza con un interceptor de sólidos (Figura 12) construido en concreto, cuyo volumen es de $1,54 \text{ m}^3$ considerando las paredes internas. Dentro de las entradas del interceptor de sólidos se considera los blocks de concreto, varillas deformadas #2 y #3, la mezcla de cemento, arena, piedra y agua y se contempla la tubería y los accesorios PVC de dos pulgadas que conecta el interceptor de sólidos con el humedal artificial.

Figura 12.

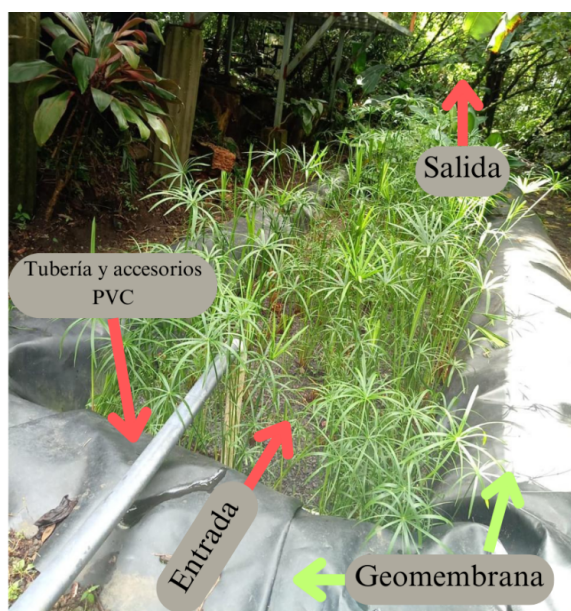
Tanque interceptor, Hotel Los Pinos. Las flechas indican el flujo del agua dentro del interceptor. Las paredes internas, tipo serpentín tienen la función de aumentar el tiempo de retención hidráulica.



Posteriormente, las aguas son tratadas en un humedal artificial (Figura 13) de 9,15 m de largo, 1,75 m de ancho y 0,7 m de profundidad. Este humedal artificial utiliza geomembrana como impermeabilizante, piedra bola y piedra cuarta como sustrato. Además, el humedal artificial emplea vegetación como el Cypriol (*Cyperus scariosus*) y la caña agria (*Costus spicatus*), cuya densidad de plantas es aleatoria.

Figura 13.

Humedal artificial, Hotel Los Pinos. Las flechas indican el flujo del agua residual dentro del humedal artificial.



Finalmente, las aguas tratadas se conducen mediante tubería y accesorios PVC a un tanque recolector donde se almacenan (Figura 14). Compuesto por un estanón plástico de 208 l de capacidad comercial, con una capacidad de retención de agua tratada de 186 l. Debido a que la tubería de salida regula el nivel del agua a una distancia de 0,30 m.

Figura 14.

Tanque recolector, Hotel Los Pinos. Las flechas indican la entrada y la salida del agua tratada.



A través de las visitas de campo, se logró determinar la cantidad de tuberías y accesorios de PVC necesarios para la conducción del agua dentro del sistema. En el caso del interceptor de sólidos, al ser una estructura de concreto, se tomaron las medidas de los blocks de concreto, así como las dimensiones de todo el sistema para estimar la cantidad de blocks que lo conformen. Para el humedal artificial, se registraron las dimensiones y se caracterizó el tipo de sustrato y el impermeabilizante utilizado. En cuanto al tanque recolector, se cuantificó la cantidad de estañones de plástico, tubería y accesorios PVC presentes en el sitio de estudio.

Adicionalmente, se realizó la estimación de otros materiales de construcción, como las varillas deformadas y grafiladas internas, la mezcla de cemento, arena, piedra, agua y sustrato. A continuación, se describe el procedimiento empleado para obtener las cantidades requeridas para cada uno de estos materiales.

Unidad 1: Interceptor de sólidos

En el caso del interceptor de sólidos del Hotel Los Pinos (ver Figura 12), se constituye de concreto por lo que, fue necesario contabilizar los materiales requeridos para la construcción del mismo. A continuación, se muestra el procedimiento utilizado para calcular los materiales listados en la Tabla 8.

Blocks de concreto y varillas deformadas y grafiladas

Para la estimación de los blocks de concreto requeridos, se calcula el volumen de las distintas estructuras que componen el interceptor de sólidos. En primer lugar, el volumen de concreto necesario para las dos paredes longitudinales, con dimensiones de 3,3 m de largo, 0,12 m de ancho y 0,90 m de altura, es de 0,71 m³. Por otro lado, las dos paredes transversales, con una longitud de 1,39 m (considerando los bordes internos), un ancho de 0,12 m y una altura de 0,90 m, requieren un volumen de concreto de 0,30 m³.

Asimismo, se incluyen los serpentines internos (ver Figura 12). Uno de estos serpentines presenta dimensiones de 1,35 m de largo, 0,12 m de ancho y 0,90 m de altura, lo que genera un volumen de concreto de 0,14 m³. Adicionalmente, se consideran tres serpentines con dimensiones de 1,18 m de largo, 0,12 m de ancho y 0,90 m de altura, cuyo volumen de concreto es de 0,38 m³. Por lo tanto, al sumar los volúmenes de todas las estructuras mencionadas, se obtiene un volumen total de concreto de 1,54 m³.

Considerando que las dimensiones de un block de concreto son 12 x 20 x 40 cm, con una masa unitaria de 10,7 kg, se obtiene que el volumen de cada bloque corresponde a 0,0096 m³. A partir de este cálculo, se estimó que se requieren aproximadamente 160,42 blocks, al dividir el volumen total de la construcción entre el volumen de un bloque unitario. No obstante, se recomienda añadir un factor de desperdicio del 10%, lo que incrementa el total a 176,59 blocks de concreto.

Tabla 5.

Cálculo de la cantidad de blocks de concreto para Hotel Los Pinos.

Localidad	Volumen total construcción (m³)	Volumen block unidad (m³)	Cantidad blocks	Factor de desperdicio (10%)	Masa total (kg)
Hotel Los Pinos	1,54	0,0096	160,54	176,59	1889,53

Para el cálculo de las varillas utilizadas del tanque recolector del Hotel Los Pinos, se consultó el Tomo 8 del Código Sísmico de Costa Rica, que establece que se deben emplear varillas #3 para el refuerzo vertical, con una distancia de 0,20 m entre cada varilla. Según esta normativa, es necesario colocar una varilla en cada una de las celdas de los blocks de concreto (CFIA, 2010). En cuanto al refuerzo horizontal, se emplean varillas #2, dispuestas a una distancia de 0,40 m entre ellas, de manera que se coloca una varilla cada dos hiladas de blocks. Para las columnas y vigas, se requieren cuatro varillas #3, ubicadas una en cada

esquina de la columna. Estas varillas deben estar confinadas con aros #2, colocados a una distancia de 0,20 m entre cada uno. En las vigas, se coloca una varilla #3 en la corona de las paredes, junto con aros #2, distribuidos igualmente cada 0,20 m. Bajo estas condiciones de diseño y la estructura del interceptor de sólidos se estima que se requirieron 44 varillas deformadas #3 y 20 varillas grafiladas #2 (ver Tabla 6).

Para la varilla #3 se utiliza una deformada de grado 40 S diámetro de $\frac{3}{8}$ " de 6 metros con una masa respectiva de 3,36 kg (ASTM A-615, sf). Para la varilla #2 (5.25 mm) se utiliza una grafilada de 6 metros con una masa de 1,02 kg (ArcelorMittal, 2017).

Tabla 6.

Cálculo de varillas deformadas y grafiladas.

Localidad	Volumen total construcción (m^3)	Cantidad de varillas #3	Cantidad de varillas #2
Hotel Los Pinos	1,54	44,00	20,00
Masa total (kg)	-	147,84	29,80

Mezcla cemento, arena, piedra y agua

Para el cálculo de la mezcla de concreto, se consideró una relación de 1 parte de cemento, 2 partes de arena y 3 partes de piedra, es decir, una relación general de 1:2:3. La cantidad de agua se ajusta para lograr una consistencia adecuada, requiriendo aproximadamente 200 l por cada m^3 de construcción. A partir de estos valores se determina la dosificación adecuada de cada material para 1 m^3 de construcción (CFIA, 2010). Si se dispone de un volumen total de construcción de 1,54 m^3 , la masa en kilogramos se obtiene multiplicando dicho volumen por la dosificación y la densidad de cada material. Las cantidades específicas de cada uno se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7.

Cálculo de mezcla de cemento, arena, piedra y agua que constituye el interceptor de sólidos del Hotel Los Pinos.

Material	Dosificaciones	Unidad	Densidad (kg/m^3)	Masa (kg)
Arena	0,44	m^3 arena / m^3 construcción	1600,00	1084,16
Piedra	0,66	m^3 arena / m^3 construcción	1500,00	1524,60
Agua	200,00	l / m^3 construcción	1000,00	308,00
Cemento	7,50	sacos de 50 kg	1400,00	577,50

Tabla 8.

Inventario para el análisis de ciclo de vida de los elementos constructivos del interceptor de sólidos del Hotel Los Pinos.

Material	Cantidad	Unidad	Observación	Masa unitaria (kg)	Masa total (kg)
Interceptor de sólidos					
Block concreto (12x20x40 cm)	176,59	unidad	Entrada	10,70	1889,53
Varilla grafilada #2	20,00	unidad	Entrada	1,49	29,80
Varilla deformada #3	44,00	unidad	Entrada	3,36	147,84
Cemento	11,55	sacos	Entrada	50,00	577,50
Agua	308,00	l	Entrada	-	308,00
Piedra	1,02	m^3	Entrada	-	1524,60
Arena	0,68	m^3	Entrada	-	1084,16

Material	Cantidad	Unidad	Observación	Masa unitaria (kg)	Masa total (kg)
Interceptor de sólidos					
Codos 90 2"	4,00	unidad	Entrada	0,16	0,64
Tubería 2" PVC	1,30	m	Entrada	2,49 [1]	0,53

[1] La masa de 2,49 kg corresponde a 6 m lineales de tubería PVC de 2" SDR 41. A partir de esta relación, se puede calcular la masa correspondiente a 1,3 m lineales de tubería PVC de 2".

Unidad 2: Humedal artificial

En el humedal artificial (ver Figura 13) se constituye de impermeabilizante, sustrato piedra bola y piedra cuarta, tubería y accesorios de PVC. A continuación, se describe el procedimiento empleado para calcular los materiales mencionados.

Impermeabilizante

En el Hotel Los Pinos, el impermeabilizante utilizado fue geomembrana cuyo material corresponde a HDPE y su espesor recomendado es de 500 μm . Para calcular el área mínima requerida, se determinaron las dimensiones del humedal artificial. Además, se añadió 1 m adicional en cada extremo. A continuación, se calcularon el área lateral del humedal artificial (paredes largas), el área del fondo y, consecuentemente, el área de las dos paredes cortas. Finalmente, se sumaron todas las áreas para obtener el área total de impermeabilizante necesario. Según lo indicado en la Tabla 9, el área total de geomembrana requerida para el Hotel Los Pinos es de 36,87 m^2 .

Tabla 9.

Cálculo de impermeabilizante.

Largo b (m)	Ancho c (m)	Profundidad a (m)	Área lateral (m^2)	Área fondo (m^2)	Área pared corta (m^2)	Área total (m^2)
9,15	1,75	0,70	15,61	16,01	5,25	36,87

Nota: $\text{Área lateral} = 2*((b+1+1)*a)$. $\text{Área fondo} = b*c$. $\text{Área pared corta} = 2*(c+1+1)*a$.
 $\text{Área total} = \text{área lateral} + \text{área fondo} + \text{área pared corta}$.

Sustrato

Basándose en las dimensiones especificadas de la Tabla 9, el humedal artificial de Hotel Los Pinos tiene un volumen de $11,21 \text{ m}^3$. De acuerdo a la Figura 8, se requiere colocar al menos 0,75 m de piedra bola desde cada extremo hacia el interior del humedal artificial. El volumen que requiere a cada extremo la zona con piedra bola es de $0,92 \text{ m}^3$, lo que da por resultado un volumen total de $1,84 \text{ m}^3$. La piedra bola tiene una densidad de $1314,24 \text{ kg/m}^3$ por lo que, la masa total es de 2414,92 kg.

El volumen total del humedal artificial es de $11,21 \text{ m}^3$, de los cuales $1,84 \text{ m}^3$ están ocupados por piedra bola. El volumen restante, equivalente a $9,37 \text{ m}^3$, corresponde a la cantidad de piedra cuarta requerida. Considerando una densidad de $1455,55 \text{ kg/m}^3$, la masa total de piedra cuarta se obtiene 13640 kg.

Tabla 10.

Inventario del análisis de ciclo de vida de los elementos constructivos del humedal artificial del Hotel Los Pinos.

Material	Cantidad	Unidad	Observación	Masa unitaria (kg)	Masa total (kg)
Humedal artificial					
Piedra cuarta	13640,29	kg	Entrada	-	13640,29
Piedra bola	2414,92	kg	Entrada	-	2414,92
Impermeabilizante (geomembrana)	36,87	m^2	Entrada	0,09 [1]	82,96
Codo 45° 2" PVC	2,00	unidad	Entrada	0,07	0,14
Tee 2" PVC	2,00	unidad	Entrada	0,25	0,50
Tapa 2" PVC	2,00	unidad	Entrada	0,02	0,04
Tubería 2" PVC	3,80	m	Entrada	2,49 [2]	1,56

[1] La masa de 0,09 kg corresponde a un área de $0,20 \times 0,20 \text{ m}$ de geomembrana. A partir de esta relación, se puede calcular la cantidad necesaria para cubrir $36,87 \text{ m}^2$.

[2] La masa de 2,49 kg corresponde a 6 m lineales de tubería PVC de 2" SDR 41. A partir de esta relación, se puede calcular la masa correspondiente a 3,80 m lineales de tubería PVC de 2".

Unidad 3: Tanque recolector

Se utiliza un estanón de plástico de HDPE, como tanque recolector (ver Figura 14). En la Tabla 11 se detalla la cantidad de estanones, accesorios y tubería PVC. La observación menciona si se trata de una entrada o salida del volumen de control a analizar, la masa unitaria de cada material y la masa total, expresada en kilogramos.

Tabla 11.

Inventario del análisis de ciclo de vida de los elementos constructivos del tanque recolector del Hotel Los Pinos.

Material	Cantidad	Unidad	Observación	Masa unitaria (kg)	Masa total (kg)
Tanque recolector					
Estañon (208 l)	1,00	unidad	Entrada	6,00	6,00
Codos 45° 2"PVC	3,00	unidad	Entrada	0,07	0,21
Tee 2" PVC	1,00	unidad	Entrada	0,25	0,25
Unión 2" PVC	1,00	unidad	Entrada	0,10	0,10
Tubería 2" PVC	0,80	m	Entrada	2,49 [1]	0,33

[1] La masa de 2,49 kg corresponde a 6 m lineales de tubería PVC de 2" SDR 41. A partir de esta relación, se puede calcular la masa correspondiente a 0,8 m lineales de tubería PVC.

Con base en los inventarios elaborados para cada unidad de tratamiento, se contabilizó la inversión correspondiente a cada material. Cabe destacar que los costos están calculados con precios sujetos para el año 2025 por lo que podrían existir diferencias respecto a los precios vigentes en 2010, año en que se llevó a cabo la construcción. El desglose detallado de los costos se presenta en el apéndice 18.

Caracterización del agua residual y caudal

Es fundamental que el inventario contemple los parámetros de calidad del agua y caudal correspondientes al funcionamiento y tratamiento realizado por el humedal artificial. En la Tabla 12 se presentan los parámetros utilizados para caracterizar el agua residual.

Tabla 12.

Valores de calidad de agua (mediana, $n=7$) del agua de entrada y salida del humedal artificial del Hotel Los Pinos.

Ubicación	Observación	Parámetro			
		DQO (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	NH_3 (mg/l)	NO_3^- (mg/l)
Humedal artificial	Entrada	825,00	20,50	2,00	6,00
	Salida	391,00	28,00	1,00	2,70

Nota: Datos obtenidos en el marco del proyecto de investigación C2451, llevado a cabo por la Escuela de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.

La calidad del agua residual en la entrada del humedal artificial, presentada en la tabla anterior, representa un flujo sin tratamiento previo. Este tipo de descarga es común en vertimientos domésticos directos hacia cuerpos de agua superficiales o sistemas de drenaje pluvial, donde la probabilidad de generar condiciones anaeróbicas es baja. Por esta razón, no se consideró generación de metano en el afluente.

Por el contrario, en el caso del efluente proveniente del humedal artificial, se incluyó la emisión de metano en la evaluación, dado que las condiciones anaeróbicas inherentes al sistema de flujo subsuperficial horizontal propician su generación. Valverde (2012) calculó las tasas de emisión de metano en humedales con estas características, considerando la presencia de Heliconias, la misma especie vegetal utilizada en el sistema del Hotel Los Pinos. De acuerdo con dicho estudio, la emisión promedio de metano asciende a 3255 mg/m² por día.

Para estimar la emisión en el humedal de estudio, se multiplicó esta tasa por el área superficial del sistema 16,01 m², obteniendo una emisión diaria de 52112,55 mg/día. Considerando el tiempo de retención hidráulica (TRH) de 1,66 días, se calculó una emisión total de aproximadamente 0,0865 kilogramos de metano.

Para el cálculo del TRH se emplearon las dimensiones del humedal artificial, área superficial de 16,01 m², y profundidad de 0,70 m, junto con una porosidad estimada del medio filtrante del 40 %. El volumen útil se obtuvo considerando solo el volumen poroso, ya que corresponde al espacio real disponible para el flujo del agua. A continuación, se muestra el cálculo realizado.

$$\text{TRH (días)} = \frac{16,01 \text{ (m}^2\text{)} * 0,70 \text{ (m)} * 0,40}{2,70 \text{ (m}^3\text{/día)}} = 1,66 \text{ días}$$

Finalmente, para estimar el caudal de ingreso al sistema, se empleó un caudalímetro que midió directamente el flujo de agua potable entrante. Se aplicó un factor de retorno recomendado por el AyA del 90% esto debido al posible consumo que existe dentro de la casa de habitación. El caudal registrado para el Hotel Los Pinos, detallado en el Apéndice 2, fue de 2,70 m³/día.

4.2 Evaluación e interpretación del impacto ambiental

A continuación, se presenta la evaluación del impacto ambiental del sistema de tratamiento de aguas residuales instalado en la Escuela Creativa y en el Hotel Los Pinos. Dicha evaluación ambiental se realizó por las tres unidades principales de tratamiento. El sistema de tratamiento se divide para evaluar qué unidad y qué material de construcción tienen mayor impacto ambiental en tres categorías: cambio climático, eutrofización en agua dulce y en agua salada. Finalmente, se comparó el agua cruda con el agua tratada de cada humedal artificial según estas categorías.

4.2.1 Escuela Creativa

El impacto ambiental analizado en la Escuela Creativa se realizó de acuerdo a sus tres unidades de funcionamiento (ver Figura 6) de manera individual. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el interceptor de sólidos.

Unidad 1: Interceptor de sólidos

En la Tabla 13, se detallan los resultados obtenidos para cada categoría de impacto según cada material que compone el interceptor de sólidos.

Tabla 13.

Resultados expresados en la masa total del análisis del inventario del interceptor de sólidos del sistema de tratamiento de la Escuela Creativa, según SimaPro.

Material	Categoría de impacto		
	Cambio climático ($kg\ CO_2\ eq/m^3$)	Eutrofización agua dulce ($kg\ P\ eq/m^3$)	Eutrofización agua salada ($kg\ N\ eq/m^3$)
Estañones	2,32E-02	8,37E-08	8,66E-04
Tee 2" PVC	1,32E-03	5,20E-09	5,54E-05
Tubería 2 " PVC	5,31E-04	1,79E-09	1,14E-04
Total	2,51E-02	9,07E-08	1,04E-03

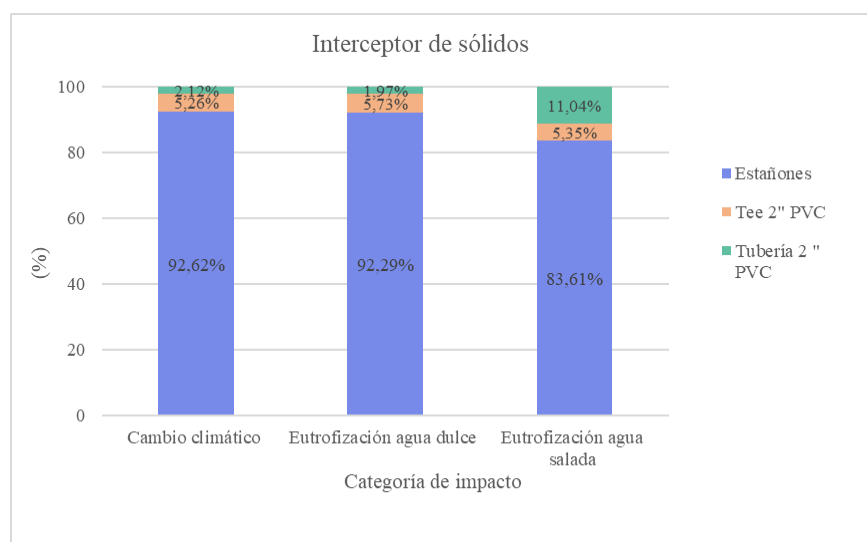
Según la Tabla 13, los dos estañones de HDPE son el material con mayor impacto ambiental en las tres categorías evaluadas. En la categoría de cambio climático, generan 2,32E-02 kg CO₂ eq/m³, lo que representa el 92,62% del impacto total (ver Figura 15). Para la eutrofización de agua dulce, su contribución alcanza 8,37E-08 kg P eq/m³ (92,29%), mientras que en la eutrofización de agua salada generan 8,66E-04 kg N eq/m³, con un 83,61% del impacto total. Al sumar todos materiales de cada uno de los impactos evaluados, se obtiene un total de 2,51E-02 kg CO₂ eq/m³ para el cambio climático, 9,07E-08 kg P eq/m³ para la eutrofización en agua dulce y 1,04E-03 kg N eq/m³ para la eutrofización en agua salada.

Estas diferencias en los impactos ambientales se explican por la variación en la masa de los materiales. Los estañones de HDPE tienen una masa aproximadamente un 89,91% mayor que las tuberías y accesorios de PVC, lo que amplifica su impacto cuando se evalúa por unidad de volumen. No obstante, diversos estudios han señalado que la producción de PVC implica un mayor consumo energético y una mayor contribución al calentamiento global en comparación con el polietileno. Según Alsabri y Al-Ghamdi (2020), esto se debe al uso de cloruro de vinilo, un derivado del petróleo. Asimismo, Simion et al. (2024) concluyó que las tuberías de PVC generan impactos ambientales más altos en todas las categorías analizadas en SimaPro.

En resumen, aunque en la Figura 15 los estañones de HDPE parecen tener un mayor impacto ambiental por categoría, esto se debe principalmente a la diferencia de masa entre los materiales evaluados. Cuando el análisis se realiza en función de un kilogramo de material, el PVC resulta ser el material con mayor impacto ambiental en la mayoría de las categorías evaluadas.

Figura 15.

Resultados expresados en porcentajes de contribución para el interceptor de sólidos de la Escuela Creativa según las tres categorías de impacto. El eje “y” corresponde al porcentaje de contribución.



A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el humedal artificial de la Escuela Creativa.

Unidad 2: Humedal artificial

En la Tabla 14, se detallan los resultados obtenidos para cada categoría de impacto según cada material que compone el humedal artificial.

Tabla 14.

Resultados expresados en la masa total del análisis del inventario del humedal artificial de la Escuela Creativa, según cada categoría de impacto.

Material	Categoría de impacto		
	Cambio climático (kg CO ₂ eq/m ³)	Eutrofización agua dulce (kg P eq/m ³)	Eutrofización agua salada (kg N eq/m ³)
Impermeabilizante	9,21E-03	2,48E-06	4,22E-08
Piedra bola	5,03E-03	8,97E-07	1,48E-07
Piedra cuarta	5,21E-02	1,99E-05	1,55E-06
Otros [1]	7,98E-03	2,77E-07	2,48E-08
Total	7,43E-02	2,35E-05	1,78E-06

[1] Corresponde a tubería y accesorios PVC.

Según la Tabla 14, la piedra cuarta es el material con mayor impacto ambiental en las tres categorías evaluadas en comparación con los demás materiales. En la categoría de cambio climático, genera 5,21E-02 kg CO₂ eq/m³, lo que representa el 70,10% del impacto total (ver Figura 16). Para la eutrofización de agua dulce, su contribución es de 1,99E-05 kg P eq/m³ (84,45%) y, en la eutrofización de agua salada, alcanza 1,55E-06 kg N eq/m³, con un 87,60% del impacto total (ver Figura 16). En términos globales, al sumar todos materiales de cada uno de los impactos evaluados da como resultado 7,43E-02 kg CO₂ eq/m³ para el cambio climático, 2,35E-05 kg P eq/m³ para la eutrofización en agua dulce y 1,78E-06 kg N eq/m³ para la eutrofización en agua salada.

La piedra cuarta genera un mayor impacto debido a que su masa es aproximadamente un 39,06% superior a la de la piedra bola, el impermeabilizante, la tubería y los accesorios de PVC.

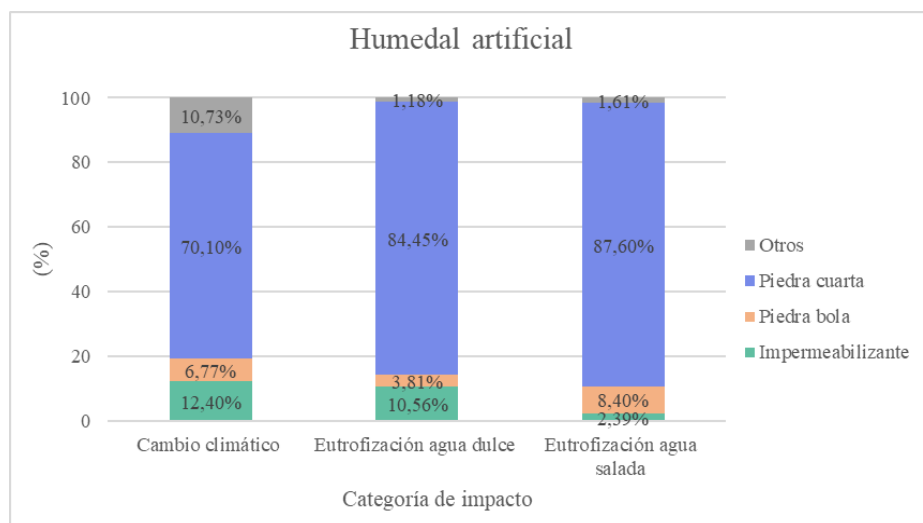
Estudios recopilados por Bianco y Andrea (2019) sobre inventarios del ciclo de vida en diversas técnicas de extracción, corte y acabado de piedras indican que la comparación entre estudios es compleja debido a la variabilidad en tecnologías y métodos empleados, lo que dificulta su replicabilidad. A diferencia de otros materiales, la producción de piedra dimensional (natural, ornamental o de construcción) no sigue un proceso industrial estandarizado, ya que este varía según las propiedades de la piedra, lo que añade desafíos adicionales a su análisis ambiental.

Por ello, es fundamental desarrollar una metodología bien definida para el inventario del ciclo de vida en la producción de piedras dimensionales. Independientemente del tipo de piedra, se identifican tres etapas esenciales: extracción, corte y acabado, cuyos impactos ambientales pueden variar significativamente (Bianco y Andrea, 2019).

En conclusión, la industria de la piedra ornamental enfrenta una creciente presión para alinearse con políticas de sostenibilidad y economía circular (Bianco y Andrea, 2019). Además, la dureza de la piedra influye directamente en su producción, ya que cuanto menor es el tamaño de la piedra, más procesamiento mecánico se requiere, lo que implica un mayor consumo de energía.

Figura 16.

Resultados expresados en porcentajes de contribución para el humedal artificial de la Escuela Creativa según las categorías de impacto. El eje “y” corresponde al porcentaje de contribución.



A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el tanque recolector de la Escuela Creativa.

Unidad 3: Tanque recolector

Tabla 15.

Resultados expresados en la masa total del análisis del inventario del tanque recolector de la Escuela Creativa, según cada categoría de impacto.

Material	Categoría de impacto		
	Cambio climático ($kg\ CO_2\ eq/m^3$)	Eutrofización agua dulce ($kg\ P\ eq/m^3$)	Eutrofización agua salada ($kg\ N\ eq/m^3$)
Estañón	1,16E-02	4,14E-08	4,19E-08
Tee 2" PVC	1,28E-03	5,72E-09	5,05E-09
Tubería 2 " PVC	2,07E-03	1,01E-07	6,99E-09
Total	1,50E-02	1,48E-07	5,40E-08

Según la Tabla 15, los materiales que generaron el mayor impacto ambiental en las categorías de cambio climático y eutrofización en agua salada fueron el estañón de HDPE. Este material contribuyó con aproximadamente 1,16E-02 kg CO₂ eq/m³, lo que representa el 77,62% del impacto total (ver Figura 17), y 4,19E-08 kg N eq/m³, con un 77,69% de contribución (ver Figura 17). Por otro lado, en la categoría de eutrofización en agua dulce, la tubería de PVC generó un impacto de 1,01E-07 kg P eq/m³, representando el 68,27% (ver Figura 17).

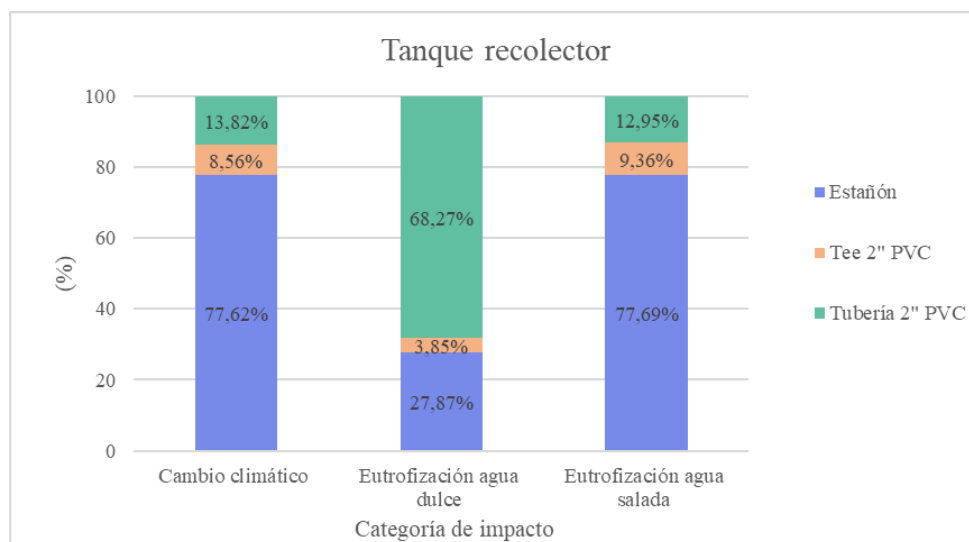
Ahora bien, en el caso del tanque recolector, no se evidencia una influencia clara en la diferencia de masa, como sí ocurrió en el interceptor de sólidos. Sin embargo, en la Figura 17 se destaca que, en la categoría de eutrofización en agua dulce, la tubería de PVC es la que genera el mayor impacto, con 1,01E-07 kg P eq/m³ (68,27%). Según PAVCO (2017), este impacto se debe principalmente a la producción de la resina, la materia prima del PVC. Sin embargo, la fabricación de la tubería es eficiente, ya que requiere poca energía y agua, y permite la reutilización de desechos de PVC como material molido.

Por otro lado, Chunzhi et al. (2016) realizó una comparación de diferentes procesos de fabricación de tuberías plásticas, incluyendo la producción de materias primas, el transporte y el consumo energético. Este estudio coincide en que la mayor emisión de contaminantes proviene de la producción de resina primaria, por lo que recomienda reducir su consumo para minimizar el impacto ambiental. Finalmente, Herrera (2021) señala que la

eutrofización del agua dulce también se ve afectada por el desecho de materiales como nylon, carbonato de calcio, sacos de nylon y estearato de calcio.

Figura 17.

Resultados expresados en porcentajes de contribución del tanque recolector de la Escuela Creativa según las categorías de impacto. El eje “y” corresponde al porcentaje de contribución.



Al analizar en conjunto las tres unidades de tratamiento presentes en la Escuela Creativa, se observa que el humedal artificial genera el mayor impacto en la categoría de cambio climático, con aproximadamente el 64,98% del total, equivalente a $7,43\text{E-}02 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$ debido a la piedra cuarta. En la categoría de eutrofización en agua dulce, también es el humedal artificial es el que más contribuye, representando un 98,99% del impacto ($2,35\text{E-}05 \text{ kg P eq/m}^3$) principalmente por la piedra cuarta. Por otro lado, en la eutrofización en agua salada, el mayor impacto proviene del interceptor de sólidos, que representa el 99,82% del total ($1,04\text{E-}03 \text{ kg N eq/m}^3$) principalmente por el estañón de HDPE.

Además, al identificar los impactos asociados a los materiales de construcción, se evaluaron los parámetros de calidad del agua antes y después del tratamiento, como método para analizar el impacto ambiental en las categorías de cambio climático, eutrofización en agua dulce y eutrofización marina. A continuación, se muestran los resultados.

Comparación entre línea base y sistema de tratamiento

Para caracterizar el agua residual, se utilizaron los parámetros de la Tabla 5 y se creó dos escenarios en SimaPro. El escenario 1 refleja la calidad del agua antes de ingresar al humedal artificial es decir, simula la descarga directa del agua sin tratar al ambiente. Para simular esta descarga directa, se consideró un metro lineal de tubería de PVC. Dado que esta descarga puede dirigirse a un cuerpo de agua o a un sistema de drenaje por escorrentía, es poco probable que se generen condiciones anaeróbicas. Por lo tanto, no se consideró la generación de metano en este escenario. El escenario 1 se comparó con el escenario 2, en el cual se refiere a el agua residual que sí recibe tratamiento mediante el uso del humedal artificial. El escenario 2, sí se consideró una generación de metano debido a que al ser de flujo subsuperficial horizontal el agua residual fluye de forma horizontal a través del sustrato, justo por debajo de la superficie, lo que provoca condiciones mayormente anaeróbicas.

Las concentraciones de los parámetros de calidad del agua, expresadas en miligramos por litro, se ajustaron a la unidad funcional de metro cúbico aflorado del afluente. Para ello, se convirtieron a kilogramos por metro cúbico y se multiplicaron por el factor de emisión de SimaPro, obteniendo los resultados expresados en kilogramos por metro cúbico de agua tratada, como se detalla en los datos de entrada del Apéndice 5.

Para cada parámetro de calidad del agua, se consideraron dos posibles lugares de descarga del agua residual: ríos y aguas subterráneas, con el fin de reflejar de manera más precisa los posibles impactos.

A continuación, se presentan los resultados de la simulación para el escenario 1, donde el agua residual se descarga directamente al ambiente o al suelo, para luego compararlo con el escenario 2, que corresponde al tratamiento de agua mediante el humedal artificial.

Tabla 16.

Resultados de la evaluación del análisis de ciclo de vida para los parámetros de calidad del agua en la Escuela Creativa, según cada categoría de impacto para el escenario 1.

Parámetro	Clasificación	Cambio climático ($kg\ CO_2\ eq/m^3$)	Eutrofización agua dulce ($kg\ P\ eq/m^3$)	Eutrofización agua salada ($kg\ N\ eq/m^3$)
DQO	Río	-	-	-
	Aguas subterráneas	-	2,27E-03	-
Fosfato PO_4^{3-}	Río	-	7,76E-03	-
	Aguas subterráneas	-	7,76E-03	-
Nitrógeno amoniacal (NH_3)	Río	-	-	-
	Aguas subterráneas	-	-	9,50E-04
Nitrato(NO_3^-)	Río	-	-	-
	Aguas subterráneas	-	-	3,02E-04
Metano CH_4	Aire	-	-	-
Tubería PVC		1,51E-03	7,38E-08	5,09E-09
Total		1,51E-03	1,78E-02	1,25E-03

Nota: Las casillas que tienen “-” corresponde a que no generan ningún impacto ambiental en dicha categoría.

Tabla 17.

Resultados del análisis del inventario de los parámetros de calidad del agua en la Escuela Creativa, según cada categoría de impacto para el escenario 2.

Parámetro	Clasificación	Cambio climático ($kg\ CO_2\ eq/m^3$)	Eutrofización agua dulce ($kg\ P\ eq/m^3$)	Eutrofización agua salada ($kg\ N\ eq/m^3$)
DQO	Río	-	-	-
	Aguas subterráneas	-	3,27E-04	-
Fosfato PO_4^{3-}	Río	-	4,49E-03	-
	Aguas subterráneas	-	4,49E-03	-
Nitrógeno amoniacal (NH_3)	Río	-	-	-
	Aguas subterráneas	-	-	4,45E-04
Nitrato (NO_3^-)	Río	-	-	-
	Aguas subterráneas	-	-	6,37E-05
Metano CH_4	Aire	2,06E-02		
Total		2,06E-02	9,31E-03	5,09E-04

Nota: Las casillas que tienen “-” corresponde a que no generan ningún impacto ambiental en dicha categoría.

Al comparar los resultados de la Tabla 16 y la Tabla 17, se observa una disminución considerable en los impactos ambientales entre el escenario 1 y el escenario 2 para las categorías de eutrofización en agua dulce y agua salada.

En el escenario 1, la eutrofización en agua dulce alcanzó un total de 1,78E-02 kg P eq/m³, valor superior al registrado en el escenario 2 (9,31E-03 kg P eq/m³), una disminución del 47,7%. De manera similar, en el caso de la eutrofización en agua salada, el escenario 1 presentó un mayor impacto ambiental, con 1,25E-03 kg N eq/m³, frente a los 5,09E-04 kg N eq/m³ observados en el escenario 2. Por lo que, se puede ver una disminución del 59,3% entre escenarios para dicha categoría.

Al comparar los escenarios en la categoría de cambio climático, se observa que el escenario 2 presenta un impacto ambiental, principalmente debido a las emisiones de metano, que alcanzan un valor de $2,06E-02 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$. Sin embargo, los humedales artificiales son sumideros de carbono porque sus plantas capturan CO_2 y, al morir, la materia orgánica se acumula en suelos anegados donde se descompone lentamente por la falta de oxígeno. Esto permite almacenar grandes cantidades de carbono durante siglos, ayudando a reducir los gases de efecto invernadero. Aunque pueden emitir metano, el balance total de carbono suele ser positivo, ya que almacenan más carbono del que liberan, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático (Hernandez, 2009).

La construcción de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales conlleva ciertos impactos ambientales, como las emisiones asociadas a la producción de materiales y la alteración temporal del terreno. Sin embargo, estos efectos son menores y son ampliamente compensados por los beneficios que ofrecen, reproducen procesos naturales, tienen bajo coste operativo y se adaptan fácilmente tanto a entornos rurales como urbanos.

La aplicación del ACV permite evaluar su sostenibilidad de forma integral, analizando impactos en todas las etapas del sistema y facilitando la identificación de oportunidades de mejora. En este contexto, los humedales artificiales se consolidan como una solución eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales.

Los resultados obtenidos evidencian que el uso de humedales artificiales permite un tratamiento efectivo del agua residual, reduciendo significativamente los impactos en categorías como la eutrofización de agua dulce y salada. Estos sistemas actúan como mecanismos naturales de purificación, favoreciendo la eliminación de nutrientes y contaminantes antes de la liberación del agua al medio ambiente. Así, contribuyen a minimizar los efectos negativos sobre los ecosistemas acuáticos y a mejorar la calidad del agua.

Análisis de sensibilidad y incertidumbre

Al analizar los resultados presentados en los apéndices 7, 8, 9, 10 y 11 se observa que ningún material excede el $\pm 10 \%$ de variación, ni ningún parámetro de calidad de agua evaluado en cada escenario, lo que permite concluir que ninguno muestra una sensibilidad significativa. No se realizó el análisis de sensibilidad para la categoría de cambio climático en el escenario 1, ya que no se registraron impactos asociados. En el caso del escenario 2, el metano fue el único parámetro que generó un impacto ambiental en esta categoría, con valores de sensibilidad de $-4,87 \%$ y $6,12 \%$ al aplicar variaciones del -10% y $+10 \%$, respectivamente.

Al aplicar el análisis de incertidumbre se obtuvo $12,50 \%$. Esto implica que los resultados son robustos frente a pequeñas variaciones en los datos de entrada. En otras palabras, el

comportamiento medio del sistema está bien representado, ya que perturbaciones menores no generan cambios relevantes en los resultados.

El análisis de sensibilidad local, basado en variaciones de $\pm 10\%$ en los parámetros clave, no evidenció alteraciones sustanciales en las categorías de impacto evaluadas. Esto demuestra que el modelo responde de manera estable ante incertidumbres limitadas, lo que refuerza la solidez de las conclusiones obtenidas. Se interpreta que, dentro del rango considerado, los insumos no tienen una influencia crítica de manera individual, y que el escenario base refleja adecuadamente el comportamiento general del sistema.

4.2.2 Hotel Los Pinos

El impacto ambiental analizado en el Hotel Los Pinos se realizó de acuerdo a sus tres unidades de funcionamiento de manera individual (ver Figura 11).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el interceptor de sólidos del Hotel Los Pinos.

Unidad 1: Interceptor de sólidos

Tabla 18.

Resultados expresados en la masa total del análisis del interceptor de sólidos del Hotel Los Pinos, según cada categoría de impacto.

Material	Categoría de impacto		
	Cambio climático ($kg\ CO_2\ eq/m^3$)	Eutrofización agua dulce ($kg\ P\ eq/m^3$)	Eutrofización agua salada ($kg\ N\ eq/m^3$)
Block concreto	1,31E-02	2,84E-06	2,66E-07
Varillas	3,56E-03	2,03E-06	1,42E-07
Cemento	6,85E-03	1,60E-06	2,02E-07
Piedra mezcla	5,07E-02	6,29E-06	3,86E-07
Otros	5,35E-04	9,99E-09	1,08E-09
Total	7,48E-02	1,28E-05	9,97E-07

Nota: La categoría de otros corresponde a los materiales de agua, arena, codos y tubería PVC.

Según la Tabla 18, la piedra utilizada para la mezcla del concreto es el material con mayor impacto ambiental en las tres categorías evaluadas. En la categoría de cambio climático, genera $5,07\text{E-}02$ kg CO_2 eq/ m^3 , lo que representa el 67,85% del impacto total (ver Figura 18). En cuanto a la eutrofización en agua dulce, su contribución alcanza $6,29\text{E-}06$ kg P eq/ m^3 (49,24%), y en la eutrofización en agua salada, genera $3,86\text{E-}07$ kg N eq/ m^3 , correspondiente al 38,74% del total (ver Figura 18).

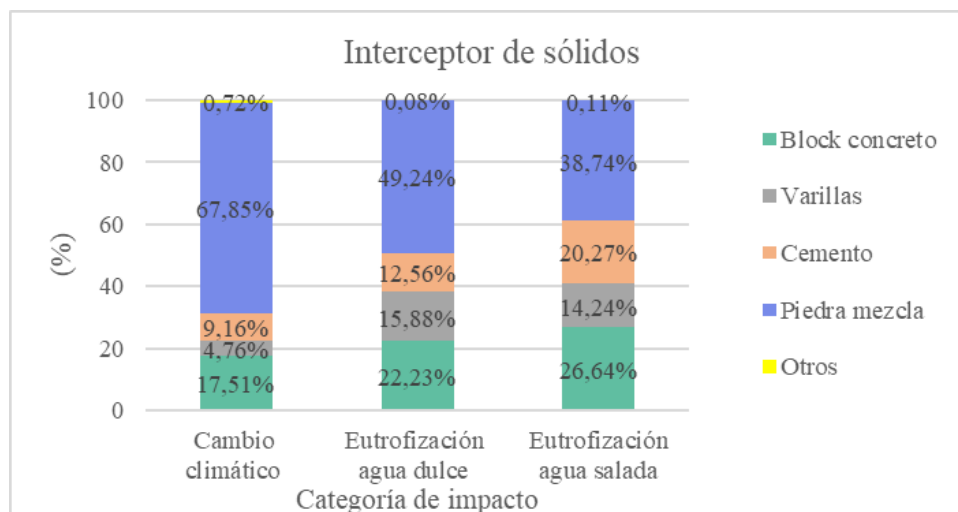
Al sumar todos materiales de cada uno de los impactos evaluados, se obtiene un total de $7,48\text{E-}02$ kg CO_2 eq/ m^3 para el cambio climático, $1,28\text{E-}05$ kg P eq/ m^3 para la eutrofización en agua dulce y $9,97\text{E-}07$ kg N eq/ m^3 para la eutrofización en agua salada.

Dicho esto, valorando que los resultados de la tabla 18 la piedra mezcla (piedra cuartilla) es el material con mayor impacto ambiental, según Bianco y Andrea (2019) la producción de piedra ornamental presenta una alta variabilidad, principalmente debido a las propiedades específicas de cada tipo de piedra. Esta heterogeneidad dificulta el análisis ambiental de la industria, ya que no existe un proceso estandarizado que permita una comparación directa entre estudios. Por ello, es fundamental definir claramente las etapas del proceso productivo, desde la extracción hasta la disposición final de la materia prima, para lograr una evaluación más precisa de los impactos.

En este sentido, la piedra cuartilla, al ser de menor tamaño en comparación con otras piedras como la piedra bola o la piedra cuarta, requiere un procesamiento mecánico más intensivo. Este mayor grado de transformación implica un incremento en el consumo energético, lo que a su vez eleva significativamente su impacto ambiental.

Figura 18.

Resultados expresados en porcentajes de contribución del interceptor de sólidos del Hotel Los Pinos según las categorías de impacto. El eje “y” corresponde al porcentaje de contribución.



A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el humedal artificial del Hotel Los Pinos.

Unidad 2: Humedal artificial

Tabla 19.

Resultados expresados en la masa total del análisis del humedal artificial del Hotel Los Pinos, según cada categoría de impacto.

Material	Categoría de impacto		
	Cambio climático ($kg\ CO_2\ eq/m^3$)	Eutrofización agua dulce ($kg\ P\ eq/m^3$)	Eutrofización agua salada ($kg\ N\ eq/m^3$)
Piedra cuarta	6,41E-03	2,44E-06	1,90E-07
Piedra bola	2,51E-04	4,47E-08	7,40E-09
Impermeabilizante	7,22E-03	1,94E-06	3,30E-08
Otros	2,66E-04	1,05E-08	9,32E-10
Total	1,41E-02	4,44E-06	2,32E-07

Nota: La categoría de otros corresponde a los materiales tubería y accesorios PVC.

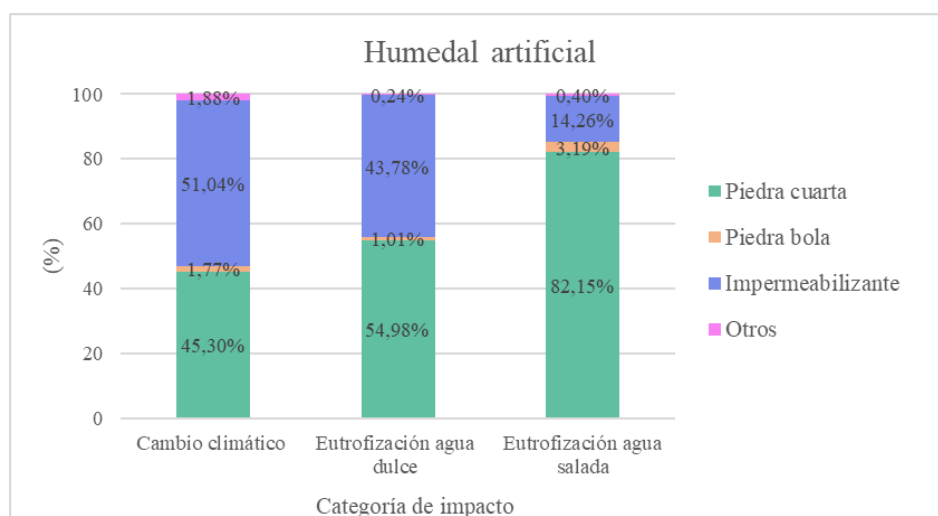
De acuerdo con la Tabla 19, en la categoría de cambio climático, el impermeabilizante de HDPE genera $7,22\text{E-}03 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$, lo que representa el 51,04 % del impacto total (ver Figura 19). Este impacto se atribuye principalmente a la extracción y procesamiento de materias primas, que suelen ser derivados del petróleo, así como a los procesos industriales de producción química y moldeo del HDPE, que generan emisiones y residuos (PAVCO, 2017)

Por otro lado, según la Tabla 19, la piedra cuarta es el material con mayor impacto ambiental en las categorías de eutrofización de agua dulce y agua salada. En eutrofización de agua dulce, contribuye con $2,44\text{E-}06 \text{ kg P eq/m}^3$ (43,78 %), mientras que en eutrofización de agua salada genera $1,90\text{E-}07 \text{ kg N eq/m}^3$, equivalente al 82,15 % del impacto total (ver Figura 19). En este caso, la piedra cuarta genera un mayor impacto debido a que su masa es aproximadamente un 68,05% mayor a la de los otros materiales.

Al sumar todos materiales de cada uno de los impactos evaluados se obtiene un total de $1,41\text{E-}02 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$ para el cambio climático, $4,44\text{E-}05 \text{ kg P eq/m}^3$ para la eutrofización en agua dulce y $2,32\text{E-}07 \text{ kg N eq/m}^3$ para la eutrofización en agua salada.

Figura 19.

Resultados del humedal artificial del Hotel Los Pinos según las categorías de impacto. El eje “y” corresponde al porcentaje de contribución.



A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el tanque recolector del Hotel Los Pinos.

Unidad 3: Tanque recolector

Tabla 20.

Resultados expresados en la masa total del análisis del tanque recolector del Hotel Los Pinos, según cada categoría de impacto.

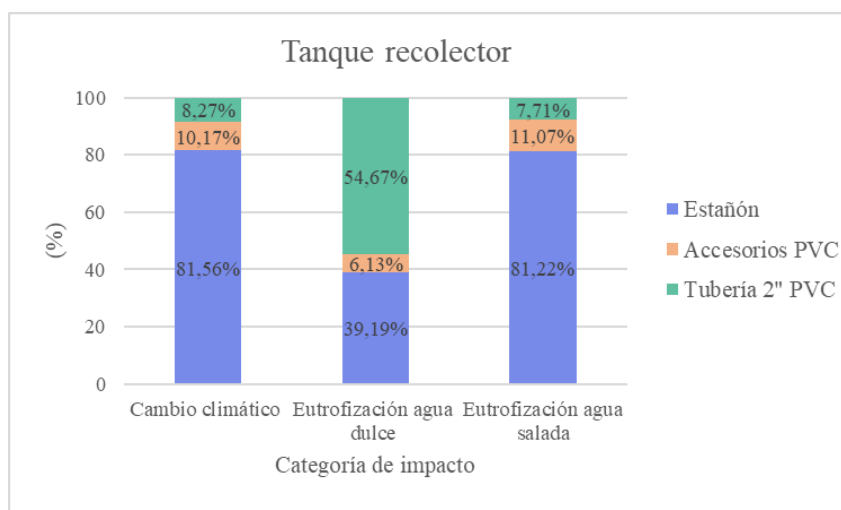
Material	Categoría de impacto		
	Cambio climático ($kg\ CO_2\ eq/m^3$)	Eutrofización agua dulce ($kg\ P\ eq/m^3$)	Eutrofización agua salada ($kg\ N\ eq/m^3$)
Estañon	4,25E-04	1,51E-09	1,53E-09
Tee 2" PVC	5,30E-05	2,37E-10	2,09E-10
Tubería 2 " PVC	4,31E-05	2,11E-09	1,45E-10
Total	5,21E0-4	3,86E-09	1,89E-09

Según la Tabla 20, los materiales que generaron el mayor impacto ambiental en las categorías de cambio climático y eutrofización en agua salada fue el estañon de HDPE. Este material contribuyó con aproximadamente 4,25E-04 $kg\ CO_2\ eq/m^3$, lo que representa el 81,56% del impacto total en la categoría de cambio climático (ver Figura 20), y 1,53E-09 $kg\ N\ eq/m^3$, con un 81,22% (ver Figura 20) de contribución en la categoría de eutrofización en agua salada (ver Figura 20). Por otro lado, en la categoría de eutrofización en agua dulce, la tubería de PVC generó un impacto de 2,11E-09 $kg\ P\ eq/m^3$, representando el 54,67% (ver Figura 20).

Al observar la Figura 20, se destaca que, en la categoría de eutrofización en agua dulce, la tubería de PVC es la que genera el mayor impacto, con 2,11E-09 $kg\ P\ eq/m^3$ (54,64%). Según PAVCO (2017), este impacto se debe principalmente a la producción de la resina, la materia prima del PVC.

Figura 20.

Resultados del tanque recolector del Hotel Los Pinos según las categorías de impacto. El eje “y” corresponde al porcentaje de contribución.



Al analizar las tres unidades de tratamiento del Hotel Los Pinos, se identifica al interceptor de sólidos como la unidad con mayor impacto ambiental en las tres categorías evaluadas, debido a la piedra cuartilla. En cambio climático, concentra aproximadamente el 83,59% del impacto total ($7,48\text{E-}02 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$). En cuanto a la eutrofización en agua dulce, su contribución alcanza el 74,16% ($1,28\text{E-}05 \text{ kg P eq/m}^3$), mientras que en la eutrofización en agua salada, representa el 81,01% del total ($9,97\text{E-}07 \text{ kg N eq/m}^3$).

Además, al identificar los impactos asociados a los materiales de construcción, se evaluaron los parámetros de calidad del agua antes y después del tratamiento, como método para analizar el impacto ambiental en las categorías de cambio climático, eutrofización en agua dulce y eutrofización marina. A continuación, se muestran los resultados.

Comparación entre línea base y sistema de tratamiento

Para caracterizar el agua residual, se utilizaron los parámetros de la Tabla 12 y se creó dos escenarios en SimaPro. El escenario 1 refleja la calidad del agua antes de ingresar al humedal artificial es decir, simula la descarga directa del agua sin tratar al ambiente. Para simular esta descarga directa, se consideró un metro lineal de tubería de PVC. Dado que esta descarga puede dirigirse a un cuerpo de agua o a un sistema de drenaje por escorrentía, es poco probable que se generen condiciones anaeróbicas. Por lo tanto, no se consideró la generación de metano en este escenario. El escenario 1 se comparó con el escenario 2, en el cual se refiere a el agua residual que sí recibe tratamiento mediante el uso del humedal artificial. El escenario 2, sí se consideró una generación de metano debido a que al ser de flujo subsuperficial horizontal el agua residual fluye de forma horizontal a través del sustrato, justo por debajo de la superficie, lo que provoca condiciones mayormente anaeróbicas.

Las concentraciones de los parámetros de calidad del agua, expresadas en miligramos por litro, se ajustaron a la unidad funcional de metro cúbico aflorado del afluente. Para ello, se convirtieron a kilogramos por metro cúbico y se multiplicaron por el factor de emisión de SimaPro, obteniendo los resultados expresados en kilogramos por metro cúbico de agua tratada, como se detalla en los datos de entrada del Apéndice 6.

Para cada parámetro de calidad del agua, se consideraron dos posibles lugares de descarga del agua residual: ríos y aguas subterráneas, con el fin de reflejar de manera más precisa los posibles impactos.

A continuación, se presentan los resultados de la simulación para el escenario 1, donde el agua residual se descarga directamente al ambiente o al suelo, para luego compararlo con el escenario 2, que corresponde al tratamiento de agua mediante el humedal artificial.

Tabla 21.

Resultados de la evaluación del análisis de ciclo de vida para los parámetros de calidad del agua en el Hotel Los Pinos, según cada categoría de impacto para el escenario 1.

Parámetro	Clasificación	Cambio climático ($kg\ CO_2\ eq/m^3$)	Eutrofización agua dulce ($kg\ P\ eq/m^3$)	Eutrofización agua salada ($kg\ N\ eq/m^3$)
DQO	Río	-	-	-
	Aguas subterráneas	-	3,27E-04	-
Fosfato PO_4^{3-}	Río	-	4,49E-03	-
	Aguas subterráneas	-	4,49E-03	-
Nitrógeno amoniacal (NH_3)	Río	-	-	-
	Aguas subterráneas	-	-	4,45E-04
Nitrato (NO_3^-)	Río	-	-	-
	Aguas subterráneas	-	-	6,70E-05
Metano (CH_4)	Aire	-	-	-
Tubería PVC		5,58E-05	1,27E-02	1,89E-10

Total	5,58E-05	2,20E-02	5,12E-04
--------------	-----------------	-----------------	-----------------

Nota: Las casillas que tienen “-” corresponde a que no generan ningún impacto ambiental en dicha categoría. Escenario 1 corresponde a línea base, agua cruda sin tratar.

Tabla 22.

Resultados de la evaluación del análisis de ciclo de vida para los parámetros de calidad del agua en el Hotel Los Pinos, según cada categoría de impacto para el escenario 2.

Parámetro	Clasificación	Cambio climático ($kg\ CO_2\ eq/m^3$)	Eutrofización agua dulce ($kg\ P\ eq/m^3$)	Eutrofización agua salada ($kg\ N\ eq/m^3$)
DQO	Río	-	-	-
	Aguas subterráneas	-	2,84E-03	-
Fosfato PO_4^{3-}	Río	-	9,24E-03	-
	Aguas subterráneas	-	9,24E-03	-
Nitrógeno amoniacal (NH_3)	Río	-	-	-
	Aguas subterráneas	-	-	2,97E-04
Nitrato (NO_3^-)	Río	-	-	-
	Aguas subterráneas	-	-	1,81E-04
Metano (CH_4)	Aire	4,24E-04	-	-
Total		4,24E-04	2,13E-02	4,78E-04

Nota: Las casillas que tienen “-” corresponde a que no generan ningún impacto ambiental en dicha categoría. Escenario 2 corresponde al agua tratada por el humedal.

Al comparar los resultados de la Tabla 21 y la Tabla 22, se observa una disminución considerable en los impactos ambientales entre el escenario 1 y el escenario 2 para las categorías de eutrofización en agua dulce y agua salada.

En el escenario 1, la eutrofización en agua dulce alcanzó un total de $2,20\text{E-}02 \text{ kg P eq/m}^3$, valor superior al registrado en el escenario 2 ($2,13\text{E-}02 \text{ kg P eq/m}^3$), lo cual equivale a una disminución de 3,18%. De manera similar, en el caso de la eutrofización en agua salada, el escenario 1 presentó un mayor impacto ambiental, con $1,25\text{E-}03 \text{ kg N eq/m}^3$, frente a los $5,09\text{E-}04 \text{ kg N eq/m}^3$ observados en el escenario 2, representando una disminución del 59,28%.

Al comparar los escenarios en la categoría de cambio climático, se observa que el escenario 2 presenta un mayor impacto ambiental, principalmente debido a las emisiones de metano del escenario 2 que alcanzan un valor de $4,24\text{E-}02 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$, comparado al escenario 1 con $5,58\text{E-}05 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$. Como se comentó anteriormente, los humedales superficiales almacenan carbono porque sus plantas absorben CO_2 y, al descomponerse lentamente en suelos saturados de agua con poco oxígeno, la materia orgánica se acumula. Esto permite retener carbono por largos períodos y contribuye a disminuir los gases de efecto invernadero por lo que, la emisión de metano generada se podría despreciar.

La construcción de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales conlleva ciertos impactos ambientales, como las emisiones asociadas a la producción de materiales y la alteración temporal del terreno. Sin embargo, estos efectos son menores y son ampliamente compensados por los beneficios que ofrecen, reproducen procesos naturales, tienen bajo coste operativo y se adaptan fácilmente tanto a entornos rurales como urbanos.

La aplicación del ACV permite evaluar su sostenibilidad de forma integral, analizando impactos en todas las etapas del sistema y facilitando la identificación de oportunidades de mejora. En este contexto, los humedales artificiales se consolidan como una solución eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales.

Los resultados obtenidos evidencian que el uso de humedales artificiales permite un tratamiento efectivo del agua residual, reduciendo significativamente los impactos en categorías como la eutrofización de agua dulce y salada. Estos sistemas actúan como mecanismos naturales de purificación, favoreciendo la eliminación de nutrientes y contaminantes antes de la liberación del agua al medio ambiente. Así, contribuyen a minimizar los efectos negativos sobre los ecosistemas acuáticos y a mejorar la calidad del agua.

Análisis de sensibilidad e incertidumbre

Se aplicó un análisis de sensibilidad local mediante variaciones de $\pm 10\%$ en un parámetro a la vez. Este enfoque permite evaluar cómo pequeños cambios en los datos de entrada afectan los resultados, sin alterar la linealidad del modelo. El $\pm 10\%$ se considera un valor estándar, suficientemente representativo para detectar sensibilidad y facilitar comparaciones entre insumos y estudios (Canada Mortgage and Housing Corporation, 2004). En este

estudio, el $\pm 10\%$ se aplicó a la masa de cada material de construcción y a los parámetros de calidad de agua en ambos escenarios.

El análisis de sensibilidad presentado en los apéndices del 12 al 16 muestra que ni los materiales ni los parámetros de calidad de agua evaluados superan variaciones del $\pm 10\%$. No se realizó el análisis de sensibilidad para la categoría de cambio climático en el escenario 1, ya que no se registraron impactos asociados. En el caso del escenario 2, el metano fue el único parámetro que generó un impacto ambiental en esta categoría, con valores de sensibilidad de $-3,74\%$ y $4,31\%$ al aplicar variaciones del -10% y $+10\%$, respectivamente. No se incluyó la arena de la mezcla dentro del análisis de eutrofización en agua dulce y agua salada debido a que no genera ningún impacto. Al aplicar el análisis de incertidumbre se obtuvo $12,50\%$, indica que el modelo es robusto frente a pequeñas incertidumbres en los datos de entrada y que el escenario base representa adecuadamente el comportamiento general del sistema.

4.3 Estrategias de mitigación

Con el fin de proponer mejoras en el funcionamiento del sistema, a continuación, se presentan las estrategias de mitigación para el sistema de tratamiento de aguas residuales instalado en la Escuela Creativa y en el Hotel Los Pinos. Estas estrategias fueron desarrolladas considerando las tres unidades principales del sistema de tratamiento. En cada caso, se enfocaron en el material de construcción que genera el mayor impacto dentro de cada categoría de impacto ambiental.

4.3.1 Escuela Creativa

A continuación, en la Tabla 23 se muestran las estrategias de mitigación por cada unidad de tratamiento ubicada en la Escuela Creativa. Posteriormente, en la Tabla 24, se presentan las estrategias de mitigación para el Hotel Los Pinos.

Tabla 23.

Estrategias de mitigación para los materiales constructivos de mayor impacto, según categoría de impacto y unidad de tratamiento en la Escuela Creativa.

Unidad tratamiento	Categoría de impacto	Estrategia de mitigación
Interceptor de sólidos	Cambio climático	El estañón de HDPE fue el componente que generó mayores emisiones en las tres categorías evaluadas. Para reducir su impacto ambiental, se recomienda utilizar una mezcla de HDPE reciclado con resina virgen. Según Nguyen et al. (2020), esta combinación puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un promedio del 50% ($1,25E-02 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$) en comparación con el uso exclusivo de resina virgen .
	Eutrofización agua dulce	
	Eutrofización agua salada	
Humedal Artificial	Cambio climático	La piedra cuarta fue el material con mayor impacto en las tres categorías evaluadas. Chen et al. (2020) demostraron la viabilidad de utilizar residuos plásticos, como tapas plásticas, como alternativa de sustrato en humedales construidos, evidenciando que estos materiales pueden ser efectivos en la remoción de contaminantes.
	Eutrofización agua dulce	
	Eutrofización agua salada	
Tanque recolector	Cambio climático	El estañón de HDPE fue el material que generó mayor impacto en estas dos categorías; como se mencionó anteriormente, se puede considerar el uso de una mezcla entre resinas recicladas y vírgenes.
	Eutrofización agua salada	
	Eutrofización agua dulce	La tubería de PVC fue el material que generó mayor impacto en esta categoría; se podría evaluar el uso de tuberías de HDPE, ya que presentan un menor impacto ambiental en comparación con el PVC. Otra alternativa es el

Unidad tratamiento	Categoría de impacto	Estrategia de mitigación
Interceptor de sólidos	Cambio climático	El estañón de HDPE fue el componente que generó mayores emisiones en las tres categorías evaluadas. Para reducir su impacto ambiental, se recomienda utilizar una mezcla de HDPE reciclado con resina virgen. Según Nguyen et al. (2020), esta combinación puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un promedio del 50% ($1,25E-02 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$) en comparación con el uso exclusivo de resina virgen .
	Eutrofización agua dulce	
	Eutrofización agua salada	
Humedal Artificial	Cambio climático	La piedra cuarta fue el material con mayor impacto en las tres categorías evaluadas. Chen et al. (2020) demostraron la viabilidad de utilizar residuos plásticos, como tapas plásticas, como alternativa de sustrato en humedales construidos, evidenciando que estos materiales pueden ser efectivos en la remoción de contaminantes.
	Eutrofización agua dulce	
	Eutrofización agua salada	
		uso de tubería de PVC reciclada, aunque no es ideal para sistemas de conducción (Plastics Pipe Institute, 2021).

4.3.2 Hotel Los Pinos

Tabla 24.

Estrategias de mitigación para los materiales constructivos de mayor impacto, según categoría de impacto y unidad de tratamiento en el Hotel Los Pinos.

Unidad tratamiento	Categoría de impacto	Estrategia de mitigación
Interceptor de sólidos	Cambio climático	La piedra cuartilla (piedra mezcla) fue el material con mayor impacto para las 3 categorías, si bien este material no se puede sustituir dentro de la mezcla para hacer concreto, se puede implementar el uso de un interceptor de sólidos plástico.
	Eutrofización agua dulce	
	Eutrofización agua salada	

Humedal Artificial	Cambio climático	El impermeabilizante fue el material con mayor impacto. Aunque la geomembrana utilizada es de HDPE, se podría considerar el uso de geosintéticos con contenido reciclado o membranas sintéticas de caucho, que pueden incorporar entre un 10 % y 30 % de material reciclado, lo que reduce su impacto ambiental (EPA, 2000).
	Eutrofización agua dulce Eutrofización agua salada	La piedra cuarta utilizada como sustrato generó el mayor impacto en estas categorías; como se mencionó anteriormente, se puede considerar el uso de tapas plásticas tipo PET como medio filtrante (Chen et al., 2020).
Tanque recolector	Cambio climático Eutrofización agua salada	El estañón de HDPE presentó el mayor impacto en ambas categorías; se recomienda evaluar el uso de una mezcla de resinas recicladas y vírgenes como alternativa para reducir dicho impacto.
	Eutrofización agua dulce	La tubería de PVC fue el material con mayor impacto; como alternativa, se puede considerar el uso de tuberías de HDPE por su menor impacto ambiental, o tuberías de PVC reciclado, aunque estas no son las más adecuadas para sistemas de conducción (Polypipe Plastics, 2021).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se evidenció que los materiales utilizados en el proceso constructivo tienen una influencia significativa en los impactos ambientales del sistema. Por ello, su inclusión en el análisis permite identificar con mayor precisión los componentes con mayor carga ambiental, facilitando así la priorización de estrategias de mitigación y mejora.
- La aplicación del ACV permitió identificar oportunidades de mejora en la construcción y operación de humedales artificiales, revelando que esta tecnología no solo es eficaz en el tratamiento de aguas residuales, sino que también reduce significativamente los impactos ambientales gracias a menores factores de emisión asociados a la eutrofización en aguas dulces y saladas, especialmente en comparación con el vertido directo de aguas residuales sin tratamiento.
- Según el ACV, la mayor parte de los impactos ambientales se originan debido a la producción de las materias primas (extracción y mecanización). Por ello, se identificó como una alternativa viable el uso de resinas recicladas en la fabricación de tuberías de PVC y HDPE, lo cual podría reducir considerablemente el impacto asociado a la producción de materiales vírgenes. Además de la implementación de otro tipo de sustratos como el uso de las tapas plásticas fomenta a la disminución del impacto ambiental asociado.
- Materiales como las tuberías de PVC, piedra cuarta, piedra cuartilla y componentes plásticos elaborados con HDPE demostraron tener una contribución significativa en diversas categorías de impacto. Por lo tanto, su reemplazo o sustitución por materiales de menor carga ambiental podría representar una estrategia efectiva para mejorar el desempeño ambiental de estos sistemas.
- En la Escuela Creativa, el humedal artificial obtuvo el mayor impacto en las categorías de cambio climático y eutrofización en agua dulce, mientras que el interceptor de sólidos destacó por su mayor impacto en la categoría de eutrofización en agua salada.
- En el Hotel Los Pinos, el interceptor de sólidos resultó con mayor impacto en las tres categorías evaluadas.
- El análisis de sensibilidad demostró que ninguna de las variables evaluadas presentó una variación superior al $\pm 10\%$ en los resultados de impacto ambiental, lo cual indica que las fluctuaciones en los parámetros clave no alteran significativamente los resultados del estudio.

- El análisis de incertidumbre, con un nivel de dispersión del 12,5 % donde de acuerdo a la bibliografía se considera un bajo nivel de incertidumbre para este tipo de evaluaciones ambientales. Estos hallazgos en conjunto confirman la robustez y consistencia del ACV realizado.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda que futuros estudios se enfoquen en el desarrollo de modelos específicos adaptados al contexto de Costa Rica, con el objetivo de reducir los niveles de incertidumbre y generar evaluaciones más precisas y representativas de las condiciones locales. Esto permitiría una mejor toma de decisiones en torno a la implementación de humedales artificiales como alternativa de tratamiento de aguas residuales.
- Asimismo, se sugiere realizar un ACV comparativo entre distintos tipos de sustratos potenciales para la construcción de humedales artificiales. Esta comparación permitiría identificar opciones con menor impacto ambiental, contribuyendo a la optimización del diseño desde su fase constructiva.
- Implementar guías técnicas estandarizadas para el diseño de humedales artificiales en zonas rurales, que contemplen criterios técnicos y ambientales implementando el uso de materiales alternativos.
- En síntesis, la literatura sugiere que la incorporación de HDPE y PVC reciclado en la fabricación de tuberías puede ofrecer beneficios ambientales significativos. No obstante, aún se requieren estudios exhaustivos de ACV que evalúen de manera integral el desempeño ambiental de estos materiales en su forma reciclada, con el fin de respaldar su uso generalizado en sistemas de tratamiento de aguas residuales.
- Fomentar la implementación de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales como los humedales artificiales, especialmente en regiones con alta carga turística y limitada infraestructura sanitaria esto a ser una tecnología viable y sostenible.
- Se recomienda gestionar adecuadamente los residuos y aplicar programas de reciclaje para disminuir el impacto ambiental de los materiales en cada unidad de tratamiento. Estas medidas mejorarían la sostenibilidad del proyecto, pero su efectividad debe confirmarse mediante un ACV.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alsabri, A., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: Perspective on environmental performance. *Energy Reports*, 6, 364–370. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.173>
- ArcelorMittal. (2017). Ficha técnica: Varilla grafilada (E.L) 5.25mmx6m PTN. ArcelorMittal Costa Rica. <https://www.construplaza.com/Materiales/Aceros/Varillas/Varilla-deformada-grado-40-S-3-38-x-6-metros>
- ASTM A-615. (s.f.). Ficha técnica: Varilla grafilada #2. ASTM. Recuperado el 20 de febrero de 2025, <https://www.construplaza.com/Materiales/Aceros/Varillas/Varilla-deformada-grado-40-S-3-38-x-6-metros>
- Belmonte, C. (2018). Análisis del ciclo de vida de un humedal construido para el tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas en la zona rural de Jaén, Perú [Tesis de grado, Universidad Politécnica de Cataluña]. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/122464/memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Canada Mortgage and Housing Corporation. (2004). Sensitivity and uncertainty analysis. International Energy Agency – Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, Annex 31. https://www.iisbe.org/annex31/pdf/K_sensitivity.pdf
- Carvajal, A., Zapattini, C., & Quintero, C. (2018). Humedales artificiales, una alternativa para la depuración de aguas residuales en el municipio de Mizque, Bolivia. *DisTecD. Diseño y Tecnología para el Desarrollo*, 5, 88–108.
- CFIA. (2010). Código sísmico de Costa Rica. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica.
- Chen, X., Huang, X., Zhang, K., & Wu, C. (2020). Feasibility of using plastic wastes as constructed wetland substrates and potential for pharmaceuticals and personal care products removal. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 55(10), 1241–1246. <https://doi.org/10.1080/10934529.2020.1784657>

- Chulluncuy, N. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, 29, 153–170. Recuperado de https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/download/.../208
- Chunzhi, Z., Mengchi, H., Yi, L., & Liping, M. (2016). Research on life cycle assessment of plastic pipeline system. *Materials Science Forum*, 847, 366–373. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.847.366>
- Corbella, C., Puigagut, J., & Garfi, M. (2017). Life cycle assessment of constructed wetland systems for wastewater treatment coupled with microbial fuel cells. *Science of the Total Environment*, 584–585, 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.186>
- Coverttech. (s.f.). Plástico p. invernadero 175Mic (7 milésimas) 5.20x70m transparente C643. <https://coverttech.odoo.com/shop/10643175-5-2gr70-plastico-p-invernadero-175mic-7milesimas-5-20x70m-transparente-c643-6607?page=2&category=356#attr=>
- Curran, M. A., DeRosa, C., & Zimmerman, J. B. (2021). Life cycle assessment: Principles, methods, and challenges. *Environmental Science & Technology*, 55(6), 3459–3466. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00013>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
- EcuRed. (s.f.). Centro de Educación Creativa. EcuRed. Recuperado de https://www.ecured.cu/Centro_de_Educaci%C3%B3n_Creativa
- Environmental Protection Agency. (2012). Guía del ciudadano sobre el recubrimiento. EPA 542-F-12-004s. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs_00_023.pdf
- Estopá Consuegra, S. (2018). Estudio comparativo y dimensionamiento básico de diversas tipologías de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales provenientes del polígono industrial Moncada III (Moncada, Valencia) [Tesis de grado, Universidad Politécnica de Valencia].
- Galbán, L. (2009). El tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas como alternativa sostenible para el saneamiento periurbano en Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*.
- Garcia, V. (2018). 70 % del agua residual generada por costarricenses carece de tratamiento. Web UCR.

<https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/03/26/70-del-agua-residual-generada-por-costarricenses-carece-de-tratamiento.html>

Herrera, J. E. (2021). Desempeño ambiental de tubería de PVC corrugada de doble pared y tubería de PVC de perfil cerrado con sello elastomérico en el Ecuador [Tesis de maestría, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. DSpace en ESPOL. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/52703/1/T-111104%20%20SALGA%20DO%20HERRERA%2C%20JOEL.pdf>

Hernández, M. E. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana*, 28(2), 139–147. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000200005&lng=es&tlng=es

Hube, S., Zaqout, T., Ögmundarson, Ó., Andradóttir, H. Ó., & Wu, B. (2023). Constructed wetlands with recycled concrete for wastewater treatment in cold climate: Performance and life cycle assessment. *Science of The Total Environment*, 901, 165964. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165964>

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). (2017). Política nacional de saneamiento en aguas residuales. <https://www.aya.go.cr/noticias/documents/politica%20nacional%20de%20saneamiento%20en%20aguas%20residuales%20marzo%202017.pdf>

ISO. (2004). ISO 14001:2004, Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso.

ISO. (2006). Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework.

Lara, J. (1999). Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales [Tesis de grado, Universidad Politécnica de Cataluña].

López, P. (2018). Diseño y construcción de un prototipo de humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María].

Magwaza, S. T., Magwaza, L. S., Odindo, A. O., & Mditshwa, A. (2020). Hydroponic technology as a decentralized system for domestic wastewater treatment and vegetable production in urban agriculture: A review. *Science of the Total Environment*, 698, 134154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134154>

- Medrano, W. (2001). Evaluación de la calidad de aguas residuales de la planta de tratamiento de Alba Rancho (Semapa) con fines de riego. Recuperado el 24 de septiembre de 2013, de <http://www.umss.edu.bo/epubs/earts/downloads/71>
- Ministerio del Ambiente. (2010). Plan de la calidad ambiental Perú-Ecuador. Catamayo-Chira y Puyango-Tumbes. Consorcio E8H. <http://www.consultorias.minam.gob.pe:8080/bitstream/12>
- Muñoz, K., & Vásquez, M. (2020). Estudio de la eficiencia del tratamiento de aguas residuales domésticas con humedales artificiales de cinco especies de macrófitas [Tesis de grado, Universidad Privada del Norte].
- Nguyen, M. T., & Haider, M. (2020). Uncertainty in the life cycle greenhouse gas emissions and costs of HDPE pipe systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104959. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104959>
- Oakley, S., & Salguero, L. (Eds.). (2011). Tratamiento de aguas residuales domésticas en humedales artificiales. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Quesada, J. (2016). Diseño, construcción y evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales con humedal artificial subsuperficial en el Valle Central [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Ramírez, C. (2021). Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales contruidos en la comunidad de San Juan, Perú [Tesis de grado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].
- Sierra, C. (2014). Evaluación de la eficiencia del tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Trenado, R., Sánchez, M., & Sánchez, E. (2020). Estudio de la huella de carbono y la energía incorporada de tuberías plásticas: una perspectiva sobre su desempeño ambiental. *Revista de Ingeniería*, 9(2), 112–118.
- UNEP. (2021). Global chemicals outlook II: From legacies to innovative solutions. <https://www.unep.org/resources/global-chemicals-outlook-ii-legacies-innovative-solutions>

7. APÉNDICE

Apéndice 1.

Caudal Escuela Creativa.

Cantidad	Fecha	Caudal (m3/día)	Diferencia
1	13/11/2024	2308,60	0,00
2	14/11/2024	2308,70	0,10
3	18/11/2024	2308,70	0,00
4	19/11/2024	2308,80	0,10
5	20/11/2024	2308,90	0,10
6	22/11/2024	2309,20	0,30
7	25/11/2024	2309,30	0,10
8	26/11/2024	2309,40	0,10
9	27/11/2024	2309,70	0,30
10	2/12/2024	2310,40	0,70
11	3/12/2024	2310,50	0,10
12	4/12/2024	2310,60	0,10
13	5/12/2024	2310,70	0,10
14	6/12/2024	2310,70	0,00
15	9/12/2024	2310,80	0,10
16	10/12/2024	2310,90	0,10
17	11/12/2024	2311,00	0,10
18	12/12/2024	2311,00	0,00
19	13/12/2024	2311,10	0,10
20	14/12/2024	2311,20	0,10
21	16/12/2024	2311,30	0,10
22	17/12/2024	2311,80	0,50
23	18/12/2024	2312,00	0,20

24	7/1/2025	2312,30	0,30
25	8/1/2025	2312,80	0,50
26	9/1/2025	2313,00	0,20
27	13/1/2025	2313,10	0,10
28	14/1/2025	2313,20	0,10
Promedio			0,17
Mediana			0,10
Desviación estándar			0,16

Apéndice 2.*Caudal Hotel Los Pinos.*

Muestreo	Fecha	Caudal (m3/día)
1	5/13/24	3,00
2	5/16/24	3,00
3	5/17/24	2,00
4	5/18/24	3,00
5	5/22/24	2,00
6	5/25/24	5,00
7	5/26/24	3,00
8	5/27/24	3,00
9	6/4/2024	3,00
10	6/12/2024	3,00
11	06/13/24	3,00
12	06/14/24	3,00
13	06/15/24	2,00
14	06/18/24	3,00
15	05/19/24	3,00
16	05/20/24	3,00
17	06/26/24	2,00
18	06/27/24	2,00
19	06/28/24	3,00
20	06/29/24	4,00
21	7/2/2024	2,00
22	7/3/2024	2,00
Promedio		2,81
Mediana		3,00
Desviación estándar		0,73

Apéndice 3.

Conversión de masa expresada en kilogramos por metro cúbico tratado, para las unidades de funcionamiento de la Escuela Creativa.

Material	Cantidad	Unidad	Masa unitaria (kg)	Masa total (kg)	Masa total (kg/m³)
Interceptor de sólidos					
Estañones (208 litros)	2,00	unidad	6,00	12,00	1,64E-02
Tee 2" PVC	2,00	unidad	0,25	0,50	6,85E-04
Tubería 2 " PVC	0,35	m	2,49	0,14	1,92E-04
Humedal artificial					
Impermeabilizante	23,80	m ²	0,014	3,91	5,36E-03
Piedra bola	1793,94	kg	-	1793,94	2,46E+00
Piedra cuarta	4106,10	kg	-	4106,10	5,62E+00
Tubería 2" PVC	3,63	m ²	2,49	1,49	2,04E-03
Tapa 2" PVC	2,00	unidad	0,02	0,04	5,48E-05
Tee 2" PVC	3,00	unidad	0,25	0,75	1,03E-03
Adaptador macho 2"PVC	2	unidad	0,10	0,20	2,74E-04
Tanque recolector					
Estañon	1,00	unidad	6,00	6,00	3,04E-04
Codos 45° 2"PVC	3,00	unidad	0,07	0,21	1,07E-05
Tee 2" PVC	1,00	unidad	0,25	0,25	1,27E-05
Unión 2"	1,00	unidad	0,10	0,10	5,07E-06
Tubería 2" PVC	0,80	m	2,49	0,32	1,62E-05

Apéndice 4.

Conversión de masa expresada en kilogramos por metro cúbico tratado, para las unidades de funcionamiento del Hotel Los Pinos.

Material	Cantidad	Unidad	Masa unitaria (kg)	Masa total (kg)	Masa total (kg/m³)
Interceptor de sólidos					
Block concreto (12x20x40 cm)	176,59	unidad	10,70	1889,53	9,59E-02
Varilla grafilada #2	20,00	unidad	1,49	29,80	1,51E-03
Varilla deformada #3	44,00	unidad	3,36	147,84	7,50E-03
Cemento	11,55	sacos	50,00	577,50	2,93E-02
Agua	308,00	l	-	308,00	1,56E-02
Piedra	1,02	m ³	-	1524,60	7,74E-02
Arena	0,68	m ³	-	1084,16	5,50E-02
Codos 90 2"	4,00	unidad	0,16	0,64	3,25E-05
Tubería 2" PVC	1,30	m	2,49	0,53	2,69E-05
Humedal artificial					
Piedra cuarta	13640,29	kg	-	13640,29	6,92E-01
Piedra bola	2414,92	kg	-	2414,92	1,23E-01
Impermeabilizante	36,87	m ²	0,09	82,96	4,21E-03
Codo 45° 2" PVC	2,00	unidad	0,07	0,14	7,10E-06
Tee 2" PVC	2,00	unidad	0,25	0,50	2,54E-05
Tapa 2" PVC	2,00	unidad	0,02	0,04	2,03E-06

Tubería 2" PVC	3,80	m	2,49	1,56	7,91E-05
Tanque recolector					
Estañon (208 l)	1,00	unidad	6,00	6,00	3,04E-04
Codos 45° 2"PVC	3,00	unidad	0,07	0,21	1,07E-05
Tee 2" PVC	1,00	unidad	0,25	0,25	1,27E-05
Unión 2"	1,00	unidad	0,10	0,10	5,07E-06
Tubería 2" PVC	0,80	m	2,49	0,33	1,62E-05

Apéndice 5.

Conversión de concentraciones a kilogramos por metro cúbico tratado para ambos escenarios evaluados en la Escuela Creativa.

Observación	Parámetro				
	DQO (kg/m ³)	PO ₄ ³⁻ (kg/m ³)	NH ₃ (kg/m ³)	NO ₃ ⁻ (kg/m ³)	CH ₄ (kg/m ³)
<i>Escenario 1</i>	3,13E-01	2,35E-02	3,20E-03	4,50E-03	0,00E+00
<i>Escenario 2</i>	4,50E-02	1,36E-02	1,50E-03	9,50E-04	4,19E-04

Nota: Escenario 1 corresponde a la línea base, agua cruda sin tratamiento. Escenario 2 corresponde al agua tratada por el humedal artificial.

Apéndice 6.

Conversión de concentraciones a kilogramos por metro cúbico tratado para ambos escenarios evaluados en el Hotel Los Pinos.

Observación	Parámetro				
	DQO (kg/m ³)	PO_4^{3-} (kg/m ³)	NH_3 (kg/m ³)	NO_3^- (kg/ m ³)	CH_4 (kg/m ³)
<i>Escenario 1</i>	8,25E-01	2,05E-02	2,00E-03	6,00E-03	0,00E+00
<i>Escenario 2</i>	3,91E-01	2,80E-02	1,00E-03	2,70E-03	8,65E-02

Nota: Escenario 1 corresponde a la línea base, agua cruda sin tratamiento. Escenario 2 corresponde al agua tratada por el humedal artificial.

Apéndice 7.

Resultados del análisis de sensibilidad aplicando un $\pm 10\%$, en la categoría de cambio climático ($\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$) para cada unidad de tratamiento de la Escuela Creativa.

Material	Cambio climático (<i>kg CO₂ eq/m³</i>)		Resultado original (<i>kg CO₂ eq/m³</i>)	Resultado obtenido total (<i>kg CO₂ eq/m³</i>)		Porcentaje sensibilidad	
	-10%	+10%		-10%	+10%	-10%	+10%
Interceptor de sólidos							
Estañones	2,10E-02	2,56E-02	2,32E-02	1,12E-01	1,16E+00	-1,94%	0,00%
Tee 2" PVC	1,16E-03	1,42E-03	1,32E-03	1,14E-01	1,13E+00	-0,14%	0,00%
Tubería 2 " PVC	4,59E-04	5,60E-04	5,31E-04	1,14E-01	1,14E-01	-0,06%	0,03%
Humedal artificial							
Impermeabilizante	8,29E-03	1,01E-02	9,21E-03	1,13E-01	1,15E-01	-0,81%	0,77%
Piedra bola	5,52E-03	5,20E-02	5,03E-03	1,15E-01	1,61E-01	0,00%	0,43%
Piedra cuarta	4,69E-02	5,73E-02	5,21E-02	1,09E-01	1,20E-01	-4,53%	4,56%
Tubería 2 " PVC	4,88E-03	5,97E-03	5,41E-03	1,14E-01	1,15E-01	-0,47%	0,49%
Accesorios PVC	2,30E-03	2,81E-03	2,56E-03	1,14E-01	1,15E-01	-0,23%	0,22%
Tanque recolector							
Estañón	1,05E-02	1,28E-02	1,16E-02	1,13E-01	1,16E-01	-0,98%	1,03%
Tee 2" PVC	1,16E-03	1,42E-03	1,28E-03	1,14E-01	1,14E-01	-0,11%	0,12%
Tubería 2" PVC	1,87E-03	2,28E-03	2,07E-03	1,14E-01	1,15E-01	-0,17%	0,18%

Nota: La columna llamada "Resultado original" corresponde a los resultados generados en el capítulo 4.2.

Apéndice 8.

Resultados del análisis de sensibilidad aplicando un $\pm 10\%$, en la categoría de eutrofización agua dulce (kg P eq/m^3) para cada unidad de tratamiento de la Escuela Creativa.

Material	Eutrofización agua dulce (<i>kg P eq/m³</i>)		Resultado original (<i>kg P eq/m³</i>)	Resultado obtenido total (<i>kg P eq/m³</i>)		Porcentaje sensibilidad	
	-10%	10%		-10%	+10%	-10%	10%
Interceptor de sólidos							
Estañones	7,46E-08	9,12E-08	8,37E-08	2,37E-05	2,38E-05	-0,04%	0,03%
Tee 2" PVC	5,18E-09	6,34E-09	5,20E-09	2,37E-05	2,37E-05	0,00%	0,00%
Tubería 2 " PVC	2,25E-08	2,74E-08	1,79E-09	2,38E-05	2,38E-05	0,09%	0,11%
Humedal artificial							
Impermeabilizante	2,23E-06	2,73E-06	2,48E-06	2,35E-05	2,40E-05	-1,06%	1,04%
Piedra bola	8,06E-07	9,85E-07	8,97E-07	2,37E-05	2,38E-05	-0,38%	0,37%
Piedra cuarta	1,79E-05	2,18E-05	1,99E-05	2,18E-05	2,57E-05	-8,23%	8,20%
Tubería 2 " PVC	2,39E-07	2,92E-07	2,65E-07	2,37E-05	2,38E-05	-0,11%	0,11%
Accesorios PVC	1,03E-08	1,25E-08	1,14E-08	2,37E-05	2,37E-05	0,00%	0,00%
Tanque recolector							
Estañón	3,73E-08	4,56E-08	4,14E-08	2,37E-05	2,37E-05	-0,02%	-0,39%
Tee 2" PVC	5,18E-09	6,34E-09	5,72E-09	2,37E-05	2,37E-05	0,00%	0,00%
Tubería 2" PVC	9,14E-08	1,12E-07	1,01E-07	2,37E-05	2,38E-05	-0,04%	0,04%

Nota: La columna llamada “Resultado original” corresponde a los resultados generados en el capítulo 4.2.

Apéndice 9.

Resultados del análisis de sensibilidad aplicando un $\pm 10\%$, en la categoría de eutrofización agua salada (kg N eq/m^3) para cada unidad de tratamiento de la Escuela Creativa.

Material	Eutrofización agua dulce (<i>kg N eq/m³</i>)		Resultado original (<i>kg N eq/m³</i>)	Resultado obtenido total (<i>kg N eq/m³</i>)		Porcentaje sensibilidad	
	-10%	+10%		-10%	+10%	-10%	+10%
Interceptor de sólidos							
Estañones	7,79E-04	9,53E-04	8,66E-04	9,51E-04	1,12E-03	-8,41%	8,35%
Tee 2" PVC	4,58E-09	5,60E-09	5,54E-05	9,83E-04	9,83E-04	-5,34%	-5,34%
Tubería 2 " PVC	2,66E-05	1,89E-04	1,14E-04	9,50E-04	1,11E-03	-8,46%	7,19%
Humedal artificial							
Impermeabilizante	3,79E-08	4,63E-08	4,22E-08	1,04E-03	1,04E-03	0,00%	0,00%
Piedra bola	1,33E-07	1,63E-07	1,48E-07	1,04E-03	1,04E-03	0,00%	0,00%
Piedra cuarta	1,39E-06	1,70E-06	1,55E-06	1,04E-03	1,04E-03	0,02%	0,01%
Tubería 2 " PVC	1,65E-08	2,02E-08	1,83E-08	1,04E-03	1,04E-03	0,00%	0,00%
Accesorios PVC	9,07E-09	1,11E-08	1,01E-08	1,04E-03	1,04E-03	0,00%	0,00%
Tanque recolector							
Estañón	3,78E-08	4,62E-08	4,19E-08	1,04E-03	1,04E-03	0,00%	0,00%
Tee 2" PVC	4,58E-09	5,60E-09	5,05E-09	1,04E-03	1,04E-03	0,00%	0,00%
Tubería 2" PVC	6,30E-09	7,70E-09	6,99E-09	1,04E-03	1,04E-03	0,00%	0,00%

Nota: La columna llamada "Resultado original" corresponde a los resultados generados en el capítulo 4.2.

Apéndice 10.

Resultados del análisis de sensibilidad aplicando una variación del $\pm 10\%$ en la categoría de eutrofización en agua dulce (kg P eq/m³), para cada escenario de la Escuela Creativa, en relación con los parámetros de calidad del agua.

Parámetro	Clasificación	Escenario	Eutrofización agua dulce (kg P eq/m ³)		Resultado original (kg P eq/m ³)	Resultado obtenido total (kg P eq/m ³)		Porcentaje de sensibilidad	
			-10%	+10%		-10%	+10%	-10%	+10%
DQO	Río	Escenario 1	-	-	-	-	-	-	-
	Aguas subterráneas		2,04E-03	2,50E-03	2,27E-03	1,76E-02	1,80E-02	-3,14%	6,11%
PO ₄	Río	Escenario 1	6,93E-03	8,58E-03	7,76E-03	1,70E-02	1,86E-02	-9,28%	1,91%
	Aguas subterráneas		6,93E-03	8,58E-03	7,76E-03	1,70E-02	1,86E-02	-9,28%	1,91%
DQO	Río	Escenario 2	-	-	-	-	-	-	-
	Aguas subterráneas		2,94E-04	3,59E-04	3,27E-04	9,27E-03	9,34E-03	-0,35%	0,34%
PO ₄	Río	Escenario 2	4,03E-03	4,95E-03	4,49E-03	8,85E-03	9,77E-03	-4,94%	4,94%
	Aguas subterráneas		4,03E-03	4,95E-03	4,49E-03	8,85E-03	9,77E-03	-4,94%	4,94%

Nota: La columna llamada “Resultado original” corresponde a los resultados generados en el capítulo 4.2. Escenario 1 corresponde a la línea base, agua cruda sin tratamiento. Escenario 2 corresponde al agua tratada por el humedal artificial.

Apéndice 11.

Resultados del análisis de sensibilidad aplicando una variación del $\pm 10\%$ en la categoría de eutrofización en agua salada (kg N eq/m^3), para cada escenario de la Escuela Creativa, en relación con los parámetros de calidad del agua.

Parámetro	Clasificación	Escenario	Eutrofización agua salada (kg N eq/m^3)		Resultado original (kg N eq/m^3)	Resultado obtenido total (kg N eq/m^3)		Porcentaje de sensibilidad	
			-10%	+10%				-10%	+10%
NH_3	Río	Escenario 1	-	-	-	-	-	-	-
	Aguas subterráneas		8,91E-04	1,07E-03	9,50E-04	1,19E-03	1,37E-03	-4,71%	9,48%
NO_3^-	Río	Escenario 1	-	-	-	-	-	-	-
	Aguas subterráneas		2,68E-04	3,90E-04	3,02E-04	1,22E-03	1,34E-03	-2,72%	7,03%
NH_3	Río	Escenario 2	-	-	-	-	-	-	-
	Aguas subterráneas		4,16E-04	4,90E-04	4,45E-04	4,80E-04	5,54E-04	-5,70%	8,85%
NO_3^-	Río	Escenario 2	-	-	-	-	-	-	-
	Aguas subterráneas		6,04E-05	6,70E-05	6,37E-05	5,05E-04	5,12E-04	-0,65%	0,65%

Nota: La columna llamada “Resultado original” corresponde a los resultados generados en el capítulo 4.2. Escenario 1 corresponde a la línea base, agua cruda sin tratamiento. Escenario 2 corresponde al agua tratada por el humedal artificial.

Apéndice 12.

Resultados del análisis de sensibilidad aplicando un $\pm 10\%$, en la categoría de cambio climático ($\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$) para cada unidad de tratamiento del Hotel Los Pinos.

Material	Eutrofización agua dulce $(kg\ CO_2\ eq/m^3)$		Resultado original $(kg\ CO_2\ eq/m^3)$	Resultado obtenido total $(kg\ CO_2\ eq/m^3)$		Porcentaje sensibilidad	
	-10%	+10%		-10%	+10%	-10%	+10%
Interceptor de sólidos							
Block concreto	1,18E-02	1,43E-02	1,31E-02	8,81E-02	9,06E-02	-1,44%	1,35%
Varillas	3,21E-03	3,92E-03	3,56E-03	8,91E-02	8,98E-02	-0,39%	0,40%
Cemento	6,17E-03	7,53E-03	6,85E-03	8,87E-02	9,01E-02	-0,76%	0,76%
Piedra mezcla	4,41E-02	5,61E-02	5,07E-02	8,28E-02	9,48E-02	-7,41%	6,01%
Agua mezcla	1,11E-05	1,35E-05	1,22E-05	8,94E-02	8,94E-02	0,00%	0,00%
Arena mezcla	3,51E-04	4,29E-04	3,90E-04	8,94E-02	8,95E-02	-0,04%	0,04%
Codos 90 2"	5,50E-05	6,73E-05	6,12E-05	8,94E-02	8,94E-02	-0,01%	0,01%
Tubería 2" PVC	6,42E-05	7,85E-05	7,14E-05	8,94E-02	8,94E-02	-0,01%	0,01%
Humedal artificial							
Piedra cuarta	5,77E-03	7,05E-03	6,41E-03	8,88E-02	9,01E-02	-0,71%	0,72%
Piedra bola	2,25E-04	2,76E-04	2,51E-04	8,94E-02	8,94E-02	-0,03%	0,03%
Impermeabilizante	6,52E-03	7,96E-03	7,22E-03	8,87E-02	9,02E-02	-0,78%	0,83%
Accesorios PVC	5,86E-05	7,16E-05	5,65E-05	8,94E-02	8,94E-02	-0,00%	0,02%
Tubería 2" PVC	1,89E-04	2,13E-04	2,10E-04	8,94E-02	8,94E-02	-0,02%	0,00%
Tanque recolector							
Estañón	3,88E-04	4,74E-04	4,25E-04	8,94E-02	8,95E-02	-0,04%	0,06%
Accesorios PVC	4,82E-05	5,90E-05	5,30E-05	8,94E-02	8,94E-02	-0,01%	0,01%
Tubería 2" PVC	3,87E-05	4,75E-05	4,31E-05	8,94E-02	8,94E-02	-0,00%	0,00%

Nota: La columna llamada “Resultado original” corresponde a los resultados generados en el capítulo 4.2.

Apéndice 13.

Resultados del análisis de sensibilidad aplicando un $\pm 10\%$, en la categoría de eutrofización agua dulce (kg P eq/m^3) para cada unidad de tratamiento del Hotel Los Pinos.

Material	Eutrofización agua dulce (<i>kg P eq/m³</i>)		Resultado original (<i>kg P eq/m³</i>)	Resultado obtenido total (<i>kg P eq/m³</i>)		Porcentaje sensibilidad	
	-10%	+10%		-10%	+10%	-10%	+10%
Interceptor de sólidos							
Block concreto	2,55E-06	3,11E-06	2,84E-06	4,24E-05	4,29E-05	-0,68%	0,64%
Varillas	1,83E-06	2,23E-06	2,03E-06	4,25E-05	4,29E-05	-0,46%	0,47%
Cemento	1,44E-06	1,76E-06	1,60E-06	4,25E-05	4,28E-05	-0,38%	0,37%
Piedra mezcla	<i>5,68E-06</i>	<i>6,95E-06</i>	<i>6,29E-06</i>	<i>4,21E-05</i>	<i>4,33E-05</i>	<i>-1,42%</i>	<i>1,55%</i>
Agua mezcla	6,86E-09	4,32E-08	6,22E-09	4,27E-05	4,27E-05	0,00%	0,09%
Codos 90 2"	2,46E-10	3,00E-10	2,74E-10	4,27E-05	4,27E-05	0,00%	0,00%
Tubería 2" PVC	3,15E-09	3,85E-09	3,50E-09	4,27E-05	4,27E-05	0,00%	0,00%
Humedal artificial							
Piedra cuarta	<i>2,50E-05</i>	<i>2,69E-05</i>	<i>2,79E-05</i>	<i>3,98E-05</i>	<i>4,17E-05</i>	<i>-6,81%</i>	<i>-2,35%</i>
Piedra bola	4,01E-08	4,92E-08	4,47E-08	4,27E-05	4,27E-05	-0,01%	0,01%
Impermeabilizante	1,76E-06	2,14E-06	1,94E-06	4,25E-05	4,29E-05	-0,43%	0,46%
Accesorios PVC	2,62E-10	3,20E-10	2,52E-10	4,27E-05	4,27E-05	0,00%	0,00%
Tubería 2" PVC	9,25E-09	1,13E-08	1,03E-08	4,27E-05	4,27E-05	0,00%	0,00%
Tanque recolector							
Estañón	1,16E-09	1,38E-09	1,51E-09	4,27E-05	4,27E-05	0,00%	0,00%

Accesorios PVC	2,15E-10	2,63E-10	2,37E-10	4,27E-05	4,27E-05	0,00%	0,00%
Tubería 2" PVC	1,90E-09	2,33E-09	2,11E-09	4,27E-05	4,27E-05	0,00%	0,00%

Nota: La columna llamada “Resultado original” corresponde a los resultados generados en el capítulo 4.2.

Apéndice 14.

Resultados del análisis de sensibilidad aplicando un $\pm 10\%$, en la categoría de eutrofización agua salada (kg N eq/m^3) para cada unidad de tratamiento del Hotel Los Pinos.

Material	Eutrofización agua salada (<i>kg N eq/m³</i>)		Resultado original (<i>kg N eq/m³</i>)	Resultado obtenido total (<i>kg N eq/m³</i>)		Porcentaje sensibilidad	
	-10%	+10%		-10%	+10%	-10%	+10%
Interceptor de sólidos							
Block concreto	2,39E-07	2,91E-07	2,66E-07	1,20E-06	1,26E-06	-2,16%	2,06%
Varillas	1,28E-07	1,56E-07	1,42E-07	1,22E-06	1,24E-06	-1,14%	1,14%
Cemento	1,82E-07	2,22E-07	2,02E-07	1,21E-06	1,25E-06	-1,63%	1,62%
Piedra mezcla	4,24E-07	4,68E-07	3,86E-07	1,27E-06	1,31E-06	3,08%	6,65%
Agua mezcla	5,37E-10	6,56E-10	5,95E-10	1,23E-06	1,23E-06	0,00%	0,00%
Codos 90 2"	2,17E-10	2,65E-10	2,41E-10	1,23E-06	1,23E-06	0,00%	0,00%
Tubería 2" PVC	2,17E-10	2,65E-10	2,41E-10	1,23E-06	1,23E-06	0,00%	0,00%
Humedal artificial							
Piedra cuarta	1,71E-07	2,09E-07	1,90E-07	1,21E-06	1,25E-06	-1,57%	1,52%
Piedra bola	6,64E-09	8,15E-09	7,40E-09	1,23E-06	1,23E-06	-0,06%	0,06%
Impermeabilizante	2,98E-08	3,64E-08	3,30E-08	1,23E-06	1,23E-06	-0,26%	0,27%
Accesorios PVC	2,31E-10	2,82E-10	2,23E-10	1,23E-06	1,23E-06	0,00%	0,00%
Tubería 2" PVC	6,38E-10	7,80E-10	7,09E-10	1,23E-06	1,23E-06	-0,01%	0,01%

Tanque recolector							
Estañón	1,40E-09	1,71E-09	1,53E-09	1,23E-06	1,23E-06	-0,01%	0,01%
Accesorios PVC	1,90E-10	2,33E-10	2,09E-10	1,23E-06	1,23E-06	0,00%	0,00%
Tubería 2" PVC	1,31E-10	1,60E-10	1,45E-10	1,23E-06	1,23E-06	0,00%	0,00%

Nota: La columna llamada “Resultado original” corresponde a los resultados generados en el capítulo 4.2.

Apéndice 15.

Resultados del análisis de sensibilidad aplicando una variación del $\pm 10\%$ en la categoría de eutrofización en agua dulce (kg P eq/m^3), para cada escenario del Hotel Los Pinos, en relación con los parámetros de calidad del agua.

Parámetro	Clasificación	Escenario	Eutrofización agua salada (kg P eq/m^3)		Resultado original (kg P eq/m^3)	Resultado obtenido total (kg P eq/m^3)		Porcentaje de sensibilidad	
			-10%	+10%		-10%	+10%	-10%	+10%
DQO	Río	Escenario 1	-	-	-	-	-	-	-
	Aguas subterráneas		2,10E-04	6,29E-04	3,27E-04	9,19E-03	9,61E-03	-1,26%	3,24%
PO_4	Río	Escenario 1	5,00E-03	5,20E-03	4,49E-03	9,82E-03	1,00E-02	5,48%	7,63%
	Aguas subterráneas		5,00E-03	5,20E-03	4,49E-03	9,82E-03	1,00E-02	5,48%	7,63%
DQO	Río	Escenario 2	-	-	-	-	-	-	-
	Aguas subterráneas		2,55E-03	0,00312	2,84E-03	2,10E-02	2,16E-02	-1,36%	1,31%
PO_4	Río	Escenario 2	8,32E-03	0,0102	9,24E-03	2,04E-02	2,23E-02	-4,32%	4,50%
	Aguas subterráneas		8,32E-03	0,0102	9,24E-03	2,04E-02	2,23E-02	-4,32%	4,50%

Nota: La columna llamada “Resultado original” corresponde a los resultados generados en el capítulo 4.2. Escenario 1 corresponde a la línea base, agua cruda sin tratamiento. Escenario 2 corresponde al agua tratada por el humedal artificial.

Apéndice 16.

Resultados del análisis de sensibilidad aplicando una variación del $\pm 10\%$ en la categoría de eutrofización en agua salada (kg N eq/m^3), para cada escenario del Hotel Los Pinos, en relación con los parámetros de calidad del agua.

Parámetro	Clasificación	Escenario	Eutrofización agua salada (kg N eq/m^3)		Resultado original (kg N eq/m^3)	Resultado obtenido total (kg N eq/m^3)		Porcentaje de sensibilidad	
			-10%	+10%		-10%	+10%	-10%	+10%
NH_3	Río	Escenario 1	-	-	-	-	-	-	-
	Aguas subterráneas		4,09E-04	4,93E-04	4,45E-04	4,76E-04	5,60E-04	-7,03%	9,38%
NO_3^-	Río	Escenario 1	-	-	-	-	-	-	-
	Aguas subterráneas		3,62E-05	7,20E-05	6,70E-05	4,81E-04	5,17E-04	-6,02%	0,98%
NH_3	Río	Escenario 2	-	-	-	-	-	-	-
	Aguas subterráneas		2,67E-04	3,27E-04	2,97E-04	4,48E-04	5,08E-04	-6,28%	6,28%
NO_3^-	Río	Escenario 2	-	-	-	-	-	-	-
	Aguas subterráneas		1,63E-04	1,99E-04	1,81E-04	4,60E-04	4,96E-04	-3,77%	3,77%

Nota: La columna llamada “Resultado original” corresponde a los resultados generados en el capítulo 4.2. Escenario 1 corresponde a la línea base, agua cruda sin tratamiento. Escenario 2 corresponde al agua tratada por el humedal artificial.