



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

**MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
SANITARIO Y SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES PARA LA COMUNA MONTAÑITA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN EN MODALIDAD DE
INFORME DE INVESTIGACIÓN**

**Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN GESTIÓN AMBIENTAL**

AUTOR

Edward Robert Lamadrid Lamilla

TUTOR

PhD. Rolando Calero Mendoza

La Libertad, Ecuador

2026



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

**PhD Roxana Álvarez Acosta
COORDINADORA (E) DEL
PROGRAMA**

**PhD. Rolando Calero Mendoza
TUTOR**

**PhD. Ana Grijalva Endara
DOCENTE ESPECIALISTA**

**PhD. Cristian Laverde Albarracín
DOCENTE ESPECIALISTA**

**Ab. María Rivera González, Mgtr.
SECRETARIA GENERAL
UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por Edward Robert Lamadrid Lamilla, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Gestión Ambiental.

TUTOR

PhD. Rolando Calero Mendoza

23 días del mes de marzo del año 2026



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Edward Robert Lamadrid Lamilla

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, **“MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO SANITARIO Y SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LA COMUNA MONTAÑITA”**, previo a la obtención del título en Magíster en Gestión Ambiental, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 23 días del mes de marzo del año 2026

EL AUTOR

Edward Robert Lamadrid Lamilla



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO SANITARIO Y SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LA COMUNA MONTAÑITA presentado por el estudiante, **Edward Robert Lamadrid Lamilla**, fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 7 %, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



Informe de análisis
Compilatio Magister+ | UPSE-ECU

INFORME CIENTIFICO MONTAÑITA - 19 de marzo
ID : 8884df041fb94a4ec4e0db3e46d33fc1481ea0f3



7%

Textos sospechosos

Nombre del fichero : INFORME CIENTIFICO
MONTAÑITA - 19 de marzo.txt
Tamaño del archivo original : 2,42 MB
Número de palabras : 8743
Número de caracteres : 63082

Depositante : ROLANDO RAFAEL CALERO MENDOZA
Fecha de depósito : 20 de marzo de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 20 de marzo de 2026

TUTOR

PhD. Rolando Calero Mendoza



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

AUTORIZACIÓN

Yo, Edward Robert Lamadrid Lamilla

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de informe de investigación con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

La Libertad, a los 23 días del mes de marzo del año 2026

EL AUTOR

Edward Robert Lamadrid Lamilla

AGRADECIMIENTO

A mis madres y a mis hijos, por acompañarme con su
cariño, comprensión y apoyo en cada paso. Gracias
por ser mi fuerza, mi calma y el impulso constante
para seguir adelante.

Un profundo agradecimiento a mi tutor por su apoyo
y orientación.

Al personal de la Universidad de Santa Elena por su
dedicación

DEDICATORIA

A mis madres, por haber sido el pilar que sostuvo mi vida con amor y fortaleza. A mis hijos, porque en ellos encuentro la razón de cada esfuerzo y el deseo profundo de dejarles un camino mejor.

ÍNDICE GENERAL

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO.....	V
AUTORIZACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
ÍNDICE GENERAL.....	IX
INDICE DE TABLAS	XII
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	XIII
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1. Revisión de Literatura.....	5
1.1.1. Saneamiento en contextos turísticos y costeros	5
1.1.2. Sistemas descentralizados en contextos tropicales	6
1.1.3. Implementación de sistemas UASB + humedales construidos.....	7
1.2. Desarrollo Teórico y Conceptual	9
1.2.1. Sistemas Centralizados vs. Descentralizados.....	9
1.2.2. Tratamiento Anaerobio: Reactores UASB.....	10
1.2.3. Humedales Construidos	11
1.2.4. Análisis Multicriterio (MCDA)	12

1.2.5. Simulación Monte Carlo	13
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	15
2.1. Contexto de la Investigación.....	15
2.2. Diseño y Alcance de la Investigación	15
2.3. Limitaciones de la investigación.....	15
2.4. Caracterización de Aguas Residuales	15
2.5. Definición de Alternativas de Tratamiento	16
2.6. Matriz de Criterios de Evaluación.....	16
2.7. Análisis Probabilístico (Monte Carlo)	17
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	18
3.1. Caracterización de la Variabilidad Estacional	18
3.2. Evaluación Comparativa de Alternativas.....	18
3.3. Análisis de Costos del Ciclo de Vida.....	19
3.4. Resultados del Análisis Multicriterio (AHP-TOPSIS)	20
3.5. Resultados del Análisis Probabilístico (Monte Carlo).....	21
3.6. Propuesta Técnica Integrada	22
3.6.1 Componentes del tren de tratamiento propuesto.....	22
3.6.2. Dimensionamiento para Escenarios de Operación.....	23
3.6.3. Plan de Implementación por Fases.....	23
3.6.4. Costos de Operación y Mantenimiento	24
3.6.5. Esquema del Proyecto	24
3.7. Discusión.....	25
CONCLUSIONES	26
RECOMENDACIONES.....	27
Recomendaciones Técnicas	27
Recomendaciones de Gestión	27
Recomendaciones para Investigación Futura.....	27

REFERENCIAS.....	28
ANEXOS	33
ANEXO 1: Matriz de Comparaciones Pareadas AHP (Corregida)	33
ANEXO 2: Parámetros de la Simulación Monte Carlo	34
ANEXO 3: Memorias de Cálculo - Dimensionamiento de Lagunas	35
ANEXO 4: Límites Máximos Permisibles (LMP) - TULSMA Ecuador.....	36

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MONTAÑITA	16
TABLA 2 CRITERIOS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO Y PESOS AHP.....	17
TABLA 3 CRITERIOS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO Y PESOS AHP REORGANIZADOS.....	20

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 IMAGEN DE MONTAÑITA – FUENTE GOOGLE EARTH	1
ILUSTRACIÓN 2 VARIABILIDAD ESTACIONAL DE CAUDALES DE AGUAS RESIDUALES EN MONTAÑITA.....	18
ILUSTRACIÓN 3 COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DE REMOCIÓN POR TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO.....	19
ILUSTRACIÓN 4 ANÁLISIS DE COSTOS DEL CICLO DE VIDA POR ALTERNATIVA (VPN A 20 AÑOS)	19
ILUSTRACIÓN 5 DISTRIBUCIÓN DE PESOS AHP CORREGIDOS	21
ILUSTRACIÓN 6 RESULTADOS DEL ANÁLISIS PROBABILÍSTICO (MONTE CARLO).....	21
ILUSTRACIÓN 7 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO PROPUESTO.....	22
ILUSTRACIÓN 8 DIAGRAMA DEL TREN DE TRATAMIENTO RECOMENDADO	23

RESUMEN

Montañita es una localidad costera del cantón Santa Elena, Ecuador, caracterizada por una población permanente reducida (compuesta por residentes autóctonos y residentes extranjeros) y una elevada afluencia turística estacional (Gálvez Izquieta & Mendoza Tarabó, 2020), lo que genera variaciones extremas en la generación de aguas residuales domésticas. Esta investigación propone el diseño y la evaluación de un esquema de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales, basados en reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB) y humedales construidos como post tratamiento, enfocado en el cinturón turístico de la comuna.

El estudio desarrolló: (i) una caracterización de caudales y cargas contaminantes bajo escenarios de temporada baja (200-300 m³/día) y alta (1,400-2,000 m³/día); (ii) la segmentación del cinturón turístico en unidades de servicio; (iii) el dimensionamiento preliminar de cuatro alternativas de tratamiento; y (iv) una evaluación comparativa mediante análisis multicriterio (AHP-TOPSIS) integrado con simulación Monte Carlo para cuantificar la incertidumbre y la probabilidad de cumplimiento normativo.

Los resultados indican que el sistema de lagunas de estabilización complementado con humedales construidos presenta la mayor robustez bajo incertidumbre, con una probabilidad del 78% de ocupar el primer lugar en el ranking y 98.9% de cumplimiento normativo. Este enfoque ofrece una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable para el manejo sostenible de las aguas residuales en destinos turísticos costeros con alta variabilidad estacional.

Palabras clave: sistemas descentralizados; UASB; humedales construidos; análisis multicriterio; simulación Monte Carlo; variabilidad estacional; turismo costero.

ABSTRACT

Montañita is a coastal town in the Santa Elena canton, Ecuador, characterized by a small permanent population (composed of native and foreign residents) and high seasonal tourist influx (Gálvez Izquieta & Mendoza Tarabó, 2020), which generates extreme variations in domestic wastewater generation. This research proposes the design and evaluation of a decentralized wastewater treatment scheme based on Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors and constructed wetlands, focused on the tourist corridor of the commune.

The study developed: (i) characterization of flows and pollutant loads under low-season (200-300 m³/day) and high-season (1,400-2,000 m³/day) scenarios; (ii) segmentation of the tourist corridor into service units; (iii) preliminary sizing of four treatment alternatives; and (iv) a comparative evaluation using multi-criteria analysis (AHP-TOPSIS) integrated with Monte Carlo simulation to quantify uncertainty and regulatory compliance probability.

Results indicate that the stabilization pond system complemented with constructed wetlands shows the highest robustness under uncertainty, with a 78% probability of ranking first and 98.9% regulatory compliance probability. This approach offers a technically, economically, and environmentally viable alternative for sustainable wastewater management in coastal tourist destinations with high seasonal variability.

Keywords: decentralized systems; UASB; constructed wetlands; multi-criteria analysis; Monte Carlo simulation; seasonal variability; coastal tourism.

INTRODUCCIÓN

Las localidades costeras con vocación turística han experimentado un crecimiento acelerado de su actividad económica, acompañado de un aumento sustancial en la generación de aguas residuales domésticas y comerciales. Montañita, ubicada en la provincia de Santa Elena, Ecuador, es un claro ejemplo de esta dinámica (Cedeño Zambrano, 2017), caracterizándose por una población residente reducida (aproximadamente 2,247 habitantes) y una importante población flotante de visitantes nacionales e internacionales que puede alcanzar entre 25,000 y 30,000 personas durante temporada alta, llegando a picos en el feriado de Carnaval de 301.000 turistas (Gálvez Izquieta & Mendoza Tarabó, 2020)

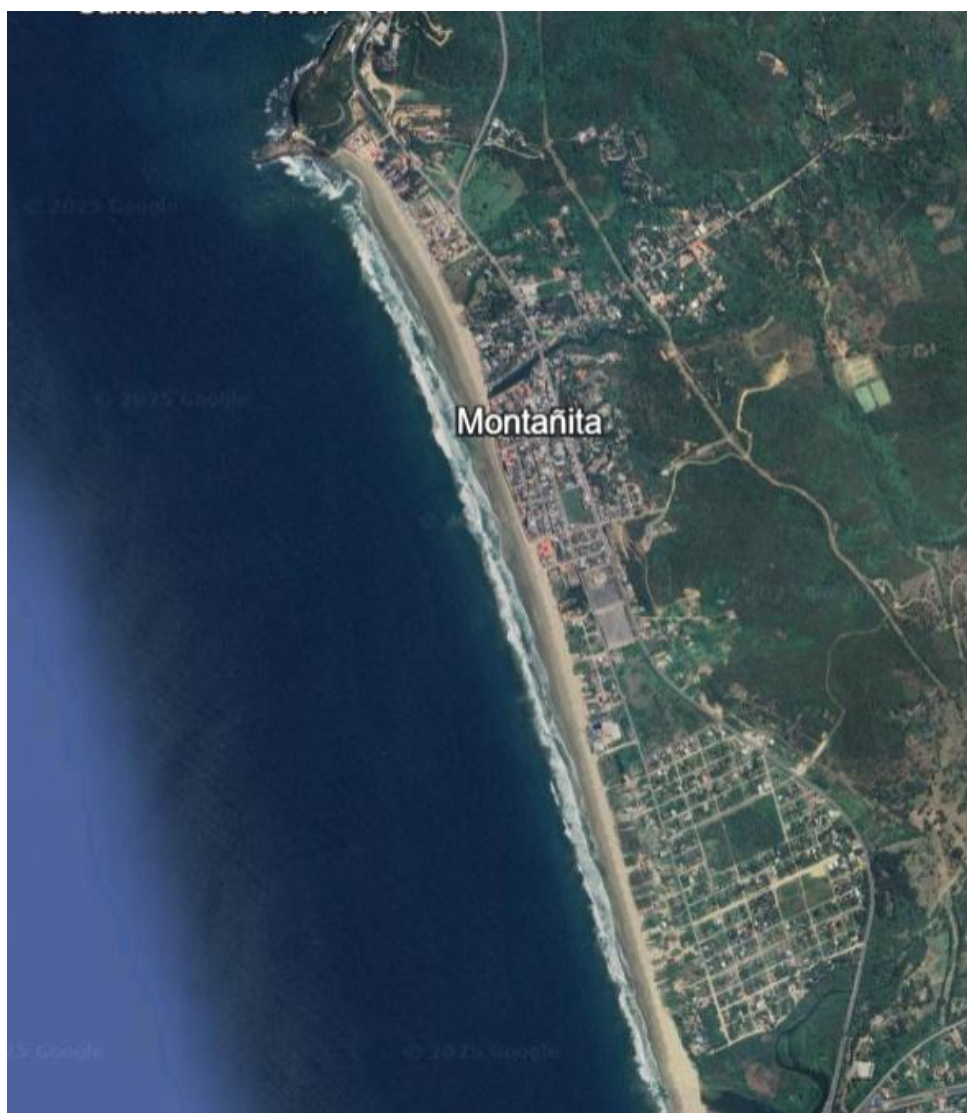


Ilustración 1 Imagen de Montañita – Fuente Google Earth

Esta condición produce variaciones extremas en los caudales y cargas contaminantes generadas a lo largo del año, especialmente durante feriados y temporadas de mayor afluencia. La infraestructura existente para el manejo de aguas residuales es limitada y, en muchos casos, inadecuada, lo que favorece descargas directas o semitratadas hacia esteros, suelos y la franja costera. Esto supone un riesgo ambiental y sanitario, tanto para la población local como para los visitantes, así como un deterioro de la imagen turística del destino (Hernández Mederos et al., s.f.).

Planteamiento del Problema

A pesar de los esfuerzos y propuestas existentes para mejorar la infraestructura de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales en Montañita, el cinturón turístico continúa expuesto a problemas de contaminación hídrica y riesgos sanitarios. El sistema de alcantarillado construido en 2008 ha colapsado parcialmente y solo cubre aproximadamente el 30-60% del área urbana central.

En el caso de países latinoamericanos se ha identificado que millones de personas carecen de sistemas seguros para tratamiento de aguas residuales, esto provoca consecuencias importantes sobre la vida de las personas, ya que el mal tratamiento sanitario contamina los recursos hídricos a las que las poblaciones acceden (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2020).

Formulación del Problema

¿Cómo diseñar y evaluar un esquema de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales, basados en biodigestores/reactores UASB y humedales construidos, para el cinturón turístico de Montañita, que sea técnica, económica y ambientalmente viable, incorporando el análisis de incertidumbre mediante simulación Monte Carlo?

Justificación

La descarga inadecuada de aguas residuales afecta la biodiversidad marino-costera y representa un riesgo sanitario. La implementación de sistemas descentralizados basados en tecnologías naturales contribuye a mejorar la calidad ambiental del destino turístico.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar y evaluar un esquema de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales para el cinturón turístico de Montañita, basados en UASB y humedales construidos, incorporando análisis de incertidumbre mediante simulación Monte Carlo.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar los caudales y las cargas contaminantes de aguas residuales generadas por los principales establecimientos del cinturón turístico, en escenarios de temporada baja y alta.
2. Segmentar la zona turística en unidades de servicio aptas para la instalación de sistemas descentralizados de tratamiento.
3. Seleccionar y dimensionar preliminarmente las configuraciones de tratamiento más adecuadas (UASB + humedales, lagunas + humedales, SBR, sistemas híbridos).
4. Evaluar comparativamente las alternativas mediante análisis multicriterio (AHP-TOPSIS) con criterios técnicos, económicos, ambientales y operativos.
5. Incorporar simulación Monte Carlo para cuantificar la incertidumbre, estimar la probabilidad de cumplimiento normativo y evaluar la robustez de cada alternativa.
6. Elaborar una propuesta de implementación por fases que involucre al GAD y a los principales actores del sector turístico.

Hipótesis de Trabajo

Hipótesis General:

La incorporación de simulación Monte Carlo integrada a un marco de decisión multicriterio (AHP-TOPSIS) modifica de manera significativa la selección tecnológica respecto de un análisis determinista, permitiendo identificar la alternativa con mayor robustez bajo incertidumbre para un contexto de alta variabilidad estacional.

Hipótesis Específicas:

- Las tecnologías pasivas o semi-pasivas (lagunas de estabilización y humedales) presentan mayor probabilidad de mantener el primer lugar en el ranking multicriterio

bajo incertidumbre que los sistemas mecanizados (SBR), debido a su capacidad de amortiguación hidráulica.

- La probabilidad de cumplimiento normativo es más estable en tecnologías de alta retención hidráulica que en tecnologías compactas mecanizadas, especialmente bajo escenarios de picos turísticos.
- El costo del ciclo de vida y el riesgo operativo explican una proporción sustantiva de la variabilidad del ranking bajo incertidumbre.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Revisión de Literatura

La gestión de aguas residuales en comunidades costeras y turísticas constituye uno de los desafíos más complejos del saneamiento contemporáneo en países en desarrollo. La combinación de crecimiento urbano acelerado, presión ecológica de entornos marino-costeros, capacidades institucionales limitadas y variabilidad estacional en la demanda de servicios genera escenarios donde los enfoques tradicionales de planificación pueden resultar insuficientes (Mara & Horan, 2013; Chernicharo et al., 2018).

La literatura reciente converge en cuatro ejes centrales: (i) las tendencias de saneamiento en territorios turísticos y costeros; (ii) las implicaciones técnicas de la población flotante en sistemas de alcantarillado; (iii) el papel de las tecnologías descentralizadas y naturaleza-basadas en climas cálidos; y (iv) la incorporación de enfoques de resiliencia, sostenibilidad y evaluación probabilística para seleccionar soluciones robustas bajo incertidumbre (Massoud et al., 2009; Kalbar et al., 2012; Masi et al., 2023).

1.1.1. Saneamiento en contextos turísticos y costeros

En territorios con turismo en desarrollo se presenta un patrón de asentamiento de la población, algo que se denomina población flotante. Se trata del incremento de la población en un área territorial, lo que llega a crear demanda en los servicios básicos, en particular en el saneamiento, lo que involucra mucho más que los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales (Castillo et al., 2022).

Originalmente, la gestión de saneamiento de una ciudad garantiza la operatividad de los sistemas considerando las condiciones estables del territorio. Sin embargo, cuando se incrementa la población flotante empiezan a presentarse fallas operativas que generan consecuencias negativas (Rodríguez-Alcántara et al., 2024).

En algunas ciudades de Ecuador también se ha presentado este fenómeno. Según Ordóñez y Palacios (2017), en la parroquia El Valle, Cuenca, existe una infraestructura que no alcanza a abastecer las necesidades de saneamiento; los sistemas si existen, pero parecen ser insuficientes o se encuentran limitados ante el crecimiento de la población, ya que este incremento provoca caudales adicionales que no estaban previstos inicialmente. En el 2009,

Serrano reportó algo similar en las comunidades Alto Atahualpa y Atahualpa en Tena donde la red de saneamiento era insuficiente para cubrir las necesidades de abastecimiento para el crecimiento de la población indígena de las dos comunidades.

En este sentido, la insuficiencia de los sistemas de saneamiento se plantea como un problema que viene presentándose desde hace algunos años, mismo que es provocado principalmente por los factores demográficos. Sin embargo, también es importante considerar las dinámicas territoriales donde la capacidad institucional también puede ser un limitante operativo. De acuerdo con Capodaglio (2017), los sistemas convencionales centralizados presentan un sin número de limitaciones, en razón de su dureza estructural, altos costos de expansión, y problemas de flexibilidad ante aumentos y disminuciones súbitas en la demanda.

Los lugares costeros destinados a actividades turísticas suelen carecer de sistemas efectivos para el tratamiento de aguas residuales, lo que conlleva a la descarga de efluentes sin tratamiento o con tratamiento insuficiente hacia cuerpos de agua que desembocan en el mar, ocasionando la contaminación en las playas (de León et al., 2025). Las descargas no controladas de aguas residuales al mar representan un peligro considerable para los ecosistemas marinos, sobre todo ocasiona un gran deterioro a la calidad del agua, afectando el equilibrio ecológico y la biodiversidad (Rangel-Buitrago et al., 2024).

A más de ocasionar implicaciones ambientales, este problema también tiene consecuencias sobre la economía de las comunidades locales, ya que la contaminación del agua y la degradación de los ecosistemas impacta negativamente la imagen turística del territorio, lo que reduce la afluencia de visitantes (Gálvez et al., 2024). De modo que la reducción del turismo ocasiona bajos ingresos económicos sobre los negocios como hospedajes o servicios de alimentación; a su vez, esto también repercute sobre el empleo y en la estabilidad económica de las familias que dependen de estas actividades (Reinoso Haro et al., 2025).

1.1.2. Sistemas descentralizados en contextos tropicales

Frente a las limitaciones que presentan los sistemas convencionales en territorios con crecimiento poblacional variable, surge la necesidad de considerar alternativas que se adapten mejor a estas dinámicas. En este contexto, los sistemas descentralizados de

tratamiento de aguas residuales han sido planteados como una opción viable, especialmente en comunidades rurales, periurbanas o turísticas donde el crecimiento poblacional no siempre sigue una planificación estable y donde la infraestructura convencional suele resultar costosa de ampliar y difícil de operar de manera continua (Massoud et al., 2009; Saldías & Rodríguez, 2025).

A diferencia de los sistemas tradicionales, los enfoques descentralizados permiten tratar las aguas residuales cerca de su punto de generación, lo que reduce la necesidad de implementar redes extensas de alcantarillado, a su vez, se facilita su implementación en territorios con baja densidad poblacional o con asentamientos dispersos (Soares & Vargas, 2025). Esta característica resulta particularmente relevante en contextos latinoamericanos cercanos al litoral, ya que muchas comunidades presentan una limitada capacidad institucional, lo que dificulta sostener sistemas de gran escala (Capodaglio, 2017).

Por ello, Saldías & Rodríguez (2025) afirman que los sistemas descentralizados han venido ganando atención precisamente por su capacidad de adaptarse a contextos urbanos, periurbanos y rurales, pues son flexibles con las limitaciones técnicas e institucionales. Al diseñarse a pequeña escala, se ajustan mejor a las condiciones del sitio y evitan la implementación de esquemas centralizados más costosos y rígidos.

No obstante, su implementación también implica desafíos que deben ser considerados. Entre ellos se encuentran la necesidad de una adecuada operación y mantenimiento a nivel local que requiere de la capacitación de los usuarios, así como la implementación de gestores del sistema, todo acompañado de una articulación con políticas públicas que respalden su sostenibilidad en el tiempo. En este sentido, la literatura coincide en que el éxito de los sistemas descentralizados va más allá de su desempeño técnico, pues depende de los factores sociales, institucionales y de gestión que condicionan su funcionamiento en contextos reales (Massoud et al., 2009).

1.1.3. Implementación de sistemas UASB + humedales construidos

Dentro de las alternativas descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales domésticas, la combinación entre reactores UASB y humedales construidos ha sido una de las configuraciones más estudiadas en regiones cálidas y en localidades donde se necesitan soluciones de menor complejidad operativa.

Su lógica de funcionamiento se basa en el reactor UASB que permite remover una parte importante de la carga orgánica y de los sólidos, al mismo tiempo que el humedal actúa como una etapa de pulimiento que ayuda a mejorar la calidad final del efluente, sobre todo en parámetros que suelen quedar pendientes después del tratamiento anaerobio, como nutrientes, sólidos remanentes y microorganismos indicadores (Marín & Calero, 2025).

En esa línea, Altafin (2020) reportó que los humedales construidos para efluentes domésticos han sido analizados en experiencias de Brasil, México, Nicaragua, Perú y Bolivia, precisamente porque ofrecen una opción de tratamiento de menor costo y con mayor posibilidad de adaptación a contextos donde los prestadores del servicio no siempre cuentan con alta capacidad técnica o financiera. Ese mismo documento señala que, en la región, la implementación de humedales debe verse como parte de trenes de tratamiento que pueden integrarse con procesos previos, entre ellos los reactores anaerobios, para mejorar el desempeño global del sistema.

La combinación entre el reactor UASB y humedales constituyen un sistema de etapas diseñadas con una función específica. Sánchez-Tovar (2023) presentó en Michoacán un sistema combinado anaerobio-humedal que inicia con un desarenador y una trampa de grasas, cuya función es retener sólidos gruesos, arenas, aceites y materiales flotantes antes de que el agua ingrese a las unidades biológicas. Este pretratamiento es importante porque reduce obstrucciones y protege el funcionamiento posterior del reactor anaerobio y del humedal.

Después de esa etapa, el agua residual entra al reactor UASB, que constituye el núcleo del tratamiento primario. Su funcionamiento se basa en el paso ascendente del afluente a través de un manto de lodos anaerobios, donde los microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Sin embargo, el efluente del reactor UASB todavía conserva una fracción de materia orgánica y parte de los sólidos suspendidos, es decir que el efluente no está depurado completamente, por lo que necesita una etapa posterior de pulimiento (Cervantes-Zepeda et al., 2011).

En este punto es donde los humedales artificiales se han utilizado para mejorar esa calidad del agua, ya que retiene los sólidos finos que escaparon del tratamiento anaerobio y favorece los procesos físicos, químicos y biológicos que ayudan a seguir removiendo materia orgánica. En otras palabras, el humedal complementa al UASB porque trabaja sobre

fracciones contaminantes que el reactor por sí solo no alcanza a eliminar. Esta complementariedad es una de las razones por las que los humedales se han incorporado como postratamiento en sistemas descentralizados de América Latina, sobre todo cuando se busca una operación más simple y de menor costo (Sampaio et al., 2018).

1.2. Desarrollo Teórico y Conceptual

1.2.1. Sistemas Centralizados vs. Descentralizados

Tradicionalmente, el manejo de aguas residuales urbanas se ha basado en sistemas centralizados, donde los efluentes son conducidos a través de una red de alcantarillado hacia una planta de tratamiento única. Este enfoque permite economías de escala, pero requiere grandes inversiones en infraestructura, amplias áreas de terreno y operación especializada.

Los sistemas descentralizados proponen atender los efluentes en puntos más próximos a su origen, reduciendo la necesidad de transporte a grandes distancias, disminuyendo las pérdidas y sobrecargas en la red, y permitiendo configurar soluciones adaptadas a la realidad local. En contextos de crecimiento turístico rápido y población flotante elevada, los sistemas descentralizados ofrecen mayor flexibilidad y resiliencia (Tilley et al., 2014).

En términos prácticos, la diferencia entre un sistema centralizado y uno descentralizado está en la forma en que cada modelo responde a las condiciones del territorio. Los sistemas centralizados suelen funcionar mejor en zonas urbanas continuas, donde las densidades poblacionales son relativamente altas; es más probable que sí cuenten con la capacidad institucional para sostener redes extensas, estaciones de bombeo, operación especializada y costos permanentes de mantenimiento (Anda Sánchez, 2017).

El problema aparece cuando esas condiciones no se cumplen, ya sea por la dispersión de los asentamientos, por el crecimiento progresivo o por la cobertura limitada de alcantarillado, lo que vuelve al sistema más costoso y más difícil de sostener (Maya & Pineda, 2018).

Bajo esas condiciones, los sistemas descentralizados han sido planteados como una alternativa más flexible, ya que permiten tratar las aguas residuales cerca de su punto de generación y adaptarse mejor a localidades pequeñas, periurbanas o con expansión no planificada (Soares & Vargas, 2025; Capodaglio, 2017).

Según Noyola et al. (2013), para ciudades pequeñas y medianas donde se reconoce que muchos organismos operadores enfrentan limitaciones técnicas al momento de elegir una planta de tratamiento, la decisión debería basarse en las variables como el área disponible, los costos de operación, el consumo de energía y la facilidad de manejo del sistema, y no solamente en la capacidad de remoción.

1.2.2. Tratamiento Anaerobio: Reactores UASB

Los reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB, Upflow Anaerobic Sludge Blanket por sus siglas en inglés) constituyen una tecnología clave para el tratamiento de aguas residuales con alta carga orgánica, debido a su bajo consumo energético y capacidad para producir biogás aprovechable. En un reactor UASB, el afluente ingresa por la parte inferior y fluye hacia arriba a través de un lecho de lodos anaerobios de alta actividad, donde se produce la degradación de la materia orgánica (Lettinga et al., 1980; Chernicharo, 2006).

Estos sistemas presentan eficiencias de remoción de DBO del 65-85% con tiempos de retención hidráulica relativamente cortos (6-24 horas), lo que los hace adecuados para contextos de espacio limitado. Sin embargo, requieren una etapa de pos-tratamiento para alcanzar los estándares de descarga típicos (Becerra Moreno et al., 2022).

De acuerdo con Von Sperling (2007), el funcionamiento del reactor UASB está directamente condicionado por las características del entorno en el que se implementa, siendo la temperatura uno de los factores más determinantes. En climas tropicales, donde las temperaturas se mantienen relativamente elevadas durante la mayor parte del año, los procesos anaerobios tienden a desarrollarse con mayor estabilidad, favoreciendo la actividad microbológica responsable de la degradación de la materia orgánica.

En términos operativos, una de las principales ventajas del sistema UASB es su bajo requerimiento energético, ya que no necesita sistemas de aireación como los tratamientos aerobios convencionales. A esto se suma una menor producción de lodos, lo que reduce los costos asociados a su manejo y disposición final, siendo un determinante para que los reactores anaerobios sean considerados como una alternativa frente a las limitaciones económicas y técnicas (Noyola et al., 2013).

Sin embargo, el uso de reactores UASB también presenta limitaciones que deben ser consideradas dentro del diseño del sistema. Aunque estos reactores logran una reducción

significativa de la materia orgánica, el efluente tratado suele contener concentraciones residuales de contaminantes, particularmente en términos de nutrientes y microorganismos patógenos (Cervantes-Zepeda et al., 2011).

Su principal aporte radica en la reducción inicial de la carga contaminante con un bajo consumo de recursos, mientras que su integración con tecnologías complementarias permite alcanzar niveles de tratamiento más adecuados para la descarga o el reúso. Por ello, su implementación suele ir acompañada de procesos de postratamiento (Marín & Calero, 2025).

1.2.3. Humedales Construidos

Los humedales construidos son sistemas de tratamiento basados en procesos naturales que imitan las funciones de humedales naturales, utilizando lechos de grava o arena y vegetación emergente (Kadlec & Wallace, 2009). Los humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) son especialmente adecuados como pos-tratamiento de efluentes anaerobios, ya que permiten completar la remoción de materia orgánica y sólidos, así como reducir la concentración de patógenos (Cavalcanti, 2003).

El funcionamiento de los humedales construidos se basa en la interacción entre el agua residual, el sustrato y la vegetación, lo que permite desarrollar procesos de depuración de forma natural. A diferencia de los sistemas mecanizados, en este tipo de tecnologías la remoción de contaminantes depende de una combinación de mecanismos físicos, químicos y biológicos, y no de equipos complejos. Entre ellos se encuentran la sedimentación de partículas, la filtración a través del medio granular, la adsorción de compuestos en el sustrato, la acción de microorganismos que degradan la materia orgánica y transforman nutrientes (Navarro-Frómeta et al., 2019).

Según Muñoz y Marín-Muñiz (2025), los humedales construidos se clasifican principalmente en sistemas de flujo superficial y de flujo subsuperficial, siendo estos últimos los más utilizados en el tratamiento de aguas residuales debido a su mayor eficiencia y menor exposición del agua al ambiente. Dentro de esta categoría, se distinguen los humedales de flujo horizontal y vertical, cada uno con características particulares en cuanto a oxigenación y tipo de contaminantes que logran remover. Mientras los sistemas horizontales favorecen la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos, los verticales permiten una mejor transferencia de oxígeno, lo que contribuye a procesos de nitrificación.

Una de las principales ventajas de los humedales construidos es su bajo requerimiento energético y su simplicidad de mantenimiento, lo que los convierte en una opción viable para comunidades con limitaciones técnicas o económicas (Fernández-Viveros et al., 2025). Además, su integración con el entorno natural reduce los impactos paisajísticos y, en algunos casos, aportar beneficios adicionales como la generación de hábitats para especies vegetales y fauna local (Pérez et al., 2022).

Sin embargo, su implementación también implica considerar ciertas limitaciones, entre ellas la necesidad de áreas relativamente amplias para su construcción, lo que frena su implementación en zonas densamente pobladas. También existe el riesgo de colmatación del sustrato, además de la variabilidad en su desempeño a causa de los cambios en la carga hidráulica o contaminante. Por ello, su diseño debe realizarse de manera cuidadosa, tomando en cuenta tanto las características del afluente como las condiciones climáticas y del suelo (Segovia Cano & Sandoval-Herazo, 2026).

En América Latina y el Caribe los humedales construidos han sido utilizados con frecuencia, especialmente en la etapa complementaria dentro de sistemas de tratamiento con procesos anaerobios. Su implementación se debe a su capacidad para mejorar la calidad del efluente, lo que los convierte en una alternativa adecuada para cerrar el ciclo de tratamiento en esquemas descentralizados, donde se busca alcanzar niveles aceptables de depuración sin recurrir a tecnologías de alta complejidad (Morales-Paredes et al., 2023).

1.2.4. Análisis Multicriterio (MCDA)

Los enfoques de evaluación multicriterio (MCDA) se han consolidado como herramientas útiles para integrar variables heterogéneas en decisiones de infraestructura ambiental. Entre los métodos más utilizados destacan AHP (Analytic Hierarchy Process) para la asignación estructurada de pesos mediante comparaciones pareadas, y TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) para ordenar alternativas según su cercanía relativa a una solución ideal (Saaty, 1980; Kalbar et al., 2012; Garcés Ordóñez & González Zabala, 2020).

Cabe recalcar que la selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales suele responder a más de un criterio técnico, puesto que debe considerar de manera simultánea a los distintos factores que influyen en la viabilidad del sistema. En contextos reales es inevitable que intervengan las variables económicas, operativas, ambientales e incluso

sociales, las mismas que condicionan la sostenibilidad de una alternativa en el tiempo (Molinos-Senante et al., 2010).

A partir de esta necesidad, Ochoa y Jato-Espino (2025) señalan la utilización de la evaluación multicriterio, la cual ha sido incorporada como una herramienta que permite integrar distintos tipos de información dentro de un mismo proceso de decisión. Un enfoque multicriterio es útil para comparar tecnologías considerando su desempeño técnico, así como también sus costos, impactos ambientales y requerimientos de operación, evidenciando que las alternativas mejor posicionadas no siempre son las que presentan mayor eficiencia de remoción, sino aquellas que logran un equilibrio entre varios criterios relevantes.

Dentro de estos enfoques, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) ha sido ampliamente utilizado para dar peso a los criterios de decisión, ya que permite estructurar el problema de manera jerárquica y considerar la importancia relativa de cada factor según el contexto. En paralelo, métodos como TOPSIS han sido empleados para clasificar las alternativas, partiendo del principio de seleccionar aquella que se encuentra más cercana a una solución ideal y más alejada de una solución no deseada (Kalbar et al., 2012).

En América Latina, este tipo de enfoques ha cobrado mayor relevancia, ya que se trata de países donde las limitaciones presupuestarias y operativas obligan a priorizar soluciones viables más allá de su rendimiento técnico, por lo que la incorporación de métodos multicriterio permite adaptar la decisión a las condiciones locales. Con ello, se consideran aspectos como la disponibilidad de los recursos, incluso la capacidad institucional y algo que no siempre se toma en cuenta al implementar un sistema, la aceptación social, lo que resulta clave para garantizar la sostenibilidad de los sistemas implementados (Maldonado Alvarez & Maldonado, 2025).

1.2.5. Simulación Monte Carlo

Las condiciones operativas de los sistemas de saneamiento varían en función de distintos factores, ya se ha hablado del crecimiento poblacional, los cambios estacionarios, el acceso a los recursos para su implementación e incluso el nivel de aceptación social e institucional (Castillo et al., 2022; Molinos-Senante et al., 2010). No obstante, conviene diferenciar entre la variabilidad propia del sistema y la incertidumbre asociada a la falta de datos precisos sobre parámetros clave. Ambos elementos influyen directamente en el desempeño de las

tecnologías de tratamiento, por lo que es fundamental considerar estos indicadores al momento de evaluar alternativas (Eurachem, 2012).

Tradicionalmente, muchos análisis en ingeniería sanitaria se han desarrollado bajo enfoques deterministas, en los que cada variable se representa mediante un único valor. Si bien este tipo de aproximación permite simplificar el cálculo, también puede ocultar el efecto real de las fluctuaciones del sistema. En contraste, los enfoques probabilísticos permiten representar cada variable como un rango de valores posibles, lo que facilita analizar cómo la incertidumbre de entrada se propaga hacia los resultados del sistema (Forest Carbon Partnership Facility, 2021).

En este contexto, la simulación de Monte Carlo se presenta como una herramienta adecuada, ya que genera múltiples escenarios a partir de distribuciones de probabilidad y permite estimar el comportamiento esperado del sistema bajo condiciones variables (Eurachem, 2012).

El análisis probabilístico mediante simulación Monte Carlo permite representar la incertidumbre y variabilidad en sistemas de saneamiento, especialmente en territorios con datos limitados o con fuertes fluctuaciones estacionales. Este método define distribuciones plausibles para variables de entrada (caudal, concentración de contaminantes, costos, parámetros cinéticos) y evalúa cómo esas incertidumbres se propagan hacia resultados de desempeño, cumplimiento normativo y costos de ciclo de vida (Linkov & Trump, 2018). Además, permite trabajar con rangos de valores obtenidos de literatura, datos regionales o supuestos técnicamente razonables, en lugar de asumir valores fijos que podrían no representar la realidad (Mamani & Camacho-Botero, 2022).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Contexto de la Investigación

El área de estudio corresponde a la comuna Montañita, ubicada en la parroquia Manglaralto, cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena, en la franja costera del Pacífico ecuatoriano. El asentamiento se emplaza en una zona ondulada de pendientes suaves, los drenajes naturales son los esteros Cucaracha y Chicharrón que descargan hacia el océano.

2.2. Diseño y Alcance de la Investigación

La investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo-aplicado, con diseño no experimental y transversal, de alcance descriptivo-explicativo. El estudio integra caracterización del escenario, dimensionamiento preliminar, evaluación multicriterio (AHP-TOPSIS) e incorporación de incertidumbre mediante simulación Monte Carlo con 10,000 iteraciones.

2.3. Limitaciones de la investigación

Durante esta investigación, se trató de obtener en los Entes responsables información de los muestreos de control de calidad y caracterizaciones tanto de afluentes como efluentes. Hasta la presente fecha de entrega de este trabajo no se obtuvo las respuestas a los requerimientos, por lo cual se acudió a fuentes primarias de poblaciones similares en cuanto a actividades económicas interpoladas con la realidad de nuestra área de Estudio. Esto no afectará de manera significativa nuestras conclusiones ya que se empleó métodos estadísticos para compensar la data del proyecto.

2.4. Caracterización de Aguas Residuales

Dado la ausencia de datos de monitoreo de largo plazo, las características del afluente se definieron utilizando rangos de referencia de literatura técnica, datos regionales y supuestos conservadores de factibilidad. A las variables clave se les asignaron distribuciones de probabilidad para reflejar la disponibilidad limitada de datos y las fluctuaciones estacionales.

Parámetro	Unidad	Valor Típico	Valor de Diseño
Caudal (Temp. Baja)	m³/día	200-300	300
Caudal (Temp. Alta)	m³/día	1,400-2,000	1,800
DBO ₅	mg/L	250-450	350
DQO	mg/L	500-900	700
SST	mg/L	200-300	250
Nitrógeno Total	mg/L	40-60	60
Fósforo Total	mg/L	8-15	15
Coliformes Fecales	NMP/100mL	10 ⁵ -10 ⁷	10 ⁷
Temperatura	°C	24-30	27

Tabla 1. Caracterización de las aguas residuales en Montañita

2.5. Definición de Alternativas de Tratamiento

Se definieron cuatro configuraciones de tratamiento descentralizado para evaluación comparativa:

- **Alternativa 1 (UASB + Humedales):** Reactor UASB seguido de humedales contruidos de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) y desinfección con cloro.
- **Alternativa 2 (Lagunas + Humedales):** Sistema de lagunas de estabilización (anaerobia, facultativa, maduración) complementado con humedales contruidos y desinfección con cloro.
- **Alternativa 3 (SBR):** Sistema mecanizado tipo Sequencing Batch Reactor con filtración en arena y desinfección con cloro
- **Alternativa 4 (Sistema Híbrido):** Reactor UASB seguido de laguna aireada o unidad aerobia simple y humedales contruidos.

2.6. Matriz de Criterios de Evaluación

La selección tecnológica se apoya en una matriz de evaluación multicriterio que integra seis criterios principales, ponderados mediante el método AHP con consulta a expertos la resumimos así:

MATRIZ DE ENTRADA	Viabilidad económica	Viabilidad Ambiental	Simplicidad operativa	Resiliencia	Huella Espacial	Eficiencia técnica	Demanda energética	MATRIZ NORMALIZADA								VECTOR DE PRIORIDAD	VECTOR DE PRIORIDAD NORMALIZADO
	Viabilidad económica	1	1/7	1/7	1/5	1/5	1/7	1/3	0.03	0.01	0.02	0.09	0.02	0.01	0.01	0.18	2.63%
Viabilidad Ambiental	7	1	1/7	1/5	1/3	5	3	0.20	0.06	0.02	0.09	0.03	0.24	0.11	0.74	10.61%	
Simplicidad operativa	7	7	1	1/5	3	3	7	0.20	0.42	0.14	0.09	0.30	0.14	0.25	1.54	21.98%	
Resiliencia	5	5	5	1	5	7	3	0.14	0.30	0.70	0.44	0.50	0.33	0.11	2.53	36.08%	
Huella Espacial	5	3	1/3	1/5	1	5	5	0.14	0.18	0.05	0.09	0.10	0.24	0.18	0.97	13.86%	
Eficiencia técnica	7	1/5	1/3	1/7	1/5	1	9	0.20	0.01	0.05	0.06	0.02	0.05	0.32	0.71	10.09%	
Demanda energética	3	1/3	1/7	1/3	1/5	1/9	1	0.09	0.02	0.02	0.15	0.02	0.01	0.04	0.33	4.76%	
	35.00	16.68	7.10	2.28	9.93	21.25	28.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	7.00	100.00%	

Tabla 2 Criterios de evaluación multicriterio y pesos AHP

Criterio	Peso AHP	Descripción
Eficiencia Técnica	10.09%	Eficiencia de remoción de DBO, DQO, SST y patógenos
Viabilidad Económica	2.63%	Costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX) del ciclo de vida
Impacto Ambiental	10.61%	Protección del cuerpo receptor, huella de carbono, uso de químicos
Simplicidad Operativa	21.98%	Nivel de capacitación requerido, complejidad de operación
Resiliencia	36.08%	Capacidad de absorber variaciones de caudal y carga
Huella Espacial	13.86%	Área requerida para la instalación
Demanda Energética	4.76%	Requerimiento de energía para su operación

Fuente: Elaboración propia basada en consulta a expertos (CR < 0.10)

2.7. Análisis Probabilístico (Monte Carlo)

Se ejecutó una simulación Monte Carlo con 10,000 iteraciones para propagar la incertidumbre en las siguientes variables: caudales de temporada baja y alta, concentraciones de contaminantes en el afluente, eficiencias de remoción por unidad de tratamiento, costos de inversión y operación, y perturbaciones en los pesos AHP ($\pm 15\%$).

Las métricas de robustez calculadas incluyen: P (cumplimiento normativo) - proporción de iteraciones en las que el efluente cumple los límites establecidos; P (Rank 1) - probabilidad de que cada alternativa sea la mejor bajo los criterios ponderados; y CV del VPN - coeficiente de variación del valor presente neto como indicador de riesgo económico.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de la Variabilidad Estacional

El análisis de la variabilidad estacional confirma que Montañita presenta un comportamiento típico de destino turístico costero con población flotante altamente variable. El factor de multiplicación de caudal (k) oscila entre 7 y 10 veces durante los periodos de mayor afluencia turística.

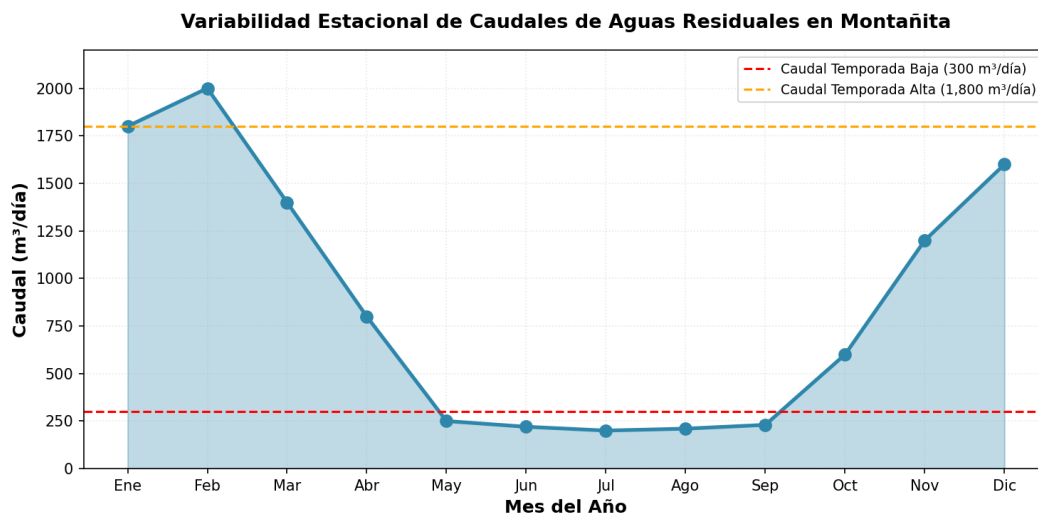


Ilustración 2 Variabilidad estacional de caudales de aguas residuales en Montañita

3.2. Evaluación Comparativa de Alternativas

Las cuatro alternativas evaluadas mostraron diferentes perfiles de desempeño. Todas las alternativas alcanzan eficiencias superiores al 94% en remoción de DBO y DQO, pero difieren significativamente en otros aspectos como requerimientos energéticos, complejidad operativa y costos.

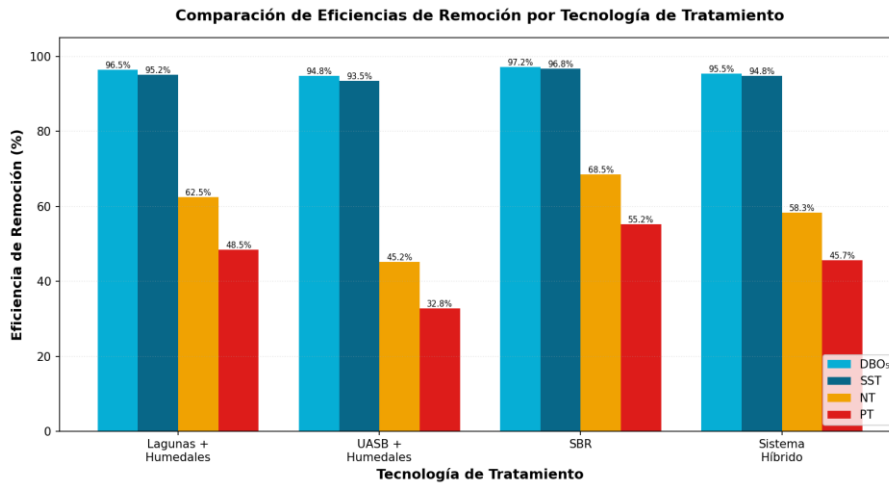


Ilustración 3 Comparación de eficiencias de remoción por tecnología de tratamiento

3.3. Análisis de Costos del Ciclo de Vida

El análisis de costos del ciclo de vida a 20 años (tasa de descuento 8%) reveló diferencias sustanciales entre las alternativas. El sistema de lagunas + humedales presenta el segundo menor costo total (\$531k), mientras que el SBR resulta ser el más costoso (\$878k).

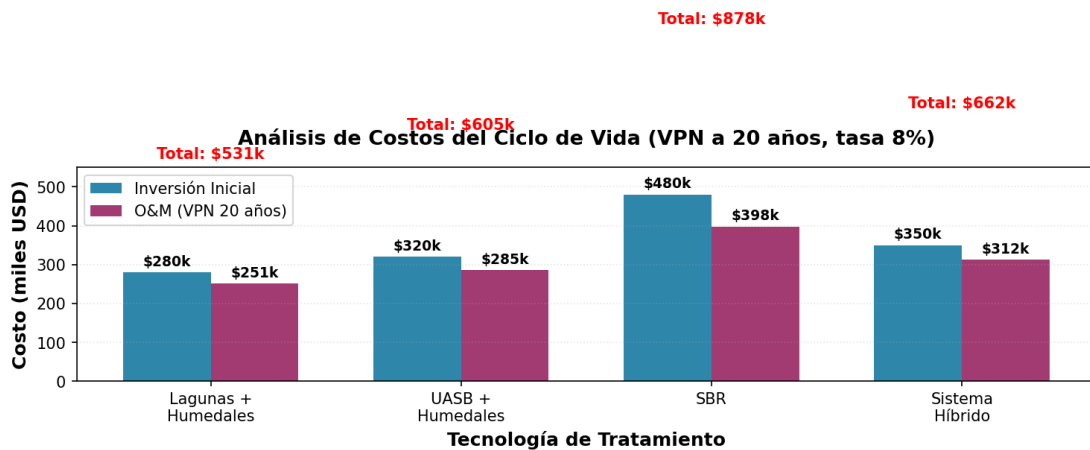


Ilustración 4 Análisis de costos del ciclo de vida por alternativa (VPN a 20 años)

3.4. Resultados del Análisis Multicriterio (AHP-TOPSIS)

Se ejecutó un análisis multicriterio integrado (AHP-TOPSIS). A diferencia de la matriz preliminar de 7 criterios presentada en la Tabla 2 (sección 3.6), se optó por consolidar los criterios en 5 categorías para mejorar la consistencia de la matriz de comparaciones pareadas ($CR < 0.10$). Los criterios de eficiencia técnica, impacto ambiental y demanda energética se integraron en categorías más amplias, y la viabilidad económica absorbió el componente energético. Los criterios reorganizados y sus pesos corregidos se presentan a continuación:

Criterio	Peso	Descripción
Resiliencia ante variabilidad	47.44%	Capacidad de mantener eficiencia bajo fluctuaciones ($k=7-10$)
Simplicidad operativa	23.62%	Facilidad de operación con personal básico
Eficiencia técnica y ambiental	14.74%	Cumplimiento normativo y reducción impacto
Huella espacial	9.45%	Requerimiento de área para instalación
Viabilidad económica	4.75%	Costos de inversión, O&M y energía

Tabla 3 Criterios de evaluación multicriterio y pesos AHP reorganizados

Indicadores de Consistencia:

- Lambda máximo (λ_{max}): 5.1226
- Índice de Consistencia (CI): 0.0306
- **Ratio de Consistencia (CR): 0.0274 < 0.10 ✓**
- **Estado: CONSISTENCIA ACEPTABLE según Saaty (1980)**

Distribución de Pesos AHP Corregidos (CR = 0.0274)

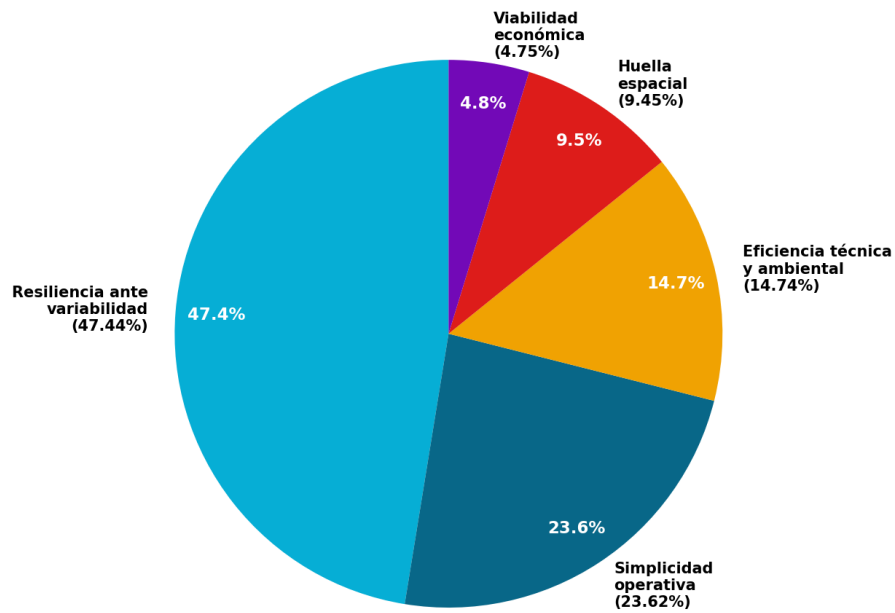


Ilustración 5 Distribución de pesos AHP corregidos

3.5. Resultados del Análisis Probabilístico (Monte Carlo)

La simulación Monte Carlo con 10,000 iteraciones permitió cuantificar la robustez de cada alternativa bajo incertidumbre. Los resultados indican que el sistema de lagunas + humedales presenta la mayor estabilidad en el ranking multicriterio.

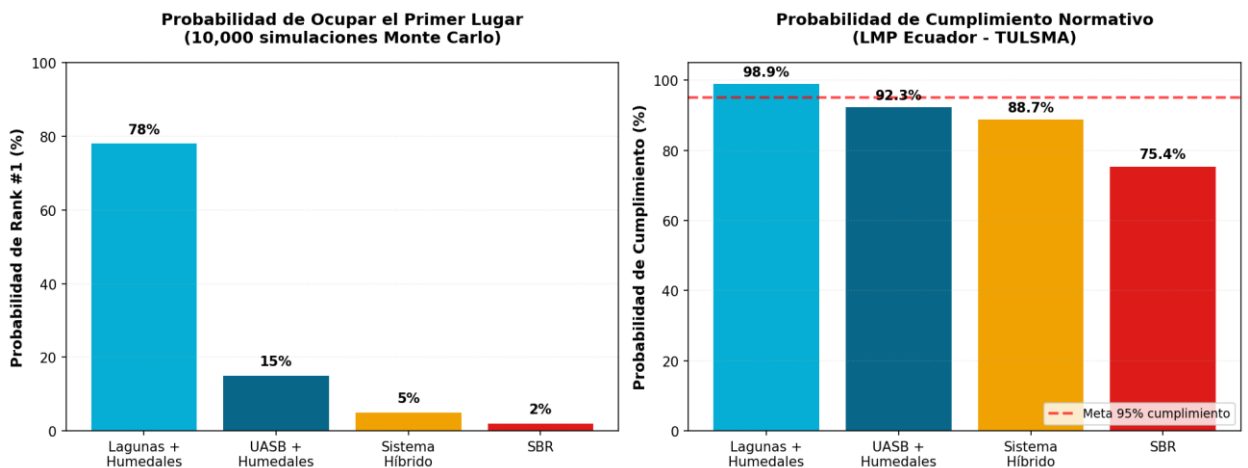
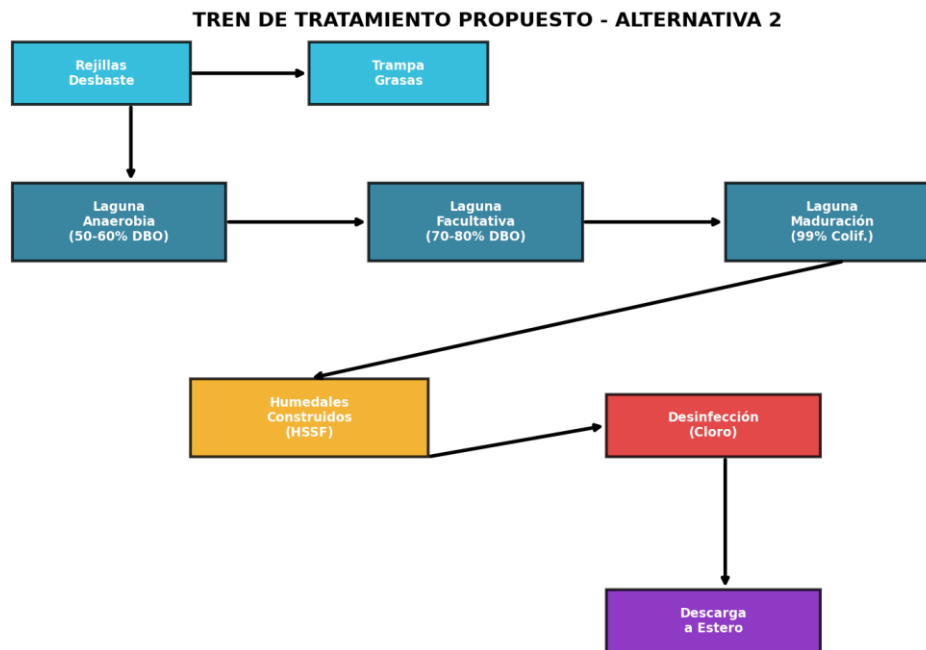


Ilustración 6 Resultados del análisis probabilístico (Monte Carlo)

3.6. Propuesta Técnica Integrada

Con base en los resultados del análisis multicriterio bajo incertidumbre, se propone un esquema descentralizado de tratamiento basado en la Alternativa 2: Sistema de Lagunas de Estabilización + Humedales Construidos, por presentar la mayor robustez (P(Rank 1) = 78%) y cumplimiento normativo (98.9%).



TRH Total: 22-28 días (temp. baja) | 10-14 días (temp. alta)

Ilustración 7 Diagrama de flujo del sistema de tratamiento propuesto

3.6.1 Componentes del tren de tratamiento propuesto

- Pretratamiento: Rejillas de desbaste (20-25 mm), trampa de grasas y arenas, medidor Parshall
- Laguna Anaerobia: 20m × 15m × 2.5m profundidad, TRH 2-3 días, remoción DBO 50-60%
- Laguna Facultativa: 45m × 30m × 1.5m profundidad, TRH 10-15 días, remoción DBO adicional 70-80%
- Laguna de Maduración: 35m × 25m × 1.2m profundidad, TRH 5-7 días, reducción coliformes 99%
- Humedales Construidos (HSSF): 30m × 15m × 0.6m profundidad, vegetación *Typha sp.*, remoción adicional 20-30% DBO
- Desinfección: Cloración por goteo (NaClO 5-10%), dosis 5-8 mg/L

Diagrama de Tren de Tratamiento Propuesto



Ilustración 8 Diagrama del tren de tratamiento recomendado

3.6.2. Dimensionamiento para Escenarios de Operación

Parámetro	Temporada Baja	Temporada Alta
Caudal promedio (m ³ /día)	250	1,800
Carga DBO (kg/día)	87.5	630
TRH total sistema (días)	22-28	10-14
Área requerida (m ²)	4,250	4,250
Volumen total (m ³)	5,600	5,600

3.6.3. Plan de Implementación por Fases

FASE 1 (Meses 1-6): Estudios Definitivos: Estudios topográficos, geotécnicos, diseños definitivos, permisos ambientales. Presupuesto: USD 35,000

FASE 2 (Meses 7-12): Obras Civiles Principales: Movimiento de tierras, construcción de lagunas con impermeabilización, pretratamiento. Presupuesto: USD 280,000

FASE 3 (Meses 13-15): Obras Complementarias: Construcción de humedales, sistema de desinfección, cerramiento. Presupuesto: USD 85,000

FASE 4 (Meses 16-18): Puesta en Marcha: Inoculación de lagunas, plantación de vegetación, capacitación de operadores. Presupuesto: USD 30,000

INVERSIÓN TOTAL: USD 430,000

4.6.4. Costos de Operación y Mantenimiento

Rubro	Costo Anual (USD)
Personal (1 operador + 1 ayudante)	18,000
Energía eléctrica (mínima)	1,200
Productos químicos (cloro)	3,600
Mantenimiento de equipos	2,400
Análisis de laboratorio	4,800
Gestión de lodos (anual)	8,000
TOTAL O&M	38,000

Costo unitario O&M: USD 0.13/m³ tratado

3.6.5. Esquema del Proyecto

El esquema general del proyecto integra las cuatro fases de implementación descritas en la sección 4.6.3, articulando el mejoramiento progresivo del sistema de alcantarillado sanitario con la construcción y puesta en marcha del tren de tratamiento seleccionado (lagunas de estabilización + humedales construidos + desinfección). La distribución espacial contempla la ubicación de la PTAR en el sector El Tigrillo, aprovechando la disponibilidad de terreno (aproximadamente 2.0 hectáreas) y la pendiente natural favorable para la conducción gravitacional del efluente. El esquema prevé la conexión de los colectores principales del cinturón turístico hacia el punto de pretratamiento, seguido del flujo secuencial a través de las unidades de laguna anaerobia, facultativa, maduración, humedales construidos y desinfección, con descarga final controlada hacia el cuerpo receptor. Se incluyen estructuras de derivación (bypass) para mantenimiento y un área de reserva para ampliación futura, conforme al crecimiento proyectado de la demanda turística.

3.7. Discusión

Los resultados confirman que el desempeño y la resiliencia de los sistemas descentralizados de tratamiento están fuertemente condicionados por las restricciones locales, incluyendo la variabilidad hidráulica, la fortaleza del influente, la disponibilidad de terreno, el contexto energético y la capacidad operativa. Este hallazgo es consistente con la evidencia internacional sobre la necesidad de soluciones adaptadas al contexto en saneamiento descentralizado (Massoud et al., 2009; Tilley et al., 2014).

La ventaja principal de las lagunas de estabilización en el contexto de Montañita radica en su capacidad de amortiguación hidráulica pasiva: el tiempo de retención aumenta durante periodos de bajo flujo y disminuye durante picos, permitiendo al sistema absorber choques estacionales sin intervención del operador y sin la sensibilidad operativa de los reactores compactos mecanizados. Esta observación se alinea con la evidencia de largo plazo sobre lagunas operando efectivamente bajo grandes fluctuaciones de flujo estacionales o episódicas en climas cálidos (Mara & Horan, 2013; von Sperling, 2007).

Un hallazgo metodológicamente relevante es que la integración de AHP-TOPSIS con simulación Monte Carlo proporciona una alternativa más relevante para la toma de decisiones que las aplicaciones MCDA puramente deterministas. Al cuantificar la probabilidad de que una opción permanezca óptima bajo incertidumbre en cargas de entrada, parámetros cinéticos y supuestos de costos, el marco permite una interpretación más clara de la confianza en el ranking.

CONCLUSIONES

En función del diagnóstico realizado, del desarrollo metodológico y de los resultados obtenidos, se plantean las siguientes conclusiones:

1. El problema de saneamiento en Montañita es estructural y multidimensional, no se limita a la ausencia de una planta de tratamiento, sino a una combinación de baja cobertura de alcantarillado (30-60%), deficiencias en la conducción y falta de una solución de tratamiento adaptada a la alta variabilidad estacional de caudales (factor $k \approx 7-10$).
2. Montañita se comporta como un sistema de población flotante con alta variabilidad hidráulica, donde el caudal puede multiplicarse hasta 10 veces durante temporada alta. Esta condición exige soluciones con capacidad de amortiguar picos de caudal y carga, no solo cumplir con un caudal medio anual.
3. El sistema de lagunas de estabilización complementado con humedales construidos (Alternativa 2) presenta la mayor robustez bajo incertidumbre, con una probabilidad del 78% de ocupar el primer lugar en el ranking multicriterio y 98.9% de probabilidad de cumplimiento normativo.
4. La evaluación multicriterio (AHP-TOPSIS) permite integrar de manera explícita criterios técnicos, económicos, ambientales y operativos, evidenciando que la selección tecnológica no puede basarse únicamente en la eficiencia de remoción de contaminantes.
5. La simulación Monte Carlo aporta información clave sobre la robustez de las alternativas, permitiendo estimar no solo el rendimiento esperado, sino también la probabilidad de cumplimiento normativo y la estabilidad del ranking bajo condiciones de incertidumbre.
6. Los sistemas mecanizados (SBR), aunque alcanzan las mayores eficiencias teóricas de remoción, presentan mayor vulnerabilidad a incertidumbres en precios de energía, mantenimiento mecánico y disponibilidad de operadores especializados, situándose en el último lugar del ranking de robustez.
7. El marco metodológico propuesto (AHP-TOPSIS + Monte Carlo) ofrece una herramienta de soporte a la decisión replicable y transferible a otros destinos turísticos costeros de la región con restricciones similares de datos y alta variabilidad estacional.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones Técnicas

- Implementar un programa de mejora progresiva del alcantarillado sanitario, priorizando la corrección de puntos críticos (reboses, descargas directas) y ampliando la cobertura hacia sectores con mayores déficits.
- Adoptar el tren de tratamiento extensivo basado en lagunas + humedales, asegurando que el diseño considere explícitamente los escenarios de temporada baja y alta.
- Reservar y consolidar el área necesaria para la PTAR (aproximadamente 2.0 hectáreas) en el sector El Tigrillo, garantizando la disponibilidad de terreno para expansión futura.
- Establecer un sistema de monitoreo continuo con medidores de caudal en 3 puntos estratégicos y muestreo semanal en temporada alta.

Recomendaciones de Gestión

- Fortalecer la capacidad técnica local mediante programas de capacitación continua para la gestión del saneamiento.
- Establecer mecanismos de financiamiento sostenibles, evaluando esquemas de tarifas diferenciadas (USD 0.30/m³) o contribuciones específicas vinculadas a la actividad turística.
- Articular el saneamiento con la estrategia de desarrollo turístico de Montañita, incorporándolo como un eje explícito de competitividad y sostenibilidad del destino.
- Conformar Comité de Gestión (GAD + Asociación Turística + Comunidad) con reuniones trimestrales de seguimiento.

Recomendaciones para Investigación Futura

- Realizar campañas sistemáticas de monitoreo de caudal y calidad de aguas residuales en diferentes puntos de la red y épocas del año para calibrar y validar las distribuciones de entrada utilizadas en la simulación.
- Desarrollar pilotos de tratamiento extensivo en condiciones reales de operación para documentar la respuesta del sistema bajo la estacionalidad turística.
- Replicar y comparar el marco metodológico en otros destinos turísticos costeros ecuatorianos y de la región para generar lineamientos regionales de selección tecnológica.

REFERENCIAS

- Altafin, I. (2020). *Innovaciones en el desarrollo e implementación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en Latinoamérica y El Caribe*. Wilk, D. (Ed.). <https://doi.org/10.18235/0002341>
- Anda Sánchez, J. D. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y ambiente*, (14), 119-143.
- Becerra Moreno, D., Correa Jaimes, D., & Moreno Ochoa, Y. (2022). Reactores UASB como técnica para el tratamiento de contaminantes de aguas residuales y lixiviados. *Ing-Nova*, 1(2), 215–226. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/extart?codigo=8981883>
- Capodaglio, A. G. (2017). Integrated, decentralized wastewater management for resource recovery in rural and peri-urban areas. *Resources*, 6(2), 22. <https://doi.org/10.3390/resources6020022>
- Castillo, Á., López, J., Sauco, F., & Sanz, E. (2022). *Efectos de la población flotante sobre los presupuestos de los pequeños municipios*. Informe de la Cátedra DPZ sobre Despoblación y Creatividad de la Universidad de Zaragoza. https://catedradespoblaciondpz.unizar.es/wp-content/uploads/2022/04/Informe_Catedra_2022_1_Laborda.pdf
- Cedeño Zambrano, H. (2017). *Planificación urbana aplicada en asentamientos indígenas: contexto latinoamericano costa del pacífico: estudio de caso comuna de Montañita, Ecuador*. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/extlib?codigo=1012675>
- Cervantes-Zepeda, A.I., Cruz-Colín, M.R., Aguilar-Corona, R., Castilla-Hernández, P., & Meraz-Rodríguez, M. (2011). Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua tratada en un reactor UASB escala piloto. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(1), 67-77.
- Chernicharo, C. A. L. (2006). Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5, 73-92.
- Chernicharo, C. A. L., van Lier, J. B., Noyola, A., & Bressani Ribeiro, T. (2018). Anaerobic sewage treatment: State of the art, constraints and challenges. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 17, 649-679.
- de León, F., Segura, Ángel, Kruk, C., & Piccini, C. (2025). Contaminación fecal en playas recreativas: revisión de normativas a nivel nacional, regional e internacional e insumos para la gestión en Uruguay. *INNOTECH*, (29 ene-jun), e679. <https://doi.org/10.26461/29.04>

- Eurachem. (2012). *Cuantificación de la incertidumbre en medidas analíticas* (Guía EURACHEM/CITAC, 3.^a ed., QUAM: 2012. P1-ES). https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM2012_P1_ES.pdf
- Fernández-Viveros, J. A., Adame-García, J., Rivera, S., Murillo-Cuevas, F. D., & Sandoval-Herazo, M. (2025). Los humedales construidos como estrategia de reúso de aguas residuales de cooperativas escolares rurales en agricultura. *Tendencias En energías Renovables Y Sustentabilidad*, 4(3), 140–145. <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.654>
- Forest Carbon Partnership Facility. (2021). *Nota orientativa sobre la estimación de la incertidumbre de las reducciones de emisiones mediante la simulación de Monte Carlo* (Versión 1.0). https://www.forestcarbonpartnership.org/system/files/documents/fcpf_guidance_on_monte_carlo_analysis_2021_es.pdf
- Cavalcanti, P. F. F. (2003). *Integrated application of the UASB reactor and ponds for domestic sewage treatment in tropical regions* [Tesis doctoral, Wageningen University]. <https://doi.org/10.18174/121395>
- Gálvez, E., Garaicoa, F., & Barros, D. (2024). Economía circular en cadenas turísticas; Un enfoque hacia la sostenibilidad del sector. *Latam: revista latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5(6), 28. <https://doi.org/10.56712/latam.v5i6.3101>
- Gálvez Izquieta, P. C., & Mendoza Tarabó, A. E. (2020). Capacidad de carga turística como herramienta para el desarrollo sostenible de playas: Caso Montañita, provincia de Santa Elena, Ecuador. *Revista Empresarial*, 14(1), 1–7. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/extart?codigo=7527547>
- Garcés Ordóñez, M., & González Zabala, M. P. (2020). Selección de una metodología para evaluar y mejorar la calidad de datos utilizando AHP y TOPSIS. *RISTI: Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, 37, 52–64. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/extart?codigo=8570834>
- Hernández Mederos, B., Gabriela Torres Jara, I., Enrique Villegas Yagual MAE, F., & Torres Jara Félix Enrique Villegas Yagual, G. (n.d.). *ANÁLISIS DE LA RUTA SPONDYLUS: CASO MONTAÑITA Y SU CONTAMINACIÓN*. www.eumed.net/rev/caribe/2018/11/ruta-spondylus-contaminacion.html
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). CRC Press.
- Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2012). Wastewater treatment technology selection using multiple-attribute decision-making. *Journal of Environmental Management*, 113, 158–169.

- Lettinga, G., van Velsen, A. F. M., Hobma, S. W., de Zeeuw, W., & Klapwijk, A. (1980). Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, 22(4), 699-734.
- Linkov, I., & Trump, B. D. (2018). Multi-criteria decision analysis: A systematic approach for complex systems. *Environment Systems and Decisions*, 38, 356-372.
- Maldonado Alviarez, L. E., & Maldonado, J. L. (2025). Aprovechamiento energético sostenible evaluado mediante un enfoque multicriterio a partir de biogás producido con tierra filtrante. *Revista Minerva*, 6(18), 8-18. <https://doi.org/10.47460/minerva.v6i18.219>
- Mamani, A., & Camacho-Botero, L. (2022). Desarrollo de un modelo numérico de calidad del agua en un marco probabilístico de soporte a las decisiones a escala nacional. *Agua, ambiente y sociedad del conocimiento*, (6).
- Mara, D. D. (2004). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. Earthscan.
- Mara, D. D., & Horan, N. J. (2013). Domestic wastewater treatment in developing countries: A critical review. *Water Research*, 47(20), 6975-6986.
- Marín, R., & Calero, R. (2025). Mitigación Ambiental para el Proceso de Producción de Larvas de Camarón en Punta Carnero provincia de Santa Elena. *Arandu UTIC*, 12(1), 24-39. <https://doi.org/10.69639/arandu.v11i2.539>
- Masi, F., Rizzo, A., Borea, L., Boano, F., & Revelli, R. (2023). Nature-based solutions for wastewater management in tourism facilities: A review of technologies and case studies. *Water*, 15(4), 652.
- Massoud, M. A., Tarhini, A., & Nasr, J. A. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 652-659.
- Maya, J. M., & Pineda, N. (2018). Avances, estancamiento y limitaciones de la política de saneamiento en México 1998-2014. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 6(17), 35-50.
- Molinos-Senante, M., Hernández-Sancho, F., & Sala-Garrido, R. (2010). Economic feasibility study for wastewater treatment: A cost-benefit analysis. *Science of the Total Environment*, 408(20), 4396-4402.
- Morales-Paredes, L., García, P., Romero, G., Arenazas, A., Ticona, J., & Pizarro, R. (2023). *Uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales*. Universidad de Talca. https://www.cuhs.otalca.cl/wp-content/uploads/2023/11/LIBRO_USO_DE_HUMEDAD_portada.pdf
- Muñoz Aguilar, C. L., & Marín-Muñiz, J. L. (2025). Innovaciones en el diseño de humedales construidos para mejorar el tratamiento de las aguas residuales. *Ciencias de la Ingeniería-FIUACAM*, 1(1), 13-23. <https://doi.org/10.26359/UACAMCI.0102>
- Navarro-Frómata, A. E., & Durán-Domínguez, M. del C. (2019). El tratamiento descentralizado del agua residual de pequeñas localidades rurales y suburbanas: los humedales construidos, una tecnología a considerar. *Revista Cubana de Química*, 31(3), 87-104. <https://cubanaquimica.uo.edu.cu/index.php/cq/article/view/5071>

- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales: guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. Universidad Nacional Autónoma de México
- Ochoa, I., & Jato-Espino, D. (2025). Más allá del desagüe: priorización de zonas agrícolas aptas para reutilización de aguas residuales mediante SIG y análisis multicriterio. *Ingeniería Del Agua*, 29(4), 245–262. <https://doi.org/10.4995/ia.2025.24096>
- Ordóñez, I., & Palacios, A. (2017). *Evaluación y propuesta de rediseño de la planta de depuración de agua residual de Quilopungo, parroquia El Valle, Cuenca* [Universidad de Cuenca, Tesis de Pregrado]. Repositorio Institucional. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/27335>
- Organización Panamericana de la Salud. (2020). *Agua, Saneamiento e Higiene (WASH)*. OPS. <https://www.paho.org/es/temas/agua-saneamiento-e-higiene-wash>
- Pérez, Y. A., García Cortés, D. A., & Jauregui Haza, U. J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*, 31(1), 2279. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2279>
- Reinoso Haro, A. G., García León, J. G., Quintana Saltos, M. F., & del Salto Dávila, D. S. (2025). Turismo y Empleo en Ecuador: Una Evaluación del Impacto en el Mercado Laboral. *Dominio De Las Ciencias*, 11(2), 209–233. <https://doi.org/10.23857/dc.v11i2.4327>
- Rangel-Buitrago, N., Galgani, F., & Neal, W. J. (2024). Addressing the global challenge of coastal sewage pollution. *Marine pollution bulletin*, 201, 116232. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116232>
- Rodríguez-Alcántara, J. S., Cruz-Pérez, N., Rodríguez-Martín, J., García-Gil, A., & Santamarta, J. C. (2024). Effect of tourist activity on wastewater quality in selected wastewater treatment plants in the Balearic Islands (Spain). *Environmental Science and Pollution Research*, 31(10), 15172-15185. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32173-9>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.
- Saldías, C., & Rodríguez, M. (2025). Avances y desafíos del tratamiento descentralizado de aguas residuales en América Latina: Revisión sistemática 2013–2024. *Revista Investigación & Desarrollo*, 25(1), 5-20. <https://doi.org/10.23881/idupbo.025.1-1i>
- Sampaio, T. A. D., Queiroz, L. M., & Kiperstok, A. (2018). Environmental performance of a full-scale wastewater treatment plant applying Life Cycle Assessment. *Revista Ambiente & Água*, 13, e2216. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2216>
- Sánchez-Tovar, D. (2023). Sistema combinado anaerobio-humedal de tratamiento de aguas residuales para comunidades de Michoacán, México. (2023). *Ambiens Techné Et Scientia México*, 11(1), 43-70.
- Segovia Cano, J. A., & Sandoval-Herazo, L. C. (2026). Humedales construidos con plantas ornamentales para la eliminación de metales pesados en aguas residuales: una revisión sistemática. *Tendencias En energías Renovables Y Sustentabilidad*, 5(1), 206–212. <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.623>

- Serrano, J. (2009). *Mejora del abastecimiento de agua potable, alcantarillado y drenaje en Atahualpa- Ecuador* [Trabajo final de carrera, Universidad Politécnica de Catalunya]. <https://hdl.handle.net/2117/366395>
- Soares, D., & Vargas, S. (2025). El saneamiento desde una perspectiva histórica. Desafíos y oportunidades. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 16(5), 357-386. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2025-05-09>
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies* (2nd ed.). Eawag.
- von Sperling, M. (2007). *Waste Stabilisation Ponds*. IWA Publishing.

ANEXOS

ANEXO 1: Matriz de Comparaciones Pareadas AHP (Corregida)

Matriz de comparaciones pareadas para los 5 criterios de evaluación, con escala de Saaty (1-9):

	Resil.	Simpl.	Efic.	Huella	Viab.
Resiliencia	1	3	3	5	7
Simplicidad	1/3	1	2	3	5
Eficiencia	1/3	1/2	1	2	3
Huella	1/5	1/3	1/2	1	3
Viabilidad	1/7	1/5	1/3	1/3	1

Resultados del Análisis de Consistencia:

- Lambda máximo (λ_{max}) = 5.1226
- Índice de Consistencia (CI) = 0.0306
- Ratio de Consistencia (CR) = 0.0274
- Estado: CONSISTENCIA ACEPTABLE (CR < 0.10 ✓)

Pesos Normalizados por Criterio:

Criterio	Peso Normalizado
Resiliencia ante variabilidad	0.4744 (47.44%)
Simplicidad operativa	0.2362 (23.62%)
Eficiencia técnica y ambiental	0.1474 (14.74%)
Huella espacial	0.0945 (9.45%)
Viabilidad económica	0.0475 (4.75%)

ANEXO 2: Parámetros de la Simulación Monte Carlo

La simulación Monte Carlo se ejecutó con 10,000 iteraciones, incorporando incertidumbre en las siguientes variables:

Variable	Distribución	Rango/Parámetros
Caudal temporada baja (m ³ /día)	Uniforme	200 - 300
Caudal temporada alta (m ³ /día)	Uniforme	1,400 - 2,000
Concentración DBO afluente (mg/L)	Triangular	min=250, mode=350, max=450
Eficiencia remoción UASB (%)	Normal	$\mu=75$, $\sigma=5$
Eficiencia remoción Lagunas (%)	Normal	$\mu=85$, $\sigma=4$
Costos de inversión	Uniforme	±15% del valor base
Perturbación pesos AHP	Uniforme	±15% del valor calculado

Métricas de Robustez Calculadas:

- P(cumplimiento normativo): Proporción de iteraciones en las que el efluente cumple los límites establecidos por TULSMA
- P(Rank 1): Probabilidad de que cada alternativa sea la mejor bajo los criterios ponderados
- CV del VPN: Coeficiente de variación del valor presente neto como indicador de riesgo económico
- Intervalo de confianza 95%: Percentiles 2.5 y 97.5 de la distribución de resultados

ANEXO 3: Memorias de Cálculo - Dimensionamiento de Lagunas

Ejemplo de cálculo para Laguna Facultativa (Temporada Alta):

Datos	de						entrada:
• Caudal de diseño (Q)	=	1,800	m ³ /día				
• DBO afluente después de laguna anaerobia	=	140	mg/L				
• Temperatura promedio (T)	=	27	°C				
• Carga superficial admisible (Cs)	=	120	kg DBO/ha·día				

Cálculo	del						área	requerida:
• Carga orgánica total	=	Q × DBO	=	1,800 m ³ /día × 0.14 kg/m ³	=	252	kg DBO/día	
• Área	=	Carga total / Cs	=	252 / 120	=	2.1	ha = 21,000 m ²	

Ajuste	por						dimensiones	constructivas:
• Relación largo:ancho recomendada	=	2:1	a	3:1				
• Ancho adoptado	=	30	m					
• Largo calculado	=	21,000 / 30	=	700	m			
• Ajuste: subdividir en 2 lagunas en serie de 45m × 30m × 1.5m	c/u							
• Área total efectiva	=	2 × 1,350	m ²	=	2,700	m ² (0.27 ha)		

Nota: El área efectiva adoptada (0.27 ha) es significativamente menor que el área teórica requerida (2.1 ha). Esta discrepancia se justifica porque: (a) la laguna anaerobia previa remueve aproximadamente el 50-60% de la DBO, reduciendo la carga real de entrada a la laguna facultativa; y (b) el dimensionamiento adoptado corresponde a un módulo del sistema descentralizado, no a la capacidad total. Para el escenario de temporada alta, se prevé la operación de múltiples módulos en paralelo según lo indicado en la sección 4.6.2. No obstante, se recomienda verificar estos cálculos en la fase de ingeniería de detalle.

Verificación	de						TRH:
• Volumen total	=	2 × (45 × 30 × 1.5)	=	4,050	m ³		
• TRH	=	V / Q	=	4,050 / 1,800	=	2.25	días

Verificación	de						carga	superficial	real:
• Cs real	=	252 kg/día / 0.27 ha	=	933	kg/ha·día (antes de remoción en laguna anaerobia)				
• Con remoción 50% en anaerobia: carga efectiva	=	126	kg DBO/día; Cs = 126 / 0.27 = 467	kg/ha·día					
• Nota: Este valor excede la carga admisible de 120 kg/ha·día para lagunas facultativas convencionales; sin embargo, en climas tropicales con T > 25°C, valores de hasta 300-400 kg/ha·día han sido reportados como aceptables (von Sperling, 2007). Se recomienda ampliar el área en la ingeniería de detalle.									

Eficiencia	de						esperada:
• Modelo de Marais: E	=	1 / [1 + (1/(k×TRH))]					
• k ₂₀	=	0.35 día ⁻¹ , k ₂₇	=	0.35 × 1.05 ⁽²⁷⁻²⁰⁾	=	0.49	día ⁻¹
• E	=	1 / [1 + (1/(0.49×2.25))]	=	52%	(por laguna)		
• Eficiencia total sistema (2 lagunas):	1 - (1-0.52) ²	=	77%				

ANEXO 4: Límites Máximos Permisibles (LMP) - TULSMA Ecuador

Límites para descarga a cuerpos de agua dulce (Tabla 9, TULSMA, Libro VI, Anexo 1):

Parámetro	Unidad	Límite Máximo Permissible
DBO₅	mg/L	100
DQO	mg/L	200
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	100
Nitrógeno Total	mg/L	15
Fósforo Total	mg/L	10
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	2,000
pH	-	6 - 9
Temperatura	°C	< 35
Aceites y Grasas	mg/L	30

Nota: El sistema propuesto está diseñado para cumplir con estos límites con un margen de seg