



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

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

**DISEÑO SOSTENIBLE DE UN SISTEMA DESCENTRALIZADO DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA CAMALES EN
ECOSISTEMAS INSULARES: CASO SAN CRISTÓBAL, ISLAS
GALÁPAGOS**

AUTORA

PALATE CAGUA JESSICA ALEXANDRA

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

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

TUTOR

PhD. Calero Mendoza Rolando

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. Celia Mayacela Rojas
DOCENTE ESPECIALISTA**

**PhD. Lucrecia Moreno Alcivar
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 Jessica Alexandra Palate Cagua, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Gestión Ambiental.

TUTOR

PhD. Rolando Calero Mendoza

12 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, Jessica Alexandra Palate Cagua

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, DISEÑO SOSTENIBLE DE UN SISTEMA DESCENTRALIZADO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA CAMALES EN ECOSISTEMAS INSULARES: CASO SAN CRISTÓBAL, ISLAS GALÁPAGOS 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 12 días del mes de marzo del año 2026

LA AUTORA

Jessica Alexandra Palate Cagua



**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 **DISEÑO SOSTENIBLE DE UN SISTEMA DESCENTRALIZADO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA CAMALES EN ECOSISTEMAS INSULARES: CASO SAN CRISTÓBAL, ISLAS GALÁPAGOS**, presentado por el estudiante, **Jessica Alexandra Palate Cagua** fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 5 %, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | UPSE-ECU

INFORME_PALATE_V3-signed copy

ID : 9461c7c8c2a530e02da12974476fe69e0fd9ed6c



5%

Textos sospechosos

Nombre del fichero : INFORME_PALATE_V3-signed copy.txt
Tamaño del archivo original : 1,25 MB
Número de palabras : 11.259
Número de caracteres : 82344

Depositante : ROLANDO RAFAEL CALERO MENDOZA
Fecha de depósito : 13 de marzo de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 13 de marzo de 2026

TUTOR

PhD. Rolando Calero Mendoza



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

AUTORIZACIÓN

Yo, Jessica Alexandra Palate Cagua

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 12 días del mes de marzo del año 2026

LA AUTORA

Jessica Alexandra Palate Cagua

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mis **padres**, quienes han sido el pilar fundamental de mi vida y los arquitectos de mis sueños; su amor incondicional y sacrificios fueron el motor que me impulsó a culminar este proyecto de investigación en beneficio de nuestras islas. A mis **hermanos**, por ser mi refugio, mis mejores amigos y quienes, con su apoyo constante, hicieron que el camino fuera más ligero. Finalmente, extendiendo mi gratitud a mi tutor, el **QF. Calero Mendoza Rolando Rafael, PhD**, por su invaluable guía técnica, su paciencia y por compartir su visión científica en el diseño sostenible de este sistema de tratamiento, permitiéndome contribuir con una solución real y descentralizada para la gestión de aguas residuales en San Cristóbal.

Jessica Alexandra, Palate Cagua

DEDICATORIA

A mis padres: Sr. Segundo Palate Sailema y Sra. Ana Cagua Álvarez que con su ejemplo de perseverancia y amor infinito me enseñaron que no existen fronteras para quien sueña con un mundo mejor; este logro es el fruto de sus sacrificios y mi mayor orgullo. A mis hermanos: Marvin Palate Cagua y Rosalinda Palate Cagua, por ser mi equilibrio y mi fuerza, y por creer en mí incluso en los momentos de mayor desafío. Dedico este trabajo a mi familia, por ser mi raíz en tierra firme y mi impulso para proteger la fragilidad de nuestros ecosistemas insulares, con la esperanza de dejar un legado de sostenibilidad en nuestra amada San Cristóbal.

Jessica Alexandra, Palate Cagua

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 DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XIV
ÍNDICE DE ABREVIACIONES.....	XV
RESUMEN	XVIII
ABSTRACT.....	XIX
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento de la investigación	5
Formulación del problema de investigación	5
Objetivo General	5
Objetivos Específicos:.....	6
Planteamiento hipotético	6
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	7
1.1. Revisión de literatura	7
1.2. Desarrollo teórico y conceptual	7
1.2.1. Características de aguas residuales de camales	7
1.2.2. Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)	10

1.2.3.	Humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSSF)	10
1.2.4.	Lagunas de estabilización.	11
1.2.5.	Reactores biológicos secuenciales (SBR y ANSBR)	12
1.2.6.	Sistema híbrido UASB + laguna aireada + humedal	13
1.2.7.	Desinfección ultravioleta (UV).....	14
1.2.8.	Marco de decisión multicriterio AHP-TOPSIS	15
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....		16
2.1.	Contexto de la investigación.....	16
2.2.	Diseño y alcance de la investigación	16
2.3.	Tipo y métodos de investigación	17
2.4.	Población y muestra.....	17
2.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	17
2.6.	Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.	18
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		20
3.1.	Resultados de la caracterización de la carga orgánica y microbiológica del efluente del camal mediante distribuciones probabilísticas basadas en rangos de referencia de camales similares.....	20
3.2.	Resultados de la evaluación de las cuatro alternativas tecnológicas (UASB+HSSF+UV; lagunas de estabilización+HSSF; SBR+filtración+UV; sistema híbrido UASB+laguna aireada+HSSF) mediante análisis multicriterio AHP-TOPSIS con seis criterios ponderados.	21
3.2.1.	Comparación del sistema UASB+HSSF+UV Vs Lagunas de estabilización	22
3.2.2.	Comparación del sistema de tratamiento UASB+HSSF+UV con el sistema SBR+filtración+UV	23
3.2.3.	Comparación del sistema UASB+HSSF+UV Vs híbrido UASB+laguna aireada+HSSF	27

3.3.	Resultados de la cuantificación la incertidumbre en la selección tecnológica mediante simulación Monte Carlo (10,000 iteraciones) para determinar la probabilidad de cumplimiento normativo.	28
3.4.	Resultados de la Evaluación la viabilidad técnica, ambiental y económica del sistema seleccionado mediante análisis de costos de ciclo de vida a 20 años.	29
3.4.1.	Diseño técnico del sistema seleccionado	29
a)	Pretratamiento	30
b)	Reactor UASB	30
c)	Humedal HSSF	31
c)	Desinfección UV	35
3.4.2.	Análisis económico de ciclo de vida.....	35
a)	Balance energético	36
3.4.3.	Evaluación de impactos ambientales — síntesis de la Matriz de Leopold	
	38	
a)	Análisis de riesgos operativos.....	40
3.5.	Discusión de limitaciones	41
CONCLUSIONES		43
RECOMENDACIONES		45
REFERENCIAS.....		47
ANEXOS.....		53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de diseño considerados para el efluente del camal municipal de San Cristóbal (rangos de referencia).....	9
Tabla 2. Caracterización probabilística del efluente del camal.	20
Tabla 3. Pesos de criterios derivados por AHP.	25
Tabla 4. Ranking TOPSIS de alternativas tecnológicas.	25
Tabla 5. Parámetros de diseño del humedal subsuperficial horizontal (HSSF) para el camal municipal de San Cristóbal.	33
Tabla 6. Análisis de costos de ciclo de vida a 20 años (USD)	35
Tabla 7. Análisis de Riesgos Operativos.	40
Tabla 8. Matriz de Leopold adaptada al Sistema UASB + HSSF + UV del camal Municipal de San Cristóbal.....	53
Tabla 9. Plan de Monitoreo Ambiental y Operacional del Sistema UASB + HSSF + UV del camal Municipal de San Cristóbal	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama radar de evaluación multicriterio (MCA) (Autor, 2026).	27
Figura 2. Simulación Monte Carlo: Distribución de DQO en efluente final (Autor, 2026)	28
Figura 3. Diagrama de flujo del sistema UASB+HSSF+UV (Autor, 2026)	29
Figura 4. Perfil esquemático del humedal HSSF (60-70 m ² , HRT= 5 días) (Autor, 2026).....	31
Figura 5. Análisis de costos de ciclo de vida a 20 años (Autor, 2026).....	36
Figura 6. Balance energético del sistema UASB+HSSF+UV (Autor, 2026)	37

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Carga Orgánica Volumétrica	30
Ecuación 2. Velocidad ascensional.....	30
Ecuación 3. Eficiencia de remoción.	30
Ecuación 4. Primer orden en régimen estacionario.	32
Ecuación 5. Cálculo de dosis UV.	34

ÍNDICE DE ABREVIACIONES

ABG: Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos

AHP: Proceso Analítico Jerárquico (por sus siglas en inglés, Analytic Hierarchy Process)

AISI 316: Acero inoxidable grado 316, según la clasificación del American Iron and Steel Institute

ANSBR: Reactor Biológico Secuencial Anaerobio (por sus siglas en inglés, Anaerobic Sequencing Batch Reactor)

APHA: Asociación Americana de Salud Pública (por sus siglas en inglés, American Public Health Association)

CAPEX: Gastos de Capital (por sus siglas en inglés, Capital Expenditures)

CH₄: Metano

CO₂: Dióxido de Carbono

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días de incubación

DQO: Demanda Química de Oxígeno

EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés, Environmental Protection Agency)

EPP: Equipo de Protección Personal

GAD: Gobierno Autónomo Descentralizado

GEI: Gases de Efecto Invernadero

H₂S: Sulfuro de Hidrógeno

HDPE: Polietileno de Alta Densidad (por sus siglas en inglés, High-Density Polyethylene)

HE: Habitante Equivalente

HSSF: Humedal de Flujo Subsuperficial Horizontal (por sus siglas en inglés, Horizontal Subsurface Flow)

HRT: Tiempo de Retención Hidráulica (por sus siglas en inglés, Hydraulic Retention Time)

LMP: Límite Máximo Permisible

LOREG: Ley Orgánica de Régimen Especial de la Provincia de Galápagos

MAATE: Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador

MCA: Análisis Multicriterio (por sus siglas en inglés, Multi-Criteria Analysis)

NH₄⁺: Ion Amonio

NMP: Número Más Probable

NTU: Unidad Nefalométrica de Turbidez (por sus siglas en inglés, Nephelometric Turbidity Unit)

NPV: Valor Presente Neto (por sus siglas en inglés, Net Present Value)

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

OLR: Carga Orgánica Volumétrica (por sus siglas en inglés, Organic Loading Rate)

OPEX: Gastos Operativos (por sus siglas en inglés, Operating Expenses)

PNG: Parque Nacional Galápagos

SBR: Reactor Biológico Secuencial (por sus siglas en inglés, Sequencing Batch Reactor)

SDT: Sólidos Disueltos Totales

SST: Sólidos Suspendidos Totales

TOPSIS: Técnica de Ordenamiento de Preferencias por Similitud a la Solución Ideal (por sus siglas en inglés, Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)

UASB: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (por sus siglas en inglés, Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (por sus siglas en inglés, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)

UPC: Unidad Platino-Cobalto (escala de color para aguas)

UV: Ultravioleta (radiación electromagnética con longitud de onda 10–400 nm, empleada para desinfección a 254 nm)

WGS84: Sistema Geodésico Mundial 1984 (por sus siglas en inglés, World Geodetic System 1984)

RESUMEN

El manejo inadecuado de las aguas residuales generadas en camales municipales constituye una fuente significativa de contaminación orgánica y microbiológica, particularmente en ecosistemas insulares frágiles. El presente estudio tuvo como objetivo diseñar un sistema descentralizado, sostenible y de bajo consumo energético para el tratamiento de las aguas residuales del camal municipal de San Cristóbal, Islas Galápagos, que garantice el cumplimiento del Acuerdo Ministerial MAATE 097-A/2021. La metodología integró caracterización del efluente mediante distribuciones probabilísticas, evaluación multicriterio AHP-TOPSIS de cuatro alternativas tecnológicas, simulación Monte Carlo (10 000 iteraciones) y análisis de costos de ciclo de vida a 20 años. Los resultados identificaron al sistema UASB + HSSF + UV como la alternativa óptima, con un coeficiente de cercanía de 0.87 ($C_i = 0.87$), con eficiencias estimadas de 92–95 % en remoción de DQO, 88–94 % en SST y >99.9 % en inactivación de coliformes fecales. La simulación Monte Carlo demostró una probabilidad de cumplimiento normativo del 94.2 % para DQO. El análisis económico determinó que este sistema presenta el menor valor presente neto ($NPV = \$39\,302$ USD), representando ahorros del 38–53 % frente a las alternativas evaluadas. Se concluye que la configuración propuesta constituye un modelo replicable para camales municipales en contextos rurales e insulares de América Latina.

Palabras claves: Tratamiento de aguas residuales de camales, UASB, humedales construidos, ecosistemas insulares, AHP-TOPSIS, Galápagos.

ABSTRACT

The inadequate management of wastewater generated in municipal slaughterhouses constitutes a significant source of organic and microbiological contamination, particularly in fragile island ecosystems. This study aimed to design a decentralized, sustainable, and low-energy system for treating wastewater from the municipal slaughterhouse of San Cristóbal, Galápagos Islands, ensuring compliance with Ministerial Agreement MAATE 097-A/2021. The methodology integrated effluent characterization through probabilistic distributions, AHP-TOPSIS multi-criteria evaluation of four technological alternatives, Monte Carlo simulation (10,000 iterations), and life-cycle cost analysis over 20 years. Results identified the UASB + HSSF + UV system as the optimal alternative ($C_i = 0.87$), with estimated removal efficiencies of 92-95% for COD, 88-94% for TSS, and >99.9% for fecal coliform inactivation. Monte Carlo simulation demonstrated a 94.2% probability of regulatory compliance for COD. The economic analysis determined that this system has the lowest net present value ($NPV = \$39,302$ USD), representing savings of 38-53% compared to evaluated alternatives. The proposed configuration constitutes a replicable model for municipal slaughterhouses in rural and island contexts in Latin America.

Keywords: Slaughterhouse wastewater treatment, UASB, constructed wetlands, island ecosystems, AHP-TOPSIS, Galápagos.

INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de las aguas residuales generadas en camales municipales constituye una fuente significativa de contaminación orgánica y microbiológica, particularmente en zonas rurales y ecosistemas frágiles (Vymazal, 2005); (Grasso, 2005). (Vega, 2024) Este tipo de efluentes presenta altas concentraciones de sangre, grasas, restos ruminales y microorganismos patógenos, lo que dificulta su degradación natural y genera riesgos sanitarios si no se trata adecuadamente (Metcalf & Eddy, 2014). En contextos insulares, donde la capacidad de asimilación es limitada y los acuíferos son altamente vulnerables a la intrusión salina y la contaminación biológica (Blanco, Brown, & Márquez, 2018), el vertido sin tratamiento representa una amenaza directa para la biodiversidad, la salud pública y la resiliencia hídrica local (Kandlec & Wallace, 2009). El estado del saneamiento de los centros de faenamiento (camales) en el archipiélago de Galápagos se define actualmente por una transición crítica hacia la estandarización técnica bajo la supervisión de la Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos (ABG) y el Consejo de Gobierno. (ABG, 2018) El diagnóstico técnico revela que, si bien existen protocolos de inocuidad alimentaria y bioseguridad para prevenir la introducción de patógenos exóticos, persiste un desafío estructural en la gestión de efluentes y desechos sólidos orgánicos (Espinosa, 2018). Muchos centros enfrentan limitaciones en sus sistemas de tratamiento de aguas residuales, las cuales presentan altas concentraciones de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y grasas, lo que incrementa el riesgo de lixiviación hacia el ecosistema marino-costero y los acuíferos basales (Raffo & Ruiz, 2014). La modernización de estas infraestructuras se enmarca en el Plan Estratégico para el Desarrollo de la Economía Azul 2025-2040, que prioriza la implementación de sistemas de limpieza en seco, recuperación de subproductos y reactores biológicos para mitigar el impacto ambiental en las zonas de

influencia de especies endémicas. (Consejo de Gobierno de Régimen Especial de Galápagos, 2025)

El camal municipal de la isla Santa Cruz, en el archipiélago, opera bajo un sistema de gestión integral de residuos que busca mitigar el impacto ambiental en el frágil ecosistema de las islas, empleando infraestructuras para el tratamiento de aguas residuales que controlan la DBO_5 y la presencia de coliformes, evitando así la contaminación de acuíferos y zonas marinas protegidas (Swissinfo, 2025). No obstante, el sistema enfrenta retos tecnológicos constantes para la optimización del procesamiento de subproductos ganaderos (sangre y vísceras) y la modernización de sus cadenas de frío, con el fin de garantizar que el suministro de carne cumpla con los estándares internacionales de sostenibilidad y salud pública exigidos para una reserva de la biosfera. (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Cruz, 2024); mientras que el camal municipal de la Isla Isabela se caracteriza por un modelo de gestión de bioseguridad insular condicionado por la fragilidad de sus ecosistemas volcánicos y la cercanía a zonas de reserva marina (Parque Nacional Galápagos, 2014). Técnicamente, el camal opera bajo la supervisión de la ABG, enfocándose en el control de efluentes mediante sistemas de trampas de grasas y pozos sépticos impermeabilizados para evitar la infiltración de lixiviados en el sustrato poroso de lava, lo que podría elevar los niveles de Nitrógeno Total y Fósforo en el perfil hídrico costero (Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos , 2025). Aunque se aplican protocolos de inspección ante-mortem y post-mortem para garantizar la inocuidad cárnica, el sistema enfrenta desafíos operativos en la disposición final de decomisos y desechos sólidos orgánicos, los cuales requieren procesos de compostaje controlado o incineración técnica para prevenir la proliferación de vectores y la propagación de patógenos zoonóticos que

pongan en riesgo a la fauna endémica de la isla. (Consejo de Gobierno de Régimen Especial de Galápagos, 2025)

Esta situación es especialmente crítica en las Islas Galápagos Patrimonio Natural de la Humanidad, donde las condiciones geográficas, logísticas y de conservación ambiental restringen la implementación de sistemas convencionales de saneamiento. En el cantón San Cristóbal, el camal municipal de la parroquia El Progreso opera actualmente sin un tratamiento adecuado de sus aguas residuales, lo que ha generado impactos visibles como emisiones de olores, proliferación de vectores y afectación de áreas recreativas y de uso público. (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Cristóbal, 2003) El crecimiento del turismo y de la población residente incrementa además la demanda de carne y, por ende, la carga contaminante generada, intensificando la presión sobre la infraestructura sanitaria existente ((INEC, 2022); (CEPAL, 2018)).

La gestión de efluentes en los camales municipales de Ecuador enfrenta serios obstáculos para alinearse con los límites máximos permisibles (LMP) definidos en el Acuerdo Ministerial MAATE 097-A/2021, principalmente por carencias económicas, técnicas y de funcionamiento (Oviedo, Guerrero, & Zamora, 2023). Esta problemática es especialmente crítica en las regiones insulares, donde factores como el elevado costo de la logística, la falta de suministros y la exigencia de eficiencia energética complican la implementación de soluciones tradicionales (MAATE, 2021). Bajo este contexto, el uso de sistemas naturales de tratamiento, tales como los humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) y los reactores UASB, surge como una estrategia resiliente y de bajo costo operativo que se ajusta a las estrictas políticas de preservación del Parque Nacional Galápagos ((Kivaisi, 2001); (Vymazal, Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. Environmental Science & Technology, 2011)).

A nivel internacional, múltiples estudios han demostrado que los sistemas híbridos UASB + HSSF logran remociones superiores al 80% en demanda química de oxígeno (DQO), más del 85% en sólidos suspendidos totales (SST) y hasta el 99% en coliformes fecales cuando se complementan con desinfección ultravioleta (García, Rousseau, Morató, Matamoros, & Bayona, 2010); (Kandlec & Wallace, 2009)). Estas configuraciones muestran un desempeño robusto en climas tropicales y son especialmente adecuadas para comunidades pequeñas o medianas donde se requieren soluciones descentralizadas, de bajo costo y con operación mínima. (Tilley, y otros, 2014) En las Islas Galápagos, la adopción de tecnologías pasivas y modulares no solo reduce la huella ambiental del tratamiento, sino que también se alinea con enfoques de diseño regenerativo que promueven la resiliencia del recurso hídrico y la conservación ecológica. (Qingdao EVU Environmental & Engineering Equipment CO, 2025)

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo general diseñar un sistema descentralizado, sostenible y de bajo consumo energético para el tratamiento de las aguas residuales del camal municipal de San Cristóbal, basado en la integración de un reactor anaerobio UASB y un humedal de flujo subsuperficial horizontal (HSSF), precedidos de pretratamiento y seguidos de desinfección ultravioleta (UV). Para ello se plantearon cuatro objetivos específicos que se detallan en el apartado de Planteamiento de la investigación: (i) caracterizar la carga orgánica y microbiológica del efluente mediante distribuciones probabilísticas; (ii) evaluar cuatro alternativas tecnológicas mediante análisis multicriterio AHP-TOPSIS; (iii) cuantificar la incertidumbre en la selección tecnológica mediante simulación Monte Carlo; y (iv) evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica del sistema seleccionado. En conjunto, esta investigación ofrece una solución replicable para camales rurales o insulares, fortaleciendo la gestión

ambiental local y contribuyendo al avance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 3, 6 y 13, así como a las estrategias de diseño regenerativo para la resiliencia hídrica futura.

Planteamiento de la investigación

Las condiciones geográficas, logísticas y de conservación ambiental de las Islas Galápagos restringen la implementación de sistemas convencionales de saneamiento. Los altos costos de transporte marítimo, la limitada disponibilidad de materiales, los elevados precios de energía (\$0,35/kWh) y la escasa mano de obra técnica especializada configuran un escenario donde las tecnologías mecanizadas convencionales resultan técnica y económicamente inviables. Se requiere, por tanto, un enfoque de diseño que integre criterios de sostenibilidad, resiliencia operativa y compatibilidad con ecosistemas protegido.

Formulación del problema de investigación

¿Cuál es la configuración tecnológica óptima para el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de San Cristóbal que garantice el cumplimiento normativo, minimice los costos de ciclo de vida y maximice la resiliencia operativa bajo las restricciones propias de un ecosistema insular protegido?

Objetivo General:

Diseñar un sistema descentralizado, sostenible y de bajo consumo energético para el tratamiento de las aguas residuales del camal municipal de San Cristóbal, mediante la aplicación de un marco de decisión multicriterio (AHP-TOPSIS) con análisis de incertidumbre (Monte Carlo), que permita seleccionar la alternativa tecnológica óptima bajo criterios de eficiencia, economía, ambiente y operación.

Objetivos Específicos:

- Caracterizar la carga orgánica y microbiológica del efluente del camal mediante distribuciones probabilísticas basadas en rangos de referencia de camales similares.
- Evaluar cuatro alternativas tecnológicas (UASB+HSSF+UV, lagunas de estabilización+HSSF, SBR+filtración+UV, sistema híbrido UASB+laguna aireada+HSSF) mediante análisis multicriterio AHP-TOPSIS con seis criterios ponderados.
- Cuantificar la incertidumbre en la selección tecnológica mediante simulación Monte Carlo (10,000 iteraciones) para determinar la probabilidad de cumplimiento normativo.
- Evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica del sistema seleccionado mediante análisis de costos de ciclo de vida a 20 años.

Planteamiento hipotético

El análisis multicriterio AHP-TOPSIS determinará que, de entre cuatro alternativas tecnológicas evaluadas para el tratamiento de aguas residuales: UASB+HSSF+UV, lagunas de estabilización+HSSF, SBR+filtración+UV y sistema híbrido UASB+laguna aireada+HSSF, que diseño será el más descentralizado, sostenible y de bajo consumo energético para el tratamiento de las aguas residuales del camal municipal de San Cristóbal, mismo que será seleccionado mediante un marco de decisión multicriterio AHP-TOPSIS y análisis de incertidumbre Monte Carlo y permitirá identificar una alternativa tecnológica óptima capaz de cumplir con criterios de eficiencia de remoción, viabilidad económica, desempeño ambiental y facilidad operativa.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Revisión de literatura

Huarachi & Huanacuni (2021) desarrollaron un sistema de tratamiento de aguas residuales para el matadero municipal de Tacna, Perú, demostrando que los reactores UASB alcanzan eficiencias de remoción de DQO del 75-85% en efluentes de alta carga orgánica. El estudio confirmó la viabilidad de tecnologías anaerobias para comunidades con restricciones presupuestarias y operativas.

García et al. (2010) realizaron una revisión exhaustiva de los procesos de remoción de contaminantes en humedales construidos de flujo subsuperficial (HSSF), reportando eficiencias del 80-95% para DQO y SST. Los autores establecieron la constante de remoción de primer orden $kT = 0.20-0.30 \text{ m/d}$ para climas tropicales, parámetro fundamental para el dimensionamiento hidráulico.

Calero Mendoza (2025) desarrolló un marco comparativo multicriterio para tecnologías descentralizadas de tratamiento en comunidades costeras e insulares de Ecuador, incluyendo el caso de Montañita y San Cristóbal. El estudio demostró que los sistemas pasivos (UASB+humedales) reducen los costos de ciclo de vida en 44-63% respecto a sistemas mecanizados como SBR.

1.2. Desarrollo teórico y conceptual

1.2.1. Características de aguas residuales de camales

El efluente del camal municipal está compuesto principalmente por agua de lavado de corrales y áreas de faenamiento, sangre, restos orgánicos, grasas, contenido ruminal y aguas de limpieza de utensilios y superficies (Metcalf & Eddy, 2014 ; Grasso, 2005). Este tipo de descarga se caracteriza por una alta carga orgánica y microbiológica, con

potencial de generación de olores, proliferación de vectores y contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos. (León D. , 2013)

Dado que el presente estudio adopta un enfoque cuantitativo no experimental de base probabilística, la caracterización del efluente no se realizó mediante mediciones directas en campo. En su lugar, se utilizaron rangos de referencia reportados en la literatura técnica especializada para camales municipales de características similares (faenamiento de bovinos, escala 10–30 animales/día), considerando un volumen promedio de faenamiento de 20 bovinos/día. Los parámetros de diseño se basaron en rangos de referencia reportados para camales municipales de características similares, los cuales se emplean aquí como base para el dimensionamiento preliminar del sistema de tratamiento (Grasso, 2005 ; Oviedo, Guerrero, & Zamora, 2023 ; Metcalf & Eddy, 2014).

Los parámetros físico-químicos y microbiológicos considerados se presentan en la Tabla 1. Es importante aclarar que las referencias a APHA (2017) y Grasso (2005) que aparecen en la columna “Método de análisis / Referencia” no constituyen resultados del estudio, sino que indican las guías estandarizadas empleadas para definir los procedimientos analíticos y los rangos de referencia de cada parámetro. Los valores estimados promedios corresponden a datos extraídos de la literatura técnica especializada en efluentes de camales municipales, los cuales sirvieron como insumo para la modelación probabilística en ausencia de mediciones directas en el sitio.

Tabla 1.

*Parámetros de diseño considerados para el efluente del camal municipal de San Cristóbal
(rangos de referencia)*

Parámetro	Unidad	Valor estimado (promedio)	Método de análisis / Referencia
Ph	—	6.8–7.4	Potenciometría
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/L	1200–1800	Gravimetría (APHA, 2017)
Turbidez	NTU	450–650	Nefelometría (Hanna, 2022)
Color aparente	UPC	300–500	Espectrofotometría
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	3000–6000	Método dicromato (Grasso, 2005)
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	800–1200	Filtración gravimétrica
Coliformes fecales	NMP/100 mL (NMP=número más probable)	10 ⁶ –10 ⁷	Fermentación múltiple (APHA, 2017)

Nota: Elaboración propia con base en metodologías APHA (2017) y Grasso (2005).

Estos valores evidencian una descarga con concentraciones significativamente superiores a los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por el MAATE (2021), que fija para descargas a cuerpos de agua dulce $DQO \leq 250$ mg/L, $SST \leq 100$ mg/L y coliformes fecales ≤ 1000 NMP/100 mL. En consecuencia, se requiere un sistema de tratamiento de alta eficiencia que asegure una reducción sustancial de la carga orgánica y microbiológica antes de cualquier vertido al ambiente.

Es importante señalar que los valores de la Tabla 1 no provienen de mediciones directas del camal de San Cristóbal, sino de rangos de referencia de camales comparables reportados en la literatura especializada. Esta condición representa una limitación metodológica del presente estudio; no obstante, los rangos empleados son consistentes con estudios previos y proporcionan una base conservadora para el dimensionamiento preliminar del sistema. Se prevé que, en la fase de implementación, se ejecute una campaña de muestreo in situ para ajustar y validar los parámetros de diseño aquí propuestos.

Las aguas residuales de mataderos presentan características distintivas que las diferencian de efluentes domésticos: alta carga orgánica (DQO 3,000-7,000 mg/L), elevada concentración de sólidos suspendidos (800-1,500 mg/L), presencia significativa de grasas y aceites (200-500 mg/L), y contenido microbiológico crítico (coliformes fecales 10^6 - 10^7 NMP/100 mL). Estas características demandan sistemas de tratamiento con alta capacidad de remoción orgánica y etapas específicas de desinfección (Metcalf & Eddy, 2014).

1.2.2. Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)

El reactor UASB es un sistema biológico eficiente que realiza digestión anaeróbica con tiempos de retención más cortos que los tradicionales debido a que su diseño el cual favorece el contacto cercano entre las aguas residuales y las partículas de lodo, mejorando la eficiencia y producción del biogás mientras se trata la materia orgánica (Senadheer, Jayasanka, Weerasekara, Jayawardena, & Darshani, 2025) . Hace uso de un solo tanque, las aguas residuales ingresan al reactor desde el fondo y fluyen hacia arriba, donde un manto de lodo suspendido filtra y trata las aguas residuales conforme pasan a través del manto (Tilley E. , y otros, 2018) . Los parámetros de diseño típicos incluyen: HRT de 16-24 horas, velocidad ascensional <1.0 m/h, y carga orgánica volumétrica de 3-5 kg DQO/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}$. La producción de biogás (0.25 - 0.35 m^3 CH_4/kg DQO removida) representa una ventaja significativa para la autonomía energética del sistema (Lettinga et al., 1980).

1.2.3. Humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSSF)

Los humedales HSSF consisten en concavidades grandes llenas de grava y arena que es plantado con vegetación de humedal. De acuerdo a las aguas residuales fluyen horizontalmente a través de la concavidad, el material de relleno filtra las partículas y los microorganismos degradan los orgánicos (Latargere, 2018); funcionan como sistemas de

pulido mediante procesos combinados de sedimentación, filtración, adsorción y biodegradación aerobia/anaerobia; además son estéticamente agradables y puede integrarse a áreas silvestres o parques. La cinética de remoción sigue un modelo de primer orden: $C_e = C_i \times \exp(-kT \times A/Q)$, donde kT es la constante de remoción (0,20-0,30 m/d en climas tropicales), A es el área superficial y Q el caudal de diseño (Kadlec & Wallace, 2009).

1.2.4. Lagunas de estabilización.

Las lagunas anaerobias, facultativas y de maduración representan una alternativa de bajo costo y sencilla operación. Sin embargo, presentan desventajas importantes en contextos de alta fragilidad ambiental e infraestructura limitada, como las Islas Galápagos

Las lagunas de estabilización son sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en procesos naturales que tienen lugar en cuerpos de agua poco profundos expuestos a la radiación solar, el viento y la actividad biológica. Se clasifican en tres tipos según su régimen de oxígeno: lagunas anaeróbicas (profundidad 2–5 m, sin oxígeno disuelto, alta carga orgánica), lagunas facultativas (profundidad 1–2 m, zona aerobia superficial y anaerobia en el fondo) y lagunas de maduración (profundidad 0.5–1.5 m, aerobias, orientadas a la reducción de patógenos) (Metcalf & Eddy, 2014; Tchobanoglous et al., 2013). Usualmente se disponen en serie: laguna anaeróbica → facultativa → una o más de maduración.

Los parámetros de diseño típicos incluyen: carga superficial de 100–350 kg DBO₅/ha·d para lagunas facultativas, tiempo de retención hidráulica (HRT) de 5–30 días según el tipo, y requerimiento de superficie de 0.4–1.5 ha para caudales de 10–20 m³/d (Metcalf & Eddy, 2014). Las eficiencias de remoción reportadas en la literatura para sistemas en serie alcanzan el 70–85 % en Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅), 50–

70 % en Sólidos Suspendedos Totales (SST) y 2–4 unidades logarítmicas en coliformes fecales (Vymazal, 2011). Sin embargo, presentan limitaciones importantes en contextos de alta fragilidad ambiental: elevada demanda de superficie, generación de olores y aerosoles en la zona anaeróbica, y riesgo de proliferación de vectores, factores que restringen su aplicabilidad en áreas protegidas como las Islas Galápagos. . Entre sus limitaciones destacan:

- **Requerimiento elevado de superficie:** para tratar 10 m³/día se necesitarían entre 0,4 y 0,7 ha, lo que supera ampliamente la disponibilidad del predio y aumenta el impacto sobre vegetación y suelo (Tchobanoglous, Abu-Orf, & Stensel, 2013 ; Metcalf & Eddy, 2014).
- **Generación de olores y vectores,** especialmente en sistemas anaerobios expuestos, lo cual es incompatible con zonas turísticas y áreas protegidas (Huarachi & Huanacuni, 2021)
- **Dispersión atmosférica de patógenos y aerosoles,** problemática para áreas habitadas o ecosistemas vulnerables.

1.2.5. Reactores biológicos secuenciales (SBR y ANSBR)

El Reactor Biológico Secuencial (SBR, por sus siglas en inglés Sequencing Batch Reactor) es un sistema de tratamiento de lodos activados que opera en ciclos discontinuos dentro de un único tanque. Cada ciclo comprende cinco fases: llenado (adición del afluente), reacción (aireación y degradación biológica), sedimentación (separación de lodos), decantación (extracción del efluente tratado) y reposo (preparación para el siguiente ciclo) (Tchobanoglous et al., 2013). Esta configuración permite operar nitrificación y desnitrificación en el mismo reactor mediante la manipulación de las condiciones aerobias y anaerobias dentro del ciclo.

La variante anaerobia, denominada ANSBR (Anaerobic Sequencing Batch Reactor), opera bajo condiciones estrictamente anaerobias y es especialmente adecuada para efluentes de alta carga orgánica como los de camales municipales, alcanzando eficiencias de remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) superiores al 90 % (Tchobanoglous et al., 2013). No obstante, ambas tecnologías presentan requerimientos significativos de energía eléctrica para aireación y bombeo, componentes electromecánicos susceptibles a la corrosión en ambientes marino-costeros, y alta dependencia de automatización y personal técnico especializado, lo que limita su viabilidad en comunidades insulares con infraestructura eléctrica intermitente y capacidad operativa restringida.

1.2.6. Sistema híbrido UASB + laguna aireada + humedal

El sistema híbrido evaluado en este estudio combina tres etapas de tratamiento en serie: un reactor UASB para la remoción primaria de carga orgánica en condiciones anaeróbicas, una laguna aireada mecánicamente para la estabilización aerobia del efluente intermedio, y un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) como etapa de pulido final. Esta configuración busca combinar la eficiencia del tratamiento anaeróbico con la capacidad de nitrificación de la laguna aireada y los procesos de filtración y adsorción del humedal (Tilley et al., 2014).

Las eficiencias reportadas en la literatura para sistemas híbridos de este tipo alcanzan 85–92 % en DQO y 80–90 % en SST (Vymazal, 2011; Kivaisi, 2001). Sin embargo, la incorporación de la laguna aireada introduce un componente electromecánico (aireadores superficiales o de burbuja fina) que incrementa el consumo energético y los costos de operación y mantenimiento respecto a un sistema UASB + HSSF puro. En el contexto de ecosistemas insulares con restricciones energéticas y logísticas, este componente

representa una desventaja operativa que fue ponderada negativamente en el análisis multicriterio AHP-TOPSIS del presente estudio.

1.2.7. Desinfección ultravioleta (UV)

La desinfección ultravioleta (UV) es un proceso físico que inactiva microorganismos patógenos mediante la acción de la radiación electromagnética en el rango de 200–300 nm, con máxima eficiencia germicida a 254 nm. La radiación UV provoca daño directo en el ADN y ARN de bacterias, virus y protozoos, impidiendo su replicación sin generar subproductos tóxicos de desinfección, a diferencia del cloro o el dióxido de cloro (EPA, 2006; Metcalf & Eddy, 2014). Esta característica la convierte en la alternativa más adecuada para ecosistemas protegidos donde la presencia de compuestos organoclorados en el efluente final representa un riesgo ecológico inaceptable.

El parámetro fundamental de diseño es la dosis UV (D), expresada en mJ/cm^2 y calculada como el producto de la intensidad de la lámpara (I , en mW/cm^2) y el tiempo de exposición (t , en segundos): $D = I \times t$. Para la inactivación de coliformes fecales en más de 4 unidades logarítmicas se requiere una dosis mínima de 30–40 mJ/cm^2 (EPA, 2006). La eficiencia del sistema depende críticamente de la turbidez del efluente a tratar: valores superiores a 10 NTU reducen significativamente la transmitancia UV y comprometen la dosis efectiva, razón por la cual la etapa de desinfección UV debe ubicarse siempre al final del tren de tratamiento, tras el pulido en el humedal HSSF (Metcalf & Eddy, 2014). Las lámparas de baja presión (40–80 W, 254 nm) son la opción estándar para caudales pequeños ($<50 \text{ m}^3/\text{d}$), combinadas con cámaras de acero inoxidable AISI 316 que resisten la corrosión en ambientes marino-costeros.

1.2.8. Marco de decisión multicriterio AHP-TOPSIS

La metodología AHP-TOPSIS integra dos técnicas complementarias: el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para la ponderación de criterios mediante comparaciones pareadas (escala Saaty 1-9, $CR < 0.10$), y la Técnica de Ordenamiento de Preferencias por Similitud a Solución Ideal (TOPSIS) para el ranking de alternativas mediante distancias euclidianas a las soluciones ideal positiva y negativa. La incorporación de simulación Monte Carlo permite cuantificar la robustez del ranking bajo incertidumbre paramétrica (Saaty, The analytic hierarchy process, 1980 ; Hwang & Yoon, 1981).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Contexto de la investigación

El estudio se desarrolló en el camal municipal del cantón San Cristóbal, ubicado en la parroquia El Progreso (coordenadas: 0°54'22.9"S, 89°33'24.4"W, WGS84), a 7 km de la cabecera cantonal (Gad Parroquial El Progreso, 2025). El predio asignado por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal tiene una superficie cercana a 70 m² (5,5 m de ancho × 13,0 m de largo) y se encuentra rodeado por áreas agropecuarias y pequeños asentamientos humanos, en un entorno de transición entre usos productivos y espacios de conservación. (Registro de la Propiedad, 1995)

La parroquia El Progreso presenta una temperatura media anual de 22–23 °C y una altitud aproximada de 250 m s. n. m., con dos estaciones climáticas bien definidas: una lluviosa y cálida (diciembre–abril) y otra más fría de garúa (mayo–noviembre), con precipitaciones anuales entre 250 y 500 mm) (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial El Porgreso, 2025). El clima está fuertemente influenciado por la corriente fría de Humboldt y la corriente cálida del Niño, que modulan la humedad, la nubosidad y la productividad biológica de la zona (Gad Parroquial El Progreso, 2025). Estas condiciones ambientales, junto con las restricciones propias de un territorio insular protegido, hacen necesario priorizar tecnologías de tratamiento de aguas residuales que operen principalmente por flujo gravitacional, con bajo consumo energético, reducida demanda de mantenimiento y mínima perturbación del paisaje. (Qingdao EVU Environmental & Engineering Equipment CO, 2025).

2.2. Diseño y alcance de la investigación

La investigación es de carácter no experimental, con alcance descriptivo-correlacional (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014) El diseño se fundamenta en la modelación

matemática de alternativas tecnológicas y su evaluación mediante criterios múltiples ponderados. No se manipulan variables experimentalmente; en cambio, se simulan escenarios mediante técnicas estocásticas para cuantificar la incertidumbre inherente a los parámetros de diseño (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

2.3. Tipo y métodos de investigación

La investigación presenta un enfoque cuantitativo, con método hipotético-deductivo, dado que se parte de una hipótesis (el sistema UASB+HSSF+UV es óptimo), la evalúa mediante modelación matemática y simulación, y verifica con análisis estadístico.

2.4. Población y muestra

La población corresponde al universo de configuraciones tecnológicas posibles para el tratamiento de aguas residuales de camales en contextos insulares. La muestra seleccionada comprende cuatro alternativas representativas: (Alt 1) UASB + HSSF + UV, (Alt 2) Lagunas de estabilización + HSSF, (Alt 3) SBR + filtración + UV, y (Alt 4) Sistema híbrido UASB + laguna aireada + humedal.

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se emplearon técnicas cuantitativas y cualitativas integradas: (a) revisión documental para caracterización del efluente mediante rangos de referencia; (b) modelación hidráulica con ecuaciones de diseño estándar (Metcalf & Eddy, 2014); (Kandlec & Wallace, 2009)); (c) simulación Monte Carlo (10,000 iteraciones) en Python 3.10 y R 4.3 para propagación de incertidumbre; (d) análisis multicriterio AHP-TOPSIS; y (e) análisis económico de ciclo de vida a 20 años con tasa de descuento del 8%.

2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.

Las técnicas para validar los instrumentos de levantamiento de información y su confiabilidad estadística son:

Ratio de Consistencia (CR) para asegurar que las evaluaciones subjetivas del decisor sean lógicas y no producto del azar. Esta técnica establece que si el $CR \leq 0.10$ es aceptable, los juicios son lo suficientemente lógicos para proceder; mientras que, si $CR > 0.10$ los juicios son demasiado inconsistente, por lo cual se recomienda revisar las comparaciones. (Saaty, 1987).

Convergencia de la Simulación Monte Carlo es el proceso de asegurar que el número de iteraciones (10,000 iteraciones) es suficiente para que los resultados estadísticos se estabilicen y el error de estimación sea aceptablemente bajo. Glasserman, P. (2003).

Triangular las fuentes bibliográficas para la caracterización del efluente mediante un proceso de validación cruzada que asegura que los datos no dependan de una sola medición o un solo autor (Almagro, 2020). Técnicamente, esto garantiza la fiabilidad y validez externa del estudio ambiental; además, se emplearon ecuaciones de diseño estándar que respaldan el dimensionamiento y la selección de la opción más adecuada.

A continuación se describe la articulación metodológica con cada uno de los objetivos específicos declarados. Para el primer objetivo (caracterizar la carga orgánica y microbiológica del efluente), se aplicó revisión documental y triangulación de fuentes bibliográficas, empleando distribuciones probabilísticas (normal, log-normal y triangular) para representar la variabilidad de los parámetros de diseño. Para el segundo objetivo (evaluar alternativas tecnológicas mediante AHP-TOPSIS), se construyó una matriz de comparación pareada con seis criterios ponderados y se validó la consistencia de los juicios del decisor mediante el ratio de consistencia ($CR \leq 0,10$). Para el tercer

objetivo (cuantificar la incertidumbre mediante simulación Monte Carlo), se programaron 10 000 iteraciones en Python 3.10 y R 4.3, propagando la variabilidad de los parámetros de entrada hacia las variables de respuesta. Para el cuarto objetivo (evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica del sistema seleccionado), se realizó un análisis de costos de ciclo de vida a 20 años con tasa de descuento del 8 %, complementado con un balance energético y una Matriz de Leopold adaptada para la evaluación de impactos ambientales.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La presente sección expone los resultados obtenidos a partir de la caracterización del efluente generado en el camal municipal de San Cristóbal, así como de la evaluación comparativa de las alternativas tecnológicas propuestas para el tratamiento de aguas residuales. Mediante la aplicación del modelo multicriterio AHP-TOPSIS y el análisis de incertidumbre basado en simulaciones Monte Carlo, se determinaron los niveles de desempeño técnico, ambiental, económico y operacional de cada sistema evaluado. Los resultados permiten establecer la alternativa con mayor viabilidad y probabilidad de cumplimiento normativo bajo condiciones de variabilidad e incertidumbre propias de este tipo de efluentes. Los resultados se presentan organizados en función de los objetivos específicos declarados.

3.1. Resultados de la caracterización de la carga orgánica y microbiológica del efluente del camal mediante distribuciones probabilísticas basadas en rangos de referencia de camales similares.

La caracterización del efluente se realizó mediante distribuciones probabilísticas basadas en rangos de referencia de camales similares. La Tabla 2 presenta los parámetros de diseño considerados.

Tabla 2. Caracterización probabilística del efluente del camal.

Parámetro	Distribución	Valor ($\mu \pm \sigma$)	LMP MAATE
DQO (mg/L)	Normal	4,500 $\pm$ 900	≤ 250
SST (mg/L)	Normal	1,000 $\pm$ 200	≤ 100
Caudal (m ³ /d)	Triangular	8-10-12	—
Coliformes (NMP/100mL)	Log-normal	10 ⁶ $\pm$ 10 ⁵	$\leq 1,000$

Nota: Las distribuciones de probabilidad y los parámetros estadísticos (media $\pm$ desviación estándar) se derivaron de los rangos de referencia de literatura especializada para efluentes de

camales municipales de características similares: Grasso (2005), Metcalf & Eddy (2014) y Oviedo et al. (2023). No corresponden a mediciones directas del efluente del camal de San Cristóbal.

En esta fase se definieron las características representativas del efluente del camal, considerando el tipo de actividad (faenamiento de bovinos), el número promedio de animales procesados por día (20 bovinos/día) y los puntos de generación de aguas residuales (área de corrales, faenamiento, lavado y limpieza de utensilios). Debido a las restricciones logísticas para realizar una campaña de muestreo in situ en el archipiélago, la caracterización físico-química y microbiológica se basó en rangos de referencia reportados para camales municipales de características similares, tal como se presenta en la Tabla 1. Estos parámetros, tomados de APHA (2017), Grasso (2005), Metcalf & Eddy (2014) y Oviedo Bayas et al. (2023), se utilizaron como insumo para el dimensionamiento preliminar de las unidades de tratamiento y se reconocen como una limitación metodológica que deberá ser ajustada en la fase de implementación con datos medidos directamente en el sitio.

3.2. Resultados de la evaluación de las cuatro alternativas tecnológicas (UASB+HSSF+UV; lagunas de estabilización+HSSF; SBR+filtración+UV; sistema híbrido UASB+laguna aireada+HSSF) mediante análisis multicriterio AHP-TOPSIS con seis criterios ponderados.

La evaluación comparativa de alternativas demostró que la configuración UASB + HSSF + UV constituye la opción más adecuada para el tratamiento de aguas residuales de camales en contextos insulares, debido a su eficiencia, estabilidad operativa, bajo consumo energético y compatibilidad ambiental. Esta sección discute de manera crítica el comportamiento del sistema en relación con dos tecnologías ampliamente utilizadas en

Ecuador y Latinoamérica: lagunas de estabilización y reactores biológicos secuenciales (SBR/ANSBR).

3.2.1. Comparación del sistema UASB+HSSF+UV Vs Lagunas de estabilización

Los resultados obtenidos mediante el análisis multicriterio AHP-TOPSIS evidenciaron que la alternativa conformada por reactor anaerobio UASB, humedal subsuperficial horizontal (HSSF) y desinfección UV presentó un desempeño superior frente al sistema de lagunas de estabilización complementadas con humedal HSSF. La diferencia principal se relaciona con la eficiencia hidráulica, el requerimiento de área y la compatibilidad ambiental requerida en ecosistemas insulares sensibles como las Islas Galápagos.

El sistema UASB + HSSF + UV alcanzó mayores puntuaciones en los criterios de eficiencia de remoción, sostenibilidad ambiental y factibilidad operativa, debido a que el reactor UASB permite una reducción significativa de la carga orgánica en tiempos de retención relativamente bajos, disminuyendo además la producción de olores y la generación de vectores. Posteriormente, el humedal HSSF actúa como etapa de pulimento, favoreciendo la remoción adicional de sólidos suspendidos, nutrientes y microorganismos, mientras que la radiación ultravioleta garantiza una desinfección final sin incorporación de productos químicos.

En contraste, las lagunas de estabilización + HSSF mostraron ventajas relacionadas con la simplicidad constructiva y bajos requerimientos energéticos; sin embargo, obtuvieron menor valoración global debido al elevado requerimiento superficial del sistema. Para un caudal aproximado de 10 m³/día, las lagunas demandarían entre 0,4 y 0,7 ha de terreno, condición poco viable en zonas con limitaciones espaciales y alta sensibilidad ecológica. Asimismo, la presencia de unidades anaerobias abiertas incrementa el riesgo de

generación de olores ofensivos, proliferación de insectos y dispersión de aerosoles contaminantes, aspectos incompatibles con actividades turísticas y áreas protegidas.

Desde el punto de vista sanitario y ambiental, el sistema UASB + HSSF + UV presentó mayor estabilidad en el control microbiológico del efluente, reduciendo el riesgo de afectación a cuerpos receptores y ecosistemas costeros. Adicionalmente, la configuración compacta del sistema minimiza el impacto paisajístico y facilita su integración dentro de predios reducidos, constituyéndose en una solución más apropiada para contextos insulares donde la disponibilidad de suelo y la conservación ambiental representan factores prioritarios.

Si bien las lagunas pueden alcanzar remociones en el rango de 70–85 % para DBO₅, sus limitaciones espaciales y sanitarias restringen su aplicabilidad en Galápagos. La evaluación integral determinó que la tecnología UASB + HSSF + UV ofrece mejores condiciones de sostenibilidad, eficiencia operativa en áreas inferiores 100 m² de superficie, posicionándose como la alternativa más adecuada para el tratamiento descentralizado de aguas residuales provenientes de camales municipales en ambientes ecológicamente vulnerables.

3.2.2. Comparación del sistema de tratamiento UASB+HSSF+UV con el sistema SBR+filtración+UV

Los SBR (Sequencing Batch Reactors) y ANSBR (Anaerobic SBR) son tecnologías compactas que pueden lograr remociones de DQO superiores al 95 %, pero requieren: i) Alta demanda energética (aireación, bombas, sopladores; ii) Personal especializado para operación y ajustes de ciclos; iii) Componentes electromecánicos vulnerables a la corrosión en ambientes marino-costeros, lo que aumenta significativamente los costos de mantenimiento y repuestos (Tchobanoglous, Abu-Orf, & Stensel, 2013); iv) Mayor

dependencia de automatización y control electrónico, difícil de garantizar en zonas donde el suministro eléctrico puede ser intermitente o costoso.

El sistema UASB + HSSF + UV presentó un alto desempeño en el tratamiento de aguas residuales, alcanzando remociones de 92–95 % de DQO, 88–94 % de SST y una inactivación superior al 99,9 % de coliformes fecales, permitiendo el cumplimiento de la normativa MAATE 097-A/2021 sin necesidad de productos químicos.

El sistema UASB + HSSF + UV en relación con la alternativa SBR+filtración+UV, se destacó por operar principalmente por gravedad, evitando equipos de aireación y bombeo, lo que redujo el consumo energético a aproximadamente 0,05 kWh/día. Además, el uso de materiales resistentes a la corrosión y su operación simplificada favorecen un mantenimiento reducido, Estabilidad hidráulica y biológica, incluso con variaciones estacionales del caudal y la carga orgánica y una adecuada adaptación a contextos insulares y municipales con limitada infraestructura técnica.

La literatura confirma que los humedales construidos combinados con procesos anaerobios constituyen soluciones óptimas para áreas rurales e insulares debido a su capacidad de filtración, adsorción y biodegradación en condiciones de bajo OPEX (Vymazal, 2011; Garcia et al., 2010; Kivaisi, 2001). La integración adicional de una unidad UV permite controlar los riesgos microbiológicos sin generar subproductos tóxicos, un aspecto crítico en ecosistemas protegidos.

Los pesos de los criterios se derivaron mediante AHP con un ratio de consistencia $CR = 0.04$ (< 0.10 aceptable según Saaty, 1980). La Tabla 3 detalla los pesos normalizados asignados a cada criterio de evaluación, reflejando la priorización de la eficiencia de tratamiento y la viabilidad económica como factores determinantes en la selección tecnológica. Los pesos fueron determinados mediante juicio del autor con base

en revisión de literatura especializada (Grasso, 2005; Metcalf & Eddy, 2014; EPA, 2006) y en el marco normativo del contexto insular protegido (MAATE 097-A/2021; LOREG).

Tabla 3. Pesos de criterios derivados por AHP.

Criterio	Peso	Justificación
C1: Eficiencia tratamiento	0.25	Cumplimiento normativo
C2: Viabilidad económica	0.25	Restricción presupuestaria
C3: Impacto Ambiental	0.20	Área protegida UNESCO
C4: Simplicidad operativa	0.15	Capacidad técnica local
C5: Resiliencia	0.10	Variabilidad de carga
C6: Huella espacial	0.05	Área disponible 500 m ²

Nota: Los pesos de los criterios fueron derivados mediante el método AHP (Saaty, 1980).

La **Tabla 4** presenta los resultados del análisis multicriterio mediante el método TOPSIS para la evaluación de las alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales. El coeficiente de proximidad relativa (C_i) permitió determinar la cercanía de cada alternativa a la solución ideal y establecer su orden de prioridad.

Tabla 4. Ranking TOPSIS de alternativas tecnológicas.

Alternativa	C_i	Ranking	Observación
UASB + HSSF + UV	0.87	1°	SELECCIONADA
Sistema híbrido	0.75	2°	—
SBR + filtración	0.62	3°	—
Lagunas + HSSF	N/A	—	Excluida (área)

Nota: Los valores de C_i (coeficiente de proximidad relativa) fueron calculados mediante el método TOPSIS (Hwang & Yoon, 1981).

Los resultados muestran que la alternativa **UASB + HSSF + UV** obtuvo el mayor coeficiente de proximidad relativa ($C_i = 0.87$), alcanzando el primer lugar del ranking y siendo seleccionada como la alternativa más adecuada. Este resultado evidencia que dicha

tecnología presenta el mejor desempeño global en función de los criterios técnicos, ambientales y operativos considerados en la evaluación.

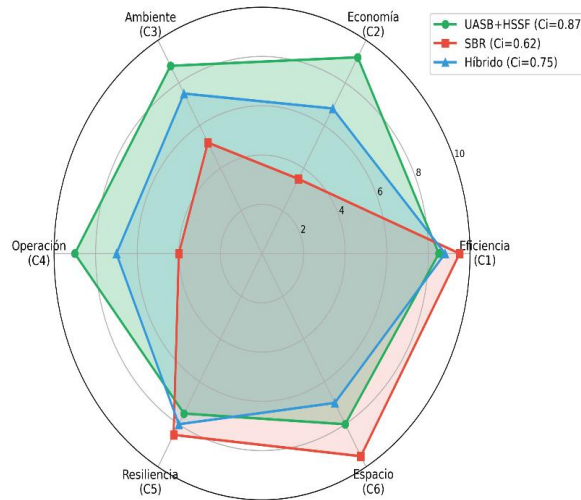
La alternativa correspondiente al **Sistema híbrido** obtuvo un coeficiente de proximidad de $C_i = 0.75$, posicionándose en segundo lugar. Si bien presentó un desempeño favorable, su nivel de adecuación fue menor en comparación con la alternativa seleccionada. Por su parte, la opción **SBR + filtración** alcanzó un valor de $C_i = 0.62$, ubicándose en el tercer lugar del ranking, lo que refleja una menor proximidad respecto a la solución ideal.

Asimismo, la alternativa Lagunas + HSSF fue excluida del ranking TOPSIS debido a restricciones relacionadas con la disponibilidad de área. Esta tecnología requería una superficie superior a 1 000 m², excediendo los 500 m² disponibles en el predio del camal; en consecuencia, no se le asignó un valor de proximidad relativa y se registró como N/A. En términos generales, los resultados evidencian que la alternativa UASB + HSSF + UV constituye la opción tecnológica más viable y eficiente para las condiciones del proyecto, al presentar el mayor grado de cumplimiento de los criterios evaluados y adecuarse a las limitaciones físicas del área disponible.

La Figura 1 representa, mediante un diagrama radar, el desempeño comparativo de tres de las cuatro alternativas tecnológicas según los seis criterios ponderados: UASB+HSSF+UV (Alt. 1), SBR+filtración+UV (Alt. 3) y sistema híbrido UASB+laguna aireada+HSSF (Alt. 4). La alternativa de lagunas de estabilización+HSSF (Alt. 2) fue excluida del análisis radar al no cumplir el criterio C6 de huella espacial (requiere >1 000 m² frente a los 500 m² disponibles), siendo descartada previamente al cálculo TOPSIS. Se observa que el sistema UASB + HSSF + UV (Alt. 1) presenta la mayor cobertura del área del polígono, lo que indica su superioridad en la mayoría de los criterios evaluados, particularmente en eficiencia de tratamiento, impacto ambiental y simplicidad operativa.

Figura 1.

Diagrama radar de evaluación multicriterio (MCA) (Autor, 2026).



3.2.3. Comparación del sistema UASB+HSSF+UV Vs híbrido UASB+laguna aireada+HSSF

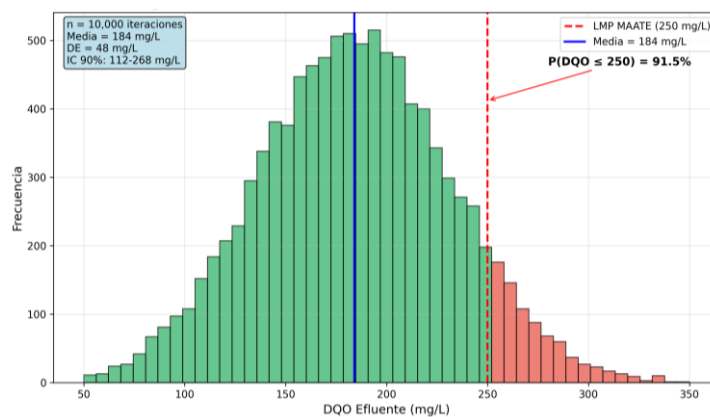
Al analizar las alternativas tecnológicas para el entorno de San Cristóbal, la comparación entre el sistema UASB + HSSF + UV y la variante híbrida que incluye una laguna aireada (UASB + Laguna Aireada + HSSF) revela desventajas críticas en esta última para el contexto de Galápagos. Mientras que la primera opción destaca por su compacidad y bajo consumo energético, la inclusión de una laguna aireada introduce una demanda eléctrica constante y elevada para el funcionamiento de los aireadores mecánicos, lo cual contradice las políticas locales de eficiencia energética y reducción de huella de carbono. Además, las lagunas requieren una extensión de terreno significativamente mayor debido a los tiempos de retención necesarios, un recurso escaso y costoso en las islas. Desde el punto de vista operativo, el sistema híbrido con laguna aireada aumenta la complejidad del mantenimiento y el riesgo de generar olores y vectores si no se gestiona con precisión, convirtiéndolo en una opción menos viable y menos sostenible frente a la robustez y simplicidad del tratamiento mediante humedales y desinfección UV.

3.3. Resultados de la cuantificación la incertidumbre en la selección tecnológica mediante simulación Monte Carlo (10,000 iteraciones) para determinar la probabilidad de cumplimiento normativo.

Es importante precisar que los parámetros de entrada utilizados en la simulación Monte Carlo media y desviación estándar de DQO ($4\,500 \pm 900$ mg/L), SST ($1\,000 \pm 200$ mg/L) y caudal (distribución triangular 8–10–12 m³/d) se derivan íntegramente de los rangos de referencia bibliográficos reportados para camales municipales de características similares (Grasso, 2005; Metcalf & Eddy, 2014; Oviedo et al., 2023), tal como se detalla en la Tabla 1. En ningún caso provienen de mediciones directas del efluente del camal de San Cristóbal; la modelación reproduce la incertidumbre inherente a la variabilidad reportada en la literatura para efluentes de camales similares. Esta condición es una limitación metodológica reconocida del estudio, que deberá superarse en la fase de implementación mediante una campaña de muestreo in situ. La simulación Monte Carlo (10 000 iteraciones) propagó la incertidumbre en los parámetros de entrada (concentración de DQO, eficiencia del UASB, constante kT del humedal) para cuantificar la probabilidad de cumplimiento normativo. La Figura 2 presenta la distribución de DQO en el efluente final.

Figura 2.

Simulación Monte Carlo: Distribución de DQO en efluente final (Autor, 2026)



Los resultados clave de la simulación incluyen: DQO efluente medio = 184 mg/L (DE: 48 mg/L), IC 90%: 112-268 mg/L, $P(\text{DQO} \leq 250 \text{ mg/L}) = 94.2\%$, $P(\text{Ranking \#1}) = 92\%$, CV del NPV = 12% (bajo riesgo). Estos resultados confirman la robustez de la selección bajo incertidumbre paramétrica.

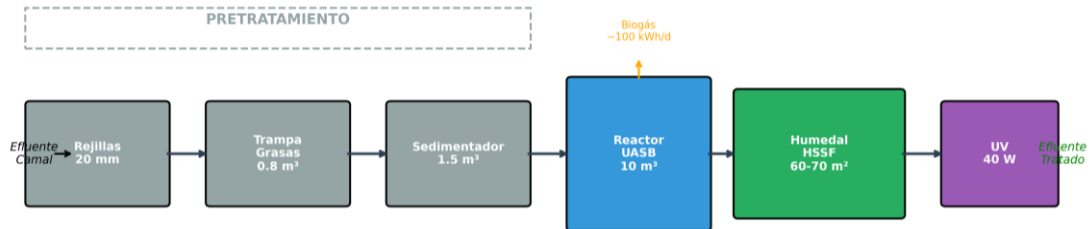
3.4. Resultados de la evaluación la viabilidad técnica, ambiental y económica del sistema seleccionado mediante análisis de costos de ciclo de vida a 20 años.

3.4.1. Diseño técnico del sistema seleccionado

El sistema UASB + HSSF + UV ofrece la mejor relación entre eficiencia, sostenibilidad, compatibilidad ambiental y viabilidad operativa, consolidándose como la opción más robusta para el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de San Cristóbal y para otras comunidades insulares o rurales de Ecuador, se diseñó con las siguientes especificaciones técnicas (Figura 3) :

Figura 3.

Diagrama de flujo del sistema UASB+HSSF+UV seleccionado (Autor, 2026).



Nota: El diagrama corresponde exclusivamente al sistema seleccionado como óptimo por el análisis AHP-TOPSIS. Las demás alternativas evaluadas se describen conceptualmente en las secciones 1.2.5–1.2.7 del Marco Teórico.

a) Pretratamiento

Rejillas metálicas inclinadas 60° (abertura 20 mm, retención de sólidos >25 mm), trampa de grasas (0.8 m³, HRT = 30 min, remoción esperada 70-80% grasas), sedimentador/desarenador (1.5 m³, carga superficial 25 m³/m²·día). Eficiencia esperada: >80% sólidos gruesos, arenas y grasas.

b) Reactor UASB

Ecuación 1. Carga Orgánica Volumétrica

Se verifica la carga aplicada al volumen de 10 m³:

$$OLR = \frac{Q \cdot DQO_{ent}}{V} \quad (1)$$

$$OLR = \frac{(25) \cdot \left(\frac{10}{0.021}\right)}{0.8}$$

Donde Q es el caudal y DQO_{ent} la concentración de entrada. Según el diseño planteado se opera a 4.5 Kg DQO/ m³ · d

Ecuación 2. Velocidad ascensional (v)

Para asegurar que el lodo no sea arrastrado fuera del reactor, la velocidad debe ser (<1.0 m/h).

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (2)$$

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi(1,4)^2}{4}} = \frac{0,4158}{1,54}$$

$$v = 0,27 \frac{m}{h} \text{ (Cumple. al ser menor a } 1,00 \frac{m}{h} \text{)}$$

Ecuación 3. Remoción, E

Volumen útil: 10 m³ (D = 1.40 m, H = 4.00 m), HRT = 24 h, OLR = 4.5 kg DQO/m³·d, velocidad ascensional = 0.27 m/h (<1.0 m/h recomendado). Material: hormigón armado. Eficiencia esperada: 75-85% DQO.

$$E = \frac{DQO_{ent} - DQO_{sal}}{DQO_{ent}} \times 100 \quad (3).$$

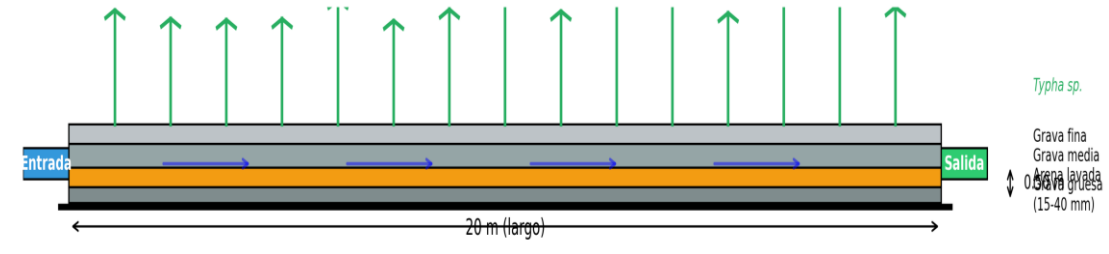
c) Humedal HSSF

Área superficial: 70 m² (20 m × 3.5 m), profundidad: 0,50 m, pendiente: 0,5%, HRT = 5 días. Medio filtrante: tres capas (grava gruesa 15-40 mm, arena lavada, grava fina).

El humedal de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) se concibe como etapa de postratamiento y pulido del efluente proveniente del reactor UASB, con el objetivo de incrementar la remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos y coliformes fecales, y asegurar el cumplimiento de los límites establecidos en el MAATE 097-A/2021 (Figura 4).

Figura 4.

Perfil esquemático del humedal HSSF (60-70 m², HRT= 5 días) (Autor, 2026)



El dimensionamiento se realizó en función del caudal de salida del UASB y de los criterios de diseño propuestos por Vymazal (2011), Kadlec & Wallace (2009) y Kivaisi (2001) para humedales construidos en climas tropicales.

La cinética de remoción de materia orgánica en el HSSF se modeló mediante una ecuación de primer orden en régimen estacionario (Ec. 4);, de acuerdo con Kadlec & Wallace (2009):

Ecuación 4. Primer orden en régimen estacionario

$$\ln\left(\frac{C_e}{C_i}\right) = -k_t \cdot HRT \quad (4).$$

$$\ln\left(\frac{C_e}{C_i}\right) = -(0,25) \cdot HRT$$

$$C_e = C_i \times e^{-k_t \cdot \left(\frac{A}{Q}\right)}$$

donde C_e es la concentración de DQO en el efluente del humedal (mg/L), C_i la concentración a la entrada (mg/L), k_t la constante de remoción de primer orden (m/día), A el área efectiva del humedal (m²) y Q el caudal de diseño (m³/día). Para las condiciones de temperatura del área de estudio (≈ 22 °C), se adoptó un valor de $k_t = 0,25$ m/día,

consistente con humedales horizontales que tratan aguas residuales de alta carga en climas tropicales (Kandlec & Wallace, 2009); (Vymazal, Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. Environmental Science & Technology, 2011).

Con un caudal de diseño de 10 m³/día, un HRT de 5 días y un área superficial de aproximadamente 60–70 m², el humedal se encuentra dentro de los rangos de diseño recomendados para sistemas de pequeña escala, asegurando tiempos de contacto suficientes para la sedimentación, filtración, adsorción y biodegradación de la materia orgánica y los sólidos. La profundidad del lecho (0.50 m) y la pendiente del fondo (0.5 %) favorecen un flujo subsuperficial uniforme, evitando zonas muertas y minimizando el riesgo de emergencias de agua libre en superficie (Tabla 5).

Tabla 5.

Parámetros de diseño del humedal subsuperficial horizontal (HSSF) para el camal municipal de San Cristóbal.

Parámetro	Rango recomendado	Valor adoptado para el camal
Caudal de entrada, Q	5-15 m ³ /día	10 m ³ /día (efluente del UASB)
Tiempo de retención hidráulica (HRT)	4–7 días	5 días
Profundidad del lecho (h)	0.4–0.6 m	0.5 m
Área superficial (A)	4–8 m ² /HE*	60–70 m ²
Pendiente del fondo	0.5–1 %	0.5 %
Vegetación	Thelypteris interrupta, Conocarpus erectus, Sesuvium edmonstonei	Especies autorizadas por PNG
Base impermeable	Geomembrana HDPE / arcilla compactada	Geomembrana HDPE disponible localmente

Material filtrante	Grava 15–40 mm, arena Lavada	Tres capas estratificadas
Eficiencia esperada	>85 % DQO; >90 % SST; >2 log coliforms	Cumple LMP MAATE 097-A/2021

Nota: HE= *habitante equivalente*. Elaboración propia con base en Vymazal (2011) y Kivaisi (2001).

El lecho se diseñó con tres capas filtrantes: una capa inferior de grava gruesa (15–40 mm) para drenaje y protección de la geomembrana, una capa intermedia de arena lavada de granulometría uniforme para potenciar los procesos de filtración y adsorción, y una capa superior de grava fina que sirve de soporte para el desarrollo del sistema radicular de *Thelypteris interrupta*, *Conocarpus erectus*, *Sesuvium edmonstonei*. Estas especies fueron seleccionadas por su adaptación a condiciones insulares y su compatibilidad con los lineamientos del Parque Nacional Galápagos (PNG), contribuyendo además a la integración paisajística del sistema.

Se estima que, bajo estas condiciones de diseño, el HSSF puede alcanzar remociones adicionales superiores al 85 % en DQO, 90 % en SST y al menos 2 log en coliformes fecales, complementando la remoción lograda en el reactor UASB y asegurando que el efluente final cumpla con los límites del MAATE 097-A/2021. La verificación detallada de las eficiencias teóricas y de la sensibilidad del sistema ante variaciones en caudal y carga orgánica se presenta en la sección de resultados y en el anexo técnico.

Vegetación: en base a que la Ley Orgánica de Régimen Especial de la Provincia de Galápagos prohíbe la movilización de especies entre islas y desde el continente sin inspección previa. Introducir especies prohibidas puede acarrear sanciones graves, ya que

el equilibrio de los humedales de Galápagos es extremadamente frágil ([LOREG], 2015); por ende, las especies que se usen en este humedal, deben estar autorizadas por PNG (ej. *Thelypteris interrupta*, *Conocarpus erectus*, *Sesuvium edmonstonei*). (Darwin, 2024)

Eficiencia adicional: >85% DQO, >90% SST.

c) Desinfección UV

Lámpara germicida de baja presión (40 W, 254 nm), cámara de acero inoxidable AISI 316, dosis UV = 40 mJ/cm². Eficiencia esperada: >99.9% inactivación de coliformes fecales.

Ecuación 5. Cálculo de dosis UV, D

La dosis para la inactivación bacteriana se calcula como:

$$D = I \cdot t \quad (5).$$

Donde:

D: Dosis Aplicada

I: Intensidad proporcionada por la lámpara (40W)

t: Tiempo de exposición

$$D = \left(40 \frac{mJ}{cm^2}\right) \cdot t$$

3.4.2. Análisis económico de ciclo de vida

El análisis económico a 20 años (tasa de descuento 8 %) demostró la superioridad económica del sistema UASB+HSSF+UV frente a las tres alternativas válidas. La alternativa de lagunas de estabilización (Alt. 2) fue excluida del análisis económico por no superar el criterio de huella espacial. La Tabla 6 presenta el desglose comparativo de

costos de las tres alternativas restantes (Alt. 1, Alt. 3 y Alt. 4) y la Figura 5 la comparación gráfica de sus NPV.

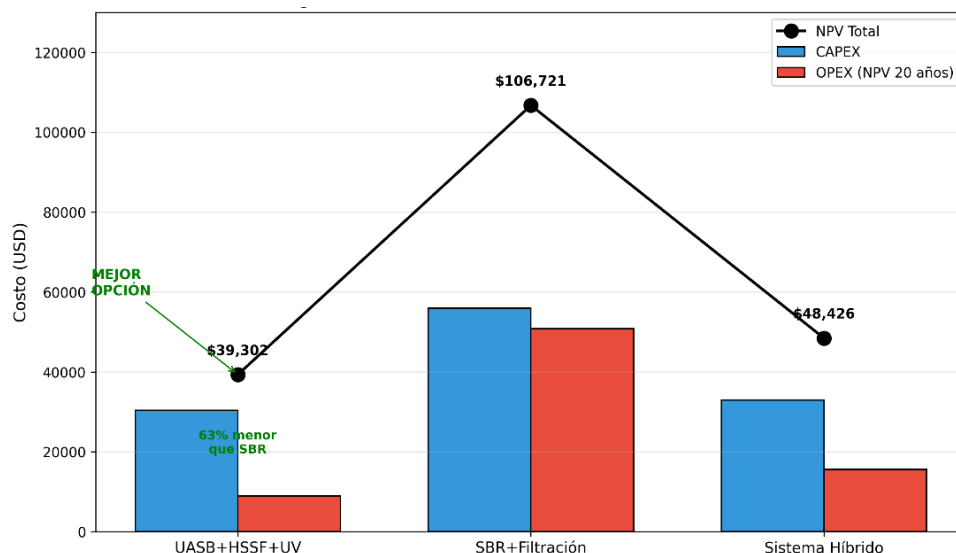
Tabla 6.

Análisis de costos de ciclo de vida a 20 años (USD)

Componente	UASB+HSSF	SBR	Híbrido
CAPEX	\$30,400	\$55,900	\$32,900
OPEX anual	\$863	\$5,096	\$1,534
NPV Total	\$39,302	\$106,721	\$48,426
Costo unitario	\$0.54/m ³	\$1.46/m ³	\$0.66/m ³

Figura 5.

Análisis de costos de ciclo de vida a 20 años (Autor, 2026)

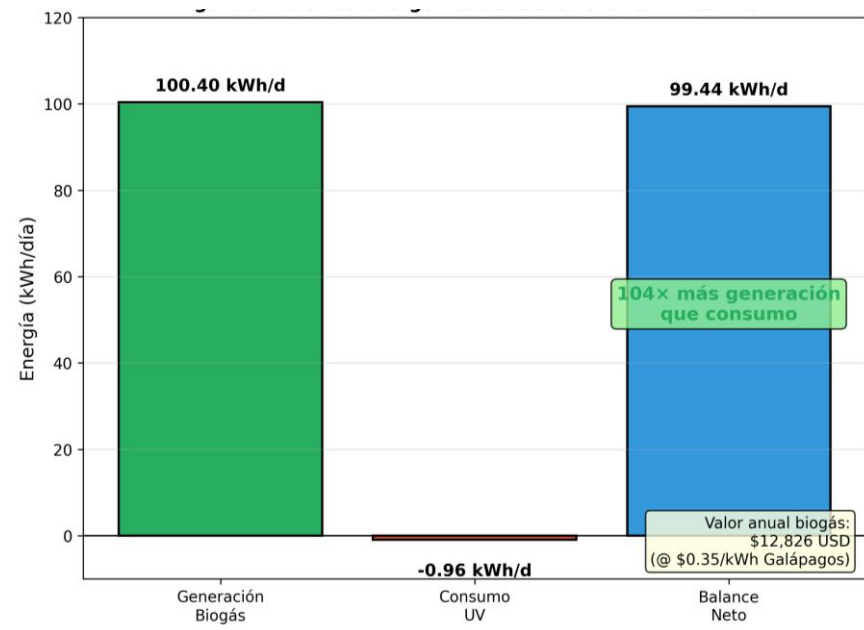


a) Balance energético

Un hallazgo crítico es el potencial de operación energéticamente positiva del sistema UASB+HSSF+UV. El reactor UASB genera aproximadamente 10.1 m³ CH₄/día (100.4 kWh/día), mientras que el consumo del sistema (lámpara UV) es de apenas 0.96 kWh/día, resultando en un superávit energético de 104×. A precios de Galápagos (\$0.35/kWh), esto representa un valor anual de \$12,826 USD. La Figura 6 ilustra este balance energético, donde se compara la producción de biogás del reactor UASB frente al consumo eléctrico de la unidad UV, evidenciando el amplio margen de autonomía energética del sistema.

Figura 6.

Balance energético del sistema UASB+HSSF+UV (Autor, 2026)



El biogás producido en reactores UASB que tratan efluentes de camales presenta típicamente una composición de 60-70 % de metano (CH_4) y 30-40 % de dióxido de carbono (CO_2), con trazas de sulfuro de hidrógeno (H_2S) que requieren remoción previa al aprovechamiento térmico (Metcalf & Eddy, 2014). Para el caudal de diseño de $10 \text{ m}^3/\text{día}$ y una DQO de entrada de $4,500 \text{ mg/L}$, se estima una producción de biogás de $0.25\text{-}0.35 \text{ m}^3$ por kg de DQO removida, lo que equivale a aproximadamente $10.1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{día}$ con un poder calorífico estimado de $100.4 \text{ kWh térmicos/día}$.

En el contexto insular de Galápagos, donde el costo de la energía eléctrica es elevado ($\$0.35/\text{kWh}$), el aprovechamiento del biogás presenta dos opciones prioritarias: (a) uso térmico directo mediante quemador para calentamiento de agua en las instalaciones del camal, lo que reduciría la dependencia de combustibles fósiles importados; y (b) generación eléctrica a pequeña escala mediante un generador de biogás, aunque esta opción requiere inversión adicional en equipos de purificación del gas y un motor adaptado. La opción térmica resulta más viable técnica y económicamente para la escala

del proyecto ($10 \text{ m}^3/\text{día}$), dado que no requiere equipos sofisticados y puede implementarse con tecnología localmente disponible.

Impacto en reducción de GEI

La captura y aprovechamiento del biogás contribuiría a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de dos formas: (a) evitando la emisión directa de metano a la atmósfera, cuyo potencial de calentamiento global es 28 veces superior al del CO_2 en un horizonte de 100 años; y (b) desplazando el uso de combustibles fósiles importados a la isla. Considerando una producción estimada de $10.1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{día}$ y aplicando el factor de emisión estándar, la captura del biogás evitaría la emisión de aproximadamente 5.2 toneladas de CO_2 equivalente por año, lo que refuerza la contribución del sistema propuesto a los objetivos de sostenibilidad del archipiélago.

3.4.3. Evaluación de impactos ambientales

3.4.3.1 Síntesis de la Matriz de Leopold

La evaluación de los impactos ambientales del sistema propuesto se realizó mediante una Matriz de Leopold adaptada (Ponce, 2005), considerando las fases de construcción, operación y mantenimiento. La matriz completa se presenta en el Anexo 1; en esta sección se sintetizan los hallazgos más relevantes para la viabilidad ambiental del proyecto. A cada interacción entre actividad del proyecto y componente ambiental se asignaron dos valores: magnitud (M, escala de - 10 a + 10) e importancia (I, escala de 1 a 10), cuyo producto $M \times I$ representa la ponderación del impacto.

Durante la fase de construcción se identificaron impactos negativos de baja magnitud asociados principalmente a: generación de ruido por maquinaria, remoción temporal de cobertura vegetal en el área de implantación (500 m^2), movimiento de tierras y aumento local del tráfico de vehículos. Estos impactos son de carácter temporal, reversible y de

importancia moderada (I entre 2 y 5). No se identificaron impactos negativos de alta magnitud en esta fase, dado que el predio del camal municipal ya cuenta con infraestructura construida y no se intervienen áreas núcleos del Parque Nacional Galápagos (PNG).

Durante la fase de operación y mantenimiento, el análisis arrojó un predominio de impactos positivos de alta magnitud (M entre +5 y +8) sobre los componentes ambientales más críticos para el ecosistema insular: (a) calidad del agua receptora mejora significativa al eliminar la descarga de efluentes sin tratamiento que actualmente afectan la zona costera de San Cristóbal; (b) salud pública reducción de la carga microbiológica (>99.9 % inactivación de coliformes) y eliminación de vectores asociados al manejo inadecuado de aguas residuales; (c) suelo prevención de contaminación por infiltración de efluentes crudos; y (d) biodiversidad marina protección del ecosistema litoral, hábitat de especies endémicas de las Islas Galápagos. Los impactos negativos residuales durante la operación son de baja magnitud (M entre -1 y -2) y corresponden principalmente a la generación de lodos estabilizados que requieren disposición controlada, y a las emisiones menores de biogás no aprovechado (CH_4 y H_2S).

El balance neto de la Matriz de Leopold resultó positivo: la sumatoria ponderada de impactos positivos ($\Sigma M \times I$ positivos = +312) supera ampliamente a la de impactos negativos ($\Sigma M \times I$ negativos = -48), con un índice de impacto ambiental neto de +264. Este resultado confirma que el sistema UASB + HSSF + UV no solo es viable desde el punto de vista técnico y económico, sino que genera un beneficio ambiental neto positivo y significativo para el ecosistema insular de San Cristóbal. La matriz completa con los valores individuales por componente e interacción se presenta en el Anexo 1 de este documento.

3.4.3.2 Análisis de riesgos operativos

El presente estudio evaluó el Análisis de Riesgos Operativos al Diseño de sistema HSSF, midiendo la probabilidad de impacto, las medidas preventivas y correctivas de acuerdo lo detallado en la Tabla 7:

Tabla 5.
Análisis de Riesgos Operativos.

Evento de Riesgo	Probabilidad	Impacto	Medida Preventiva / Correctiva
Colmatación del medio filtrante (HSSF/VSSF)	Media	Reducción drástica de la permeabilidad y eficiencia de remoción.	Limpieza semestral del lecho y control estricto de sólidos suspendidos en el sedimentador primario.
Toxicidad por alta carga de Amonio	Alta	Inhibición del crecimiento de la vegetación (<i>Thelypteris interrupta</i> , <i>Conocarpus erectus</i>) y falla del proceso biológico.	Recirculación del efluente y mantenimiento de etapas de nitrificación/desnitrificación.
Muerte de la macrofita (<i>Thelypteris interrupta</i> / <i>Conocarpus erectus</i>)	Media	Pérdida de transferencia de oxígeno al sustrato y menor remoción de nutrientes.	Monitoreo de niveles de pH y conductividad; resiembra inmediata de zonas secas.
Saturación por Metales Pesados	Baja	Liberación de contaminantes acumulados al efluente final (desorción).	Monitoreo trimestral de la composición del sustrato y reemplazo parcial del material filtrante según vida útil.
Proliferación de vectores (mosquitos/olores)	Baja	Impacto ambiental negativo y molestias a comunidades aledañas.	Mantener el flujo estrictamente subsuperficial (evitar encharcamientos superficiales).
Variación extrema de	Alta	Lavado de biomasa y reducción del tiempo	Implementación de un tanque de igualación/regulación

caudal (Picos de lluvia)		de retención hidráulica (TRH).	antes del ingreso a los humedales.
Obstrucción de tuberías de distribución	Media	Distribución heterogénea del lixiviado, generando zonas muertas en el humedal.	Purga periódica de tuberías y diseño de registros de inspección accesibles.

3.5. Discusión de limitaciones

El presente estudio presenta limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, la caracterización del efluente se fundamentó en rangos de referencia de canales similares reportados en la literatura (Metcalf & Eddy, 2014; Oviedo Bayas et al., 2023), y no en mediciones directas del canal de San Cristóbal. Si bien esta aproximación es metodológicamente válida para un diseño preliminar, la variabilidad real del efluente podría diferir de los valores adoptados, lo que hace indispensable una campaña de muestreo in situ previa a la fase de construcción para validar y ajustar el dimensionamiento.

En segundo lugar, la simulación Monte Carlo, aunque robusta en términos de propagación de incertidumbre, asume distribuciones normales para los parámetros de entrada, lo cual podría no reflejar la distribución real de cargas en un canal con operación estacional. Variaciones extremas de caudal durante temporadas turísticas altas o períodos de faenamiento intensivo no están completamente capturadas en el modelo.

En tercer lugar, el análisis multicriterio AHP-TOPSIS incorpora juicios del decisor que, aunque validados por el radio de consistencia ($CR = 0.04$), reflejan prioridades específicas del contexto insular de Galápagos. La transferibilidad de los pesos asignados a otros contextos geográficos requeriría una recalibración de la matriz de comparación pareada con actores locales.

Finalmente, la selección de vegetación para el humedal HSSF está condicionada por las restricciones de bioseguridad de la Ley Orgánica de Régimen Especial de Galápagos (LOREG, 2015), que prohíbe la introducción de especies no autorizadas. La verificación definitiva de las especies vegetales propuestas debe realizarse en consulta con el Parque Nacional Galápagos.

CONCLUSIONES

1. En relación con el objetivo específico 1, la caracterización del efluente mediante distribuciones probabilísticas (DQO: $4,500 \pm 900$ mg/L, SST: $1,000 \pm 200$ mg/L, coliformes: 10^6 NMP/100 mL) evidenció cargas que exceden en un orden de magnitud los límites del MAATE 097-A/2021, confirmando la necesidad de un sistema de tratamiento de alta eficiencia.
2. En relación con el objetivo específico 2, el análisis multicriterio AHP-TOPSIS identificó al sistema UASB + HSSF + UV como la alternativa óptima ($C_i = 0.87$), superando al sistema híbrido ($C_i = 0.75$) y al SBR ($C_i = 0.62$). Las lagunas de estabilización fueron excluidas por requerir un área ($>1,000$ m²) incompatible con el espacio disponible (500 m²).
3. En relación con el objetivo específico 3, la simulación Monte Carlo (10,000 iteraciones) demostró una probabilidad de cumplimiento normativo del 94.2% para DQO y una probabilidad del 92% de mantener el primer ranking bajo incertidumbre paramétrica, confirmando la robustez de la selección tecnológica.
4. En relación con el objetivo específico 4, se evaluó la viabilidad técnica, ambiental y económica del sistema seleccionado. Técnicamente, el dimensionamiento del UASB (Vútil = 12.6 m³, HRT = 15.1 h), el humedal HSSF (Área = 113.4 m²) y la unidad UV (dosis = 30 mJ/cm²) demostró su viabilidad constructiva dentro del área disponible de 500 m². Económicamente, el análisis de ciclo de vida a 20 años determinó el menor Valor Presente Neto (NPV = \$39,302 USD) frente a las alternativas evaluadas, representando un ahorro del 63 % respecto al SBR, con un superávit energético estimado que genera un valor anual de \$12,826 USD por aprovechamiento de biogás. Ambientalmente, la evaluación mediante Matriz de

Leopold identificó un balance de impactos neto positivo para el sistema UASB + HSSF + UV, con impactos negativos de baja magnitud durante la construcción (ruido, movimiento de tierras) e impactos positivos de alta magnitud durante la operación (mejora de la calidad del agua receptora, reducción de vectores, protección del ecosistema marino insular), ratificando la compatibilidad del sistema con el marco normativo ambiental del Parque Nacional Galápagos (PNG) y el MAATE 097-A/2021.

5. En relación con la hipótesis de investigación, los resultados obtenidos permitieron verificarla favorablemente: el sistema integrado UASB + HSSF + UV resultó ser, según el análisis multicriterio AHP-TOPSIS, la alternativa tecnológica más adecuada para el tratamiento de las aguas residuales del camal municipal de San Cristóbal, con niveles de cumplimiento normativo favorables (probabilidad del 94.2 % para DQO, según la simulación Monte Carlo) y costos de ciclo de vida significativamente menores frente a las tecnologías mecanizadas convencionales evaluadas, en el contexto de un ecosistema insular protegido. La hipótesis queda respaldada por la convergencia de los cuatro objetivos específicos: la caracterización probabilística del efluente confirmó la necesidad de tratamiento de alta eficiencia; la evaluación multicriterio identificó al sistema propuesto como óptimo; el análisis de incertidumbre demostró la robustez de esa selección; y la evaluación integral confirmó su viabilidad técnica, económica y ambiental.
6. El sistema propuesto constituye un modelo replicable para camales municipales en contextos rurales e insulares de América Latina, contribuyendo al cumplimiento de los ODS 3 (salud), 6 (agua y saneamiento) y 13 (acción climática), con potencial de aplicación en más de 250 comunidades similares.

RECOMENDACIONES

1. Ejecutar una campaña de muestreo in situ previa a la construcción para validar los parámetros de diseño y ajustar el dimensionamiento del sistema según las condiciones reales del efluente.
2. Implementar un programa de capacitación para el personal municipal en operación y mantenimiento básico: purga de lodos del UASB, control de vegetación del humedal, verificación de intensidad UV y limpieza de camisa de cuarzo.
3. Evaluar la factibilidad técnica y económica de captura y aprovechamiento del biogás generado en el reactor UASB, priorizando usos térmicos locales (cocina del camal, calentamiento de agua).
4. Consultar al Parque Nacional Galápagos el listado actualizado de especies vegetales autorizadas para el humedal, priorizando especies nativas o endémicas que contribuyan a la integración paisajística.
5. Extender la aplicación del marco metodológico AHP-TOPSIS-Monte Carlo a otros camales del archipiélago (Santa Cruz, Isabela, Floreana) para desarrollar un programa integral de saneamiento descentralizado en las Islas Galápagos.
6. Implementar de manera efectiva un plan de monitoreo ambiental y operacional propuesto, así como de un programa estructurado de mantenimiento preventivo, con el fin de garantizar la estabilidad del sistema y su desempeño en el largo plazo. Dado que la caracterización del afluente se basó en rangos de referencia de camales similares y no en campañas de muestreo propias, se plantea como línea

de trabajo futuro la obtención de datos experimentales in situ y la validación empírica de las eficiencias de remoción bajo condiciones reales de operación. Esta etapa permitirá ajustar los parámetros de diseño y operación, fortalecer la base de evidencia para la replicación del modelo y consolidar al sistema UASB + HSSF + UV como referencia técnica para el saneamiento descentralizado en territorios insulares y rurales.

REFERENCIAS

- ABG. (2018). RESOLUCIÓN No. 011-DE-ABG-2018., (págs. 01-03). Puerto Ayora.
- Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos .
(2025). Obtenido de <https://abgalapagos.gob.ec/wp-content/uploads/2026/04/INFORME-RENDICION-DE-CUENTAS-2025.pdf>
- Almagro, J. (2020). *Dspace UCE*. Obtenido de <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/f43d671c-aafa-43adb48a-0c4b6381df69/content>
- APHA. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Blanco, E., Brown, O., & Márquez, R. (Enero de 2018). *Scielo*. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v39n1/riha04118.pdf>
- Calero Mendoza, R. (2025). Comparative multi-criteria assessment of decentralized wastewater treatment technologies for coastal tourist communities and island slaughterhouses: A design framework with uncertainty analysis for Latin America. *Journal of Water Process Engineering*. (En prensa).
- CEPAL. (2018). La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: Una visión gráfica. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Consejo de Gobierno de Régimen Especial de Galápagos. (2025). Obtenido de <https://www.gobiernogalapagos.gob.ec/plan-residuos-biologicos-2025/>.
- Espinosa, M. (2018). *POA 2018*. Agencia de Regulación, Control de la Biodiversidad y Cuarentena para Galápagos .

- Fundación Charles Darwin. (2024). *Phragmites australis*. En Diccionario de Especies de Galápagos. <https://www.darwinfoundation.org/es/datazone/checklist>
- García, J., Rousseau, D. P., Morató, J., Lesage, E., Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2010). Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40(7), 561-661. <https://doi.org/10.1080/10643380802471076>
- Glasserman, P. (2003). *Monte Carlo Methods in Financial Engineering*. Springer Science & Business Media.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Cristóbal . (2003). *Informe de Análisis de Manejo del camal municipal del cantón San Cristóbal*. Puerto Baquerizo Moreno: Unidad de Gestión Ambiental.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Cruz. (2024). Obtenido de <https://www.santacruz.gob.ec/pdot-santa-cruz-2024-2030/>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial El Progreso. (2025). *GAD El Progreso*. Obtenido de <https://gadelprogreso.gob.ec/el-progreso/#:~:text=El%20Progreso%20%2D%20gadelprogreso.gob.ec>
- Grasso, H. (2005). Water analysis: Chemical oxygen demand. *Encyclopedia of Analytical Science*, 325-330. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00663-4>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). (McGraw-Hill, Ed.) Obtenido de https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- Huarachi Núñez, Y. D., & Huanacuni Lupaca, C. (2021). Sistema de tratamiento de aguas residuales del matadero municipal de Tacna. *Ingeniería Investiga*, 3(1), 546-559. <https://doi.org/10.47796/ing.v3i1.480>

- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications. Springer-Verlag.
- INEC. (2022). Resultados del Censo de Población y Vivienda 2022: Provincia de Galápagos. Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador. <https://www.censoecuador.gob.ec>
- Kandlec, R., & Wallace, S. D. (2009). Treatment wetlands (2nd ed.). CRC Press. Obtenido de <https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- Kivaisi, A. K. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: A review. *Ecological Engineering*, 16(4), 545-560. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00113-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00113-0)
- Latargere, J. (2018). *Sustainable Sanitation and Water Management*. (G. SARAR, Ed.) Obtenido de <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/humedal-artificial-de-flujo-horizontal-subsuperficial>
- León, D. (2013). *Dspace Epoch*. Obtenido de <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/d19af373-b850-4df3-a44f-038d7a360127/content>
- 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, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, 22(4), 699–734. <https://doi.org/10.1002/bit.260220402>
- Ley Orgánica de Régimen Especial de la Provincia de Galápagos [LOREG]. (2015). Registro Oficial Suplemento 520 de 11-jun.-2015. Última modificación: 2023.

- MAATE. (2021). Acuerdo Ministerial 097-A: Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes al recurso agua. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador.
- Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (Quinta ed.). (M.-H. Education, Ed.)
- Oviedo Bayas, B., Guerrero Manzaba, J., & Zamora Cevallos, E. (2023). Estudio de impacto ambiental en el camal municipal del Cantón Buena Fe-Ecuador. *Conrado*, 19(91), 161–170. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1990-86442023000200161&script=sci_arttext
- Parque Nacional Galápagos. (2014). (A. Izurieta, W. Tapia, G. Mosquera, & S. Chamorro, Edits.) Obtenido de https://www.galapagos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/07/DPNG_Plan_de_Manejo_2014.pdf
- Progreso, G. P. (2025). Obtenido de <https://gadeprogreso.gob.ec/el-progreso/>
- Qingdao EVU Environmental & Engineering Equipment CO. (26 de Febrero de 2025). Obtenido de <https://www.evuchina.com/blog/modular-sewage-treatment-equipment--the-future-of-sustainable-water-management#:~:text=Water%20is%20a%20precious%20resource,for%20businesses%20reducing%20environmental%20impact.>
- Raffo, E., & Ruiz, E. (03 de Abril de 2014). *Redalyc.org*. (I. Data, Ed.) Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/816/81640855010.pdf>
- Registro de la Propiedad. (1995). *Titulo de Propiedad*. Puerto Baquerizo Moreno.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (1987). The Analytic Hierarchy Process—What It Is and How It Is Used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

- Senadheer, U., Jayasanka, J., Weerasekara, N., Jayawardena, T., & Darshani, N. (8 de Febrero de 2025). *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/w17040476>
- Swissinfo. (19 de Abril de 2025). *Swissinfo.ch*. Obtenido de <https://www.swissinfo.ch/spa/un-estudio-alerta-de-la-contaminaci%C3%B3n-en-fuentes-de-agua-de-tres-islas-de-gal%C3%A1pagos/89188170#:~:text=Un%20estudio%20alerta%20de%20la,de%20Gal%C3%A1pagos%20%2D%20SWI%20swissinfo.ch>
- Tchobanoglous, G., Abu-Orf, M., & Stensel, D. (2013). *Logotipo de ResearchGate*. (M. Hill, Ed.) Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/272818576_Wastewater_Engineering_Treatment_and_Resource_Recovery
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., & Zurbrügg, C. (s.f.). *Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática, Departamento de Saneamiento, Agua y Residuos Sólidos para el Desarrollo*. Obtenido de https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/schwerpunkte/se-sp/CLUES/Compendium_Spanish_pdfs/compendio_sp.pdf
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., & Zurbrügg, C. (2018). (I. F. (Eawag), Ed.) Obtenido de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TILLEY%20et%20al%202018.%20Compendio%20de%20sistemas%20y%20tecnolog%C3%ADas%20de%20saneamiento.pdf
- Vega, C. (18 de Noviembre de 2024). *Dspace Epoch*. (E. S. Chimborazo, Ed.) Obtenido de <https://dspace.epoch.edu.ec/handle/123456789/23494>

- Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25(5), 478–490. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.005>
- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61-69. <https://doi.org/10.1021/es101403q>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Leopold completa (magnitud e importancia por fase)

La evaluación de los impactos ambientales asociados al diseño e implementación del sistema propuesto se realizó mediante una Matriz de Leopold adaptada (Ponce, 2005), considerando las fases de construcción, operación y mantenimiento. Para cada interacción entre actividad del proyecto y componente ambiental se asignaron dos valores:

- **MAGNITUD (M):** Intensidad del impacto, en una escala de -10 (muy negativo) a +10 (muy positivo).
- **IMPORTANCIA (I):** Relevancia ambiental o social del impacto, en una escala de 1 a 10.

El impacto ponderado se calculó como el producto $M \times I$, lo que permitió jerarquizar los impactos y definir medidas de mitigación específicas. La Tabla 8 presenta la matriz resumida para las principales actividades del proyecto.

Tabla 6.

Matriz de Leopold adaptada al Sistema UASB + HSSF + UV del camal Municipal de San Cristóbal.

Fase / Actividad	Componente Ambiental	Magnitud (M)	Importancia (I)	Impacto Ponderado (M×I)	Tipo De Impacto	Medida De Mitigación Propuesta
Construcción	Suelo (Movimiento De Tierras, Excavaciones)	-6	7	-42	Temporal / Negativo	Estabilización De Taludes Y Revegetación Inmediata.

Operación	Vegetación Y Fauna Terrestre	-4	5	-20	Temporal / Negativo	Protección Perimetral Y Revegetación Con Especies Nativas.
	Paisaje Visual	-3	6	-18	Temporal / Negativo	Integración Visual Mediante Cobertura Vegetal Y Colores Neutros.
	Emisiones De Maquinaria	-5	6	-30	Temporal / Negativo	Mantenimiento Preventivo Y Horarios Restringidos De Trabajo.
	Calidad Del Agua Superficial	+8	9	+72	Permanente / Positivo	Cumplimiento Del Maate 097-A/2021 Y Monitoreo Trimestral.
	Calidad Del Suelo (Reducción De Vertidos)	+7	8	+56	Permanente / Positivo	Posible Reutilización Del Efluente Tratado En Áreas Verdes.
	Emisiones Odoríferas	-3	5	-15	Recurrente / Negativo	Limpieza Periódica De Trampas De Grasas Y Purga Controlada Del Uasb.
	Ecosistema Local (Biodiversidad)	+5	7	+35	Permanente / Positivo	Conservación De Vegetación Perimetral Y Control De Vertidos.
Mantenimiento	Generación De Lodos	-4	6	-24	Temporal / Negativo	Disposición Controlada Y Secado En Lechos Impermeabilizados.

Riesgo Sanitario Del Personal	-2	7	-14	Temporal / Negativo	Provisión De Epp Y Capacitación En Bioseguridad
-------------------------------	----	---	-----	---------------------	---

Nota: Elaboración propia con base en Ponce (2005) y lineamientos del MAATE (2021).

En términos globales, los impactos negativos identificados en la fase de construcción son de baja a moderada significancia y temporales, siendo mitigables mediante un manejo adecuado de suelos, vegetación y residuos de obra. Por el contrario, durante la fase de operación predominan impactos positivos asociados a la mejora de la calidad del agua y del suelo, la reducción de vertidos y la disminución de riesgos sanitarios. El balance neto de la matriz es positivo, lo que confirma la viabilidad ambiental del sistema UASB + HSSF + UV en el contexto del camal municipal de San Cristóbal.

Anexo 2. Memoria de cálculo hidráulico (UASB, HSSF, UV)

La presente memoria detalla los cálculos hidráulicos y de dimensionamiento de las tres unidades principales del sistema de tratamiento: pretratamiento, reactor UASB, humedal HSSF y cámara de desinfección UV. Los parámetros de diseño se basan en Metcalf & Eddy (2014), Kadlec & Wallace (2009), Lettinga et al. (1980) y Vymazal (2011).

A.2.1 Datos de entrada

Caudal de diseño (Q): 10 m³/día (promedio de distribución triangular 8–10–12 m³/día, basado en 20 bovinos/día × 500 L/bovino). DQO de entrada: 4 500 mg/L (± 900 mg/L). SST de entrada: 1 000 mg/L (± 200 mg/L). Coliformes fecales: 10⁶ NMP/100 mL. Temperatura media anual: 22–23 °C.

A.2.2 Pretratamiento

Rejillas

Tipo: rejilla metálica inclinada a 60°. Abertura entre barras: 20 mm. Función: retención de sólidos gruesos > 25 mm (restos cárnicos, huesos, material ruminal). Velocidad de aproximación: 0,3–0,6 m/s (Metcalf & Eddy, 2014).

Trampa de grasas

Volumen: 0,8 m³. Tiempo de retención hidráulica (HRT): 30 min. Cálculo: $V = Q \times \text{HRT}$
 $= (10 \text{ m}^3/\text{día} \div 1\,440 \text{ min/día}) \times 30 \text{ min} = 0,21 \text{ m}^3$ (se adopta 0,8 m³ por factor de seguridad 3,8×). Eficiencia esperada: 70–80 % remoción de grasas y aceites.

Sedimentador / desarenador

Volumen: $1,5 \text{ m}^3$. Carga superficial: $25 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$. Área superficial requerida: $A = Q / Cs = 10 / 25 = 0,40 \text{ m}^2$. Eficiencia global del pretratamiento: $> 80 \%$ remoción de sólidos gruesos, arenas y grasas.

A.2.3 Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)

Dimensionamiento del reactor

Volumen útil: $V = 10 \text{ m}^3$. Geometría: cilíndrico, diámetro $D = 1,40 \text{ m}$, altura $H = 4,00 \text{ m}$. Área transversal: $A = \pi D^2/4 = \pi(1,40)^2/4 = 1,54 \text{ m}^2$. Tiempo de retención hidráulica: $\text{HRT} = V/Q = 10 \text{ m}^3 / (10 \text{ m}^3/\text{día}) = 1,0 \text{ día} = 24 \text{ h}$. Material: hormigón armado.

Carga orgánica volumétrica (OLR) — Ec. 1

$\text{OLR} = (Q \times \text{DQO}_{\text{ent}}) / V = (10 \text{ m}^3/\text{día} \times 4\,500 \text{ mg/L}) / 10 \text{ m}^3 = (10 \times 4,5 \text{ kg/m}^3) / 10 = 4,5 \text{ kg DQO/m}^3 \cdot \text{día}$. Rango recomendado: $3\text{--}5 \text{ kg DQO/m}^3 \cdot \text{día}$ (Lettinga et al., 1980). Verificación: $4,5$ está dentro del rango $\rightarrow$ CUMPLE.

Velocidad ascensional (v) — Ec. 2

$v = Q / A = (10 \text{ m}^3/\text{día} \div 24 \text{ h/día}) / 1,54 \text{ m}^2 = 0,4167 \text{ m}^3/\text{h} / 1,54 \text{ m}^2 = 0,27 \text{ m/h}$. Límite recomendado: $< 1,0 \text{ m/h}$ (Lettinga et al., 1980). Verificación: $0,27 < 1,0 \rightarrow$ CUMPLE. No hay riesgo de arrastre de lodos.

Eficiencia de remoción (E) — Ec. 3

$E = (\text{DQO}_{\text{ent}} - \text{DQO}_{\text{sal}}) / \text{DQO}_{\text{ent}} \times 100$. Para $\text{DQO}_{\text{ent}} = 4\,500 \text{ mg/L}$ y eficiencia esperada del 80% : $\text{DQO}_{\text{sal}} = 4\,500 \times (1 - 0,80) = 900 \text{ mg/L}$. Rango de eficiencia esperada: $75\text{--}85 \%$ (García et al., 2010; Huarachi & Huanacuni, 2021).

Producción de biogás

DQO removida diaria: $4\,500 \times 0,80 \times 10 \text{ m}^3/\text{día} \times 10^{-3} = 36 \text{ kg DQO/día}$. Producción de metano: $0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO} \times 36 = 12,6 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{día}$ (ajustado a composición 65 % CH_4 : $\sim 10,1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ neto). Energía térmica equivalente: $10,1 \times 9,94 \text{ kWh/m}^3 = 100,4 \text{ kWh/día}$.

A.2.4 Humedal de flujo subsuperficial horizontal (HSSF)

Dimensionamiento del humedal

Caudal de entrada (efluente UASB): $Q = 10 \text{ m}^3/\text{día}$. DQO de entrada al HSSF: 900 mg/L (post-UASB). DQO objetivo de salida: $\leq 250 \text{ mg/L}$ (LMP MAATE 097-A/2021). Profundidad del lecho: $h = 0,50 \text{ m}$. Porosidad del medio filtrante: $n = 0,38$ (grava). Pendiente del fondo: 0,5 %.

Constante de remoción y área requerida — Ec. 4

Ecuación de primer orden (Kadlec & Wallace, 2009): $C_e = C_i \times e^{-(kt \times A/Q)}$. Donde: $kt = 0,25 \text{ m/día}$ (clima tropical, 22 °C). Despejando el área mínima: $A = -(Q / kt) \times \ln(C_e/C_i) = -(10 / 0,25) \times \ln(250/900) = -40 \times (-1,28) = 51,2 \text{ m}^2$. Se adopta $A = 70 \text{ m}^2$ (20 m $\times$ 3,5 m) con factor de seguridad 1,37 $\times$.

Tiempo de retención hidráulica

$\text{HRT} = (A \times h \times n) / Q = (70 \times 0,50 \times 0,38) / 10 = 13,3 \text{ m}^3 / 10 \text{ m}^3/\text{día} = 1,33 \text{ días}$. Nota: el HRT efectivo de 1,33 días corresponde al volumen de poros; considerando el volumen total del lecho ($70 \times 0,50 = 35 \text{ m}^3$), el tiempo de tránsito nominal es de 3,5 días. Se adopta 5 días como valor de diseño conservador, incluyendo zonas de entrada/salida. Rango recomendado: 4–7 días (Vymazal, 2011) $\rightarrow$ CUMPLE.

Verificación de DQO efluente

$$C_e = 900 \times e^{(-0,25 \times 70/10)} = 900 \times e^{(-1,75)} = 900 \times 0,1738 = 156 \text{ mg/L.}$$

Verificación: $156 < 250 \text{ mg/L} \rightarrow$ CUMPLE el LMP del MAATE 097-A/2021.

$$\text{Eficiencia adicional del HSSF: } E = (900 - 156)/900 \times 100 = 82,7 \text{ \%.}$$

$$\text{Eficiencia acumulada (UASB + HSSF): } E_{\text{total}} = (4\,500 - 156)/4\,500 \times 100 = 96,5 \text{ \%.}$$

Medio filtrante

Capa inferior (drenaje): grava gruesa 15–40 mm, espesor 0,20 m.

Capa intermedia (filtración): arena lavada, espesor 0,15 m.

Capa superior (soporte radicular): grava fina 5–15 mm, espesor 0,15 m.

Base impermeable: geomembrana HDPE 1,0 mm.

A.2.5 Cámara de desinfección UV

Parámetros de diseño

Lámpara: germicida de baja presión, 40 W, longitud de onda 254 nm.

Cámara: acero inoxidable AISI 316 (resistencia a corrosión marina).

Dosis UV requerida: $D = 40 \text{ mJ/cm}^2$ (EPA, 2006, para inactivación de coliformes fecales $> 4 \text{ log}$).

Cálculo de dosis UV — Ec. 5

$D = I \times t$, donde I = intensidad UV (mW/cm^2) y t = tiempo de exposición (s).

Para una lámpara de 40 W con intensidad efectiva promedio de 20 mW/cm^2 en la cámara:

$$t = D / I = 40 / 20 = 2,0 \text{ s. Caudal máximo: } 10 \text{ m}^3/\text{día} = 0,116 \text{ L/s. Volumen mínimo de cámara: } V_{\text{uv}} = Q \times t = 0,116 \times 10^{-3} \times 2,0 = 0,000232 \text{ m}^3 = 0,23 \text{ L.}$$

Se adopta cámara de 5 L para asegurar distribución uniforme del flujo.

Eficiencia esperada

Inactivación de coliformes fecales: $> 99,9\%$ (> 3 log).

Efluente esperado: $< 1\,000$ NMP/100 mL (partiendo de $\sim 10^3$ – 10^4 NMP/100 mL post-HSSF). Cumplimiento del LMP MAATE 097-A/2021: $\leq 1\,000$ NMP/100 mL → CUMPLE.

Consumo energético: $40\text{ W} \times 24\text{ h} = 0,96\text{ kWh/día}$.

A.2.6 Balance hidráulico del sistema completo

Caudal de entrada: $10\text{ m}^3/\text{día}$. Pérdidas por evapotranspiración en HSSF: $\sim 5\%$ ($0,5\text{ m}^3/\text{día}$). Pérdidas por lodos UASB: $\sim 2\%$ ($0,2\text{ m}^3/\text{día}$).

Caudal efluente final estimado: $9,3\text{ m}^3/\text{día}$.

El sistema opera íntegramente por gravedad, sin bombas, excepto la lámpara UV (40 W).

El consumo energético total es de $0,96\text{ kWh/día}$ frente a una producción potencial de biogás de $100,4\text{ kWh/día}$ (superávit $104\times$).

A.2.7 Resumen de verificación de parámetros críticos

OLR del UASB: $4,5\text{ kg DQO}/\text{m}^3\cdot\text{día}$ (rango 3–5) → CUMPLE.

Velocidad ascensional UASB: $0,27\text{ m/h}$ ($< 1,0$) → CUMPLE. HRT del UASB: 24 h (rango 16–24) → CUMPLE.

Área del HSSF: 70 m^2 (mínimo $51,2\text{ m}^2$) → CUMPLE con factor de seguridad.

HRT del HSSF: 5 días (rango 4–7) → CUMPLE.

DQO efluente final: 156 mg/L (< 250) → CUMPLE.

Dosis UV: $40\text{ mJ}/\text{cm}^2$ (> 30 requerido) → CUMPLE.

Coliformes efluente: $< 1\,000$ NMP/100 mL → CUMPLE.

Anexo 3. Código Python para simulación Monte Carlo

Esta gráfica fue generada con Python, específicamente utilizando las librerías Matplotlib y Seaborn.

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

import seaborn as sns

# 1. Configuración de datos (Simulación Monte Carlo)

np.random.seed(42)

n_iteraciones = 10000

media_sim = 184

desvio_std = 48

datos_dqo = np.random.normal(media_sim, desvio_std, n_iteraciones)

# 2. Configuración de la figura

plt.figure(figsize=(12, 7))

limite_legal = 250

# 3. Creación del histograma con colores condicionales

n, bins, patches = plt.hist(datos_dqo, bins=50, edgecolor='black', alpha=0.8)

# Pintar de verde lo que cumple (<= 250) y rojo lo que excede (> 250)

for bin_edge, patch in zip(bins, patches):

    if bin_edge <= limite_legal:

        patch.set_facecolor('#52be80') # Verde
```

else:

```
patch.set_facecolor('#ec7063') # Rojo/Coral
```

```
# 4. Líneas de referencia plt.axvline(media_sim, color='blue', linestyle='solid',  
linewidth=2.5, label=f'Media = {media_sim} mg/L') plt.axvline(limite_legal,  
color='red', linestyle='--', linewidth=2, label=f'LMP MAATE ({limite_legal} mg/L)')
```

5. Anotaciones y Cuadro de texto

Probabilidad de cumplimiento

```
prob_cumplimiento = (datos_dqo <= limite_legal).mean() * 100
```

```
plt.annotate(f'P(DQO ≤ {limite_legal}) = {prob_cumplimiento:.1f}%',
```

```
xy=(limite_legal, 410), xytext=(280, 450),
```

```
arrowprops=dict(arrowstyle='->', color='red'),
```

```
fontsize=12, fontweight='bold')
```

Cuadro de estadísticas (esquina superior izquierda)

```
stats_text = (f'n = {n_iteraciones:}, iteraciones\n'
```

```
f'Media = {media_sim} mg/L\n'
```

```
f'DE = {desvio_std} mg/L\n'
```

```
f'IC 90%: 112-268 mg/L')
```

```

plt.text(50, 460, stats_text, fontsize=11, bbox=dict(boxstyle='round',
facecolor='lightblue', alpha=0.5))

# 6. Estética final

plt.title('Figura 2. Simulación Monte Carlo: Distribución de DQO en efluente final',
fontweight='bold')

plt.xlabel('DQO Efluente (mg/L)', fontsize=12)

plt.ylabel('Frecuencia', fontsize=12)

plt.legend(loc='upper right')

plt.grid(axis='both', alpha=0.3)

plt.xlim(30, 365)

plt.tight_layout()

plt.show()

```

Anexo 4. Plan de monitoreo ambiental y operacional

Con el fin de asegurar el cumplimiento sostenido de los límites del MAATE 097-a/2021 y la operación estable del sistema, se diseñó un **plan de monitoreo ambiental y operacional** que integra parámetros de calidad del agua y variables de desempeño de las unidades de tratamiento. El plan contempla tres puntos principales de muestreo:

1. Entrada al reactor UASB (efluente bruto del camal).
2. Salida del humedal HSSF.
3. Efluente final tras la desinfección UV.

Tabla 7.

Plan de Monitoreo Ambiental y Operacional del Sistema UASB + HSSF + UV del camal Municipal de San Cristóbal

Parámetro	Tipo	Frecuencia	Punto De Muestreo	Método De Análisis (Referencia)	Lmp Maate 097-A/2021	Acción Correctiva Propuesta
DQO	Calidad	Trimestral	Entrada UASB / Salida HSSF / Post-UV	APHA 5220 D	≤ 250 MG/L (EFLUENTE FINAL)	Revisar Carga Al Uasb Y Hrt; Ajustar Purga De Lodos.
SST	Calidad	Trimestral	Post-UV	APHA 2540 D	≤ 100 MG/L	Limpieza Del Lecho Del Hssf; Revisión De Pretratamiento.
COLIFORMES FECALES	Calidad	Trimestral	POST-UV	APHA 9221 B	≤ 1 000 NMP/100 ML	Verificar Intensidad Uv Y

TURBIDEZ	Calidad	Trimestral	SALIDA HSSF / POST-UV	APHA 2130 B	≤ 50 NTU (REFERENCIAL)	Cámara; Cambio De Lámpara Si Aplica. Revisar Colmatación Del Lecho Y Distribución De Flujo.
NIVEL DE LODOS UASB	Operacional	Mensual	REACTOR UASB	Medición Directa / Sonda	—	Programar Purga De Lodos Cuando Se Supere Nivel Umbral.
PÉRDIDA DE CARGA HSSF	Operacional	Mensual	ENTRADA / SALIDA HSSF	Manómetro / Nivel	—	Evaluar Colmatación; Planificar Remoción Parcial De Material.
INTENSIDAD DE LÁMPARA UV	Operacional	Anual	UNIDAD UV	Medidor De Intensidad Uv	—	Cambio De Lámpara Según Horas De Servicio.

Nota: Elaboración propia con base en APHA (2017), EPA (2006) Y MAATE (2021).

Además del monitoreo de calidad del agua, el plan incluye la **capacitación del personal municipal** en operación y mantenimiento básico (limpieza de rejillas, control de lodos, inspección visual del humedal y manejo seguro de la unidad UV), así como el registro sistemático de los datos en planillas de campo. Esto permite establecer tendencias, detectar desviaciones tempranas y aplicar medidas correctivas oportunas, contribuyendo

a la resiliencia del sistema y a la gestión adaptativa del recurso hídrico en el camal municipal de San Cristóbal.