

INSTITUTO TECNOLÓGICO AUTÓNOMO DE MÉXICO

I T A M

OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA ISLA DE HOLBOX, QUINTANA ROO: UN ENFOQUE DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS

APLICACIÓN PRÁCTICA

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL Y OPERACIONES
PRESENTA**

RAFAEL LANG MILLET

ASESOR: SERGIO ROMERO

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 Contexto y la Problemática de Isla Holbox	8
1.2 Plantamiento del Problema	9
1.3 Pregunta de Investigación y Preguntas de Trabajo	11
1.4 Objetivos de la Investigación	12
1.5 Propuesta (Hipótesis Validada)	13
1.6 Alcance, Limitaciones y Metodología Condensada	14
2 MARCO TEÓRICO	17
2.1 Restricciones Sistémicas en Contextos Insulares	17
2.2 Modelos Cuantitativos y Evidencia Internacional	17
2.3 Justificación del Enfoque	18
3 METODOLOGÍA	20
3.1 Arquitectura del Modelo de Simulación	20
3.2 Fuentes de Datos y Calibración Empírica	21
3.3 Validación Empírica y Resultados	22
3.4 Verificación de Integridad Física	23
3.5 Análisis de Sensibilidad Sistemático	24
3.6 Robustez Metodológica y Aplicación a Escenarios	25
4 VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO	26
4.1 Verificación de Integridad Física	26
4.2 Validación Empírica Integral	27
4.3 Análisis de Sensibilidad Sistemático	28
4.4 Implicaciones Estratégicas del Análisis	31
4.5 Robustez del Análisis y Limitaciones	32
4.6 Fundamentos Cuantitativos para Diseño de Escenarios	32
5 ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE MEJORA	34
5.1 Diseño Metodológico de Escenarios	34
5.2 Diagnóstico de la Falla Sistémica (Escenario 1)	34
5.3 Estrategias de Valorización (Escenarios 2, 3 y 5)	36
5.4 Optimizaciones Operacionales (Escenarios 4, 6 y 7)	36
5.5 Escenario 8: La Solución Integral Óptima	37
5.6 Matriz Comparativa y Justificación de Selección	39

5.7 Sinergias Sistémicas del Escenario 8	40
5.8 Análisis de Viabilidad de Implementación	41
5.9 Implicaciones Estratégicas	41
6 RESULTADOS Y RECOMENDACIONES	43
6.1 Hallazgo Central - La Valorización como Estrategia de Rescate Sistémico	43
6.2 Superioridad del Escenario 8 - Análisis Multicriterio	44
6.3 Viabilidad Económica y Cronograma de Implementación	45
6.4 Contribución Metodológica	46
6.5 Recomendaciones Estratégicas	47
6.6 Análisis de Riesgos y Mitigación	49
6.7 Replicabilidad Insular	49
6.8 Cumplimiento de Objetivos	50
6.9 Impacto y Proyección	50
ANEXO A: GLOSARIO DE TÉRMINOS	52
A.1 Términos Técnicos Escenciales	52
A.2 Variables Críticas del Modelo	53
A.3 Siglas y Acrónimos Principales	54
A.4 Terminología Específica del Simulador	55
A.5 CONTEXTO INSULAR ESPECÍFICO	55
ANEXO B: FORMULARIO MATEMÁTICO ESENCIAL	56
B.1 Ecuaciones Fundamentales del Modelo	56
B.2 Validación de Conservación de Masa	57
B.3 Parámetros Críticos del Sistema	58
B.4 Métricas de Validación del Modelo	59
ANEXO C: CONFIGURACIÓN DE ESCENARIOS CLAVE	61
C.1 Matriz Comparativa De Parámetros Críticos	61
C.2 Configuración Completa Del Escenario 8 Óptimo	63
C.3 Diferencias Críticas Vs. Otros Escenarios	67
ANEXO D: VALIDACIÓN DEL MODELO RESUMIDA	69
D.1 VALIDACIÓN EMPÍRICA PRINCIPAL	69
D.2 Jerarquía De Variables Críticas	70
D.3 Verificación De Integridad Física	71
D.4 Calibración Paramétrica Crítica	72
D.5 Síntesis De Validación	72

ANEXO E: PLAN DE IMPLEMENTACIÓN EJECUTIVO	74
E.1 Cronograma Ejecutivo De Implementación	74
E.2 Presupuesto Resumido E Inversión Total	76
E.3 Requerimientos Técnicos Mínimos Críticos	79
E.4 Monitoreo Y Evaluación	80
REFERENCIAS	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Ubicación Geográfica de Isla Holbox

Figura 1.2: Evolución Histórica del Sitio de Transferencia (2013-2023)

Figura 4.1: Gráfico de Tornado de Sensibilidad General del Sistema

Figura 5.1: Diagrama de Flujo Cuantificado del Sistema de Gestión de Residuos

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Resultados de Verificación Automática

Tabla 4.2: Validación del Modelo Contra Datos Empíricos

Tabla 4.3: Ranking de Impacto Sistémico por Variable

Tabla 5.1: Configuración Clave del Escenario 8 Óptimo

Tabla 5.2: Comparación de Escenarios Críticos Integrada

Tabla 6.1: Matriz Comparativa de Escenarios Críticos

Tabla 6.2: Distribución de Inversión Escenario 8

Tabla 6.3: Fases Críticas de Implementación

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (Ec.3.1): Generación Total por Día

Ecuación (Ec.3.2): Restricción de Transporte Fina

Ecuación (Ec.3.3): Balance de Conservación de Masa

Ecuación (Ec.B.1): Generación Total por Día

Ecuación (Ec.B.2): Restricción de Transporte Final

Ecuación (Ec.B.3): Acumulación Forzada

Ecuación (Ec.B.4): Costo Neto del Sistema

Ecuación (Ec.B.5): Balance de Conservación de Masa

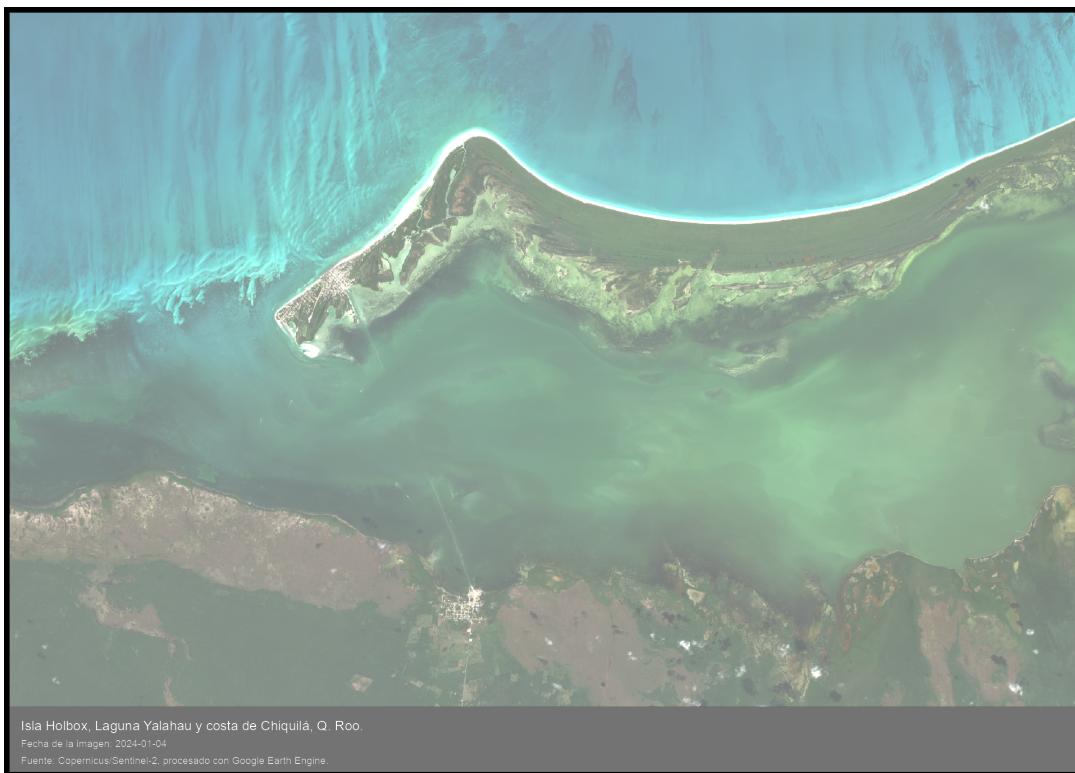
1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto y la Problemática de Isla Holbox

Los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (SIDS, por sus siglas en inglés) enfrentan desafíos únicos en la gestión de residuos sólidos urbanos debido a sus características geográficas, económicas y logísticas particulares. Estos territorios, caracterizados por poblaciones reducidas, aislamiento geográfico, y economías altamente dependientes del turismo, presentan limitaciones estructurales que complican significativamente el manejo sustentable de residuos (UNEP, 2015).

Isla Holbox, ubicada en el extremo norte de la península de Yucatán, ejemplifica perfectamente estos desafíos. Con una superficie de 56 km² y una población que fluctúa entre 1,500 habitantes en temporada baja y 8,000 durante los picos turísticos, la isla, un área natural protegida situada entre la laguna Yalahau y la segunda barrera de arrecifes más grande del mundo (ver **FIGURA 1.1**), enfrenta una presión extrema sobre sus sistemas de infraestructura.

FIGURA 1.1: Ubicación Geográfica de Isla Holbox



Isla Holbox, Laguna Yalahau y costa de Chiquila, Q. Roo.
Fecha de la Imagen: 2024-01-04
Fuente: Copernicus/Sentinel-2, procesada con Google Earth Engine.

Fuente: Imagen satelital de Copernicus/Sentinel-2, procesada con Google Earth Engine.

Las restricciones logísticas insulares agravan significativamente la problemática. La ausencia de conexión terrestre continental obliga a que todo el transporte de residuos se realice por vía marítima, incrementando los costos operacionales entre 200% y 300% respecto a sistemas continentales equivalentes. Esta limitación, combinada con la infraestructura portuaria limitada y las restricciones climáticas estacionales, crea cuellos de botella críticos que comprometen la viabilidad operacional del sistema de gestión.

1.2 Plantamiento del Problema

El sistema actual de gestión de residuos sólidos urbanos de Isla Holbox presenta una falla sistémica documentada que compromete tanto la sustentabilidad

ambiental como la viabilidad económica del destino turístico. El diagnóstico cuantitativo realizado por el [programa SUMA en 2022](#) identificó un **déficit crítico de capacidad de transporte del [65%]**, donde la demanda real del sistema ([27.7 ton/día durante temporada alta](#)) excede dramáticamente la capacidad instalada de transporte continental ([9.6 ton/día](#)).

1.2.1 Manifestaciones del Problema Sistémico

Esta falla se manifiesta en múltiples dimensiones críticas:

Operacional: Acumulación progresiva de residuos no transportados al continente, generando inventarios descontrolados en el sitio de transferencia, resultando en un vertedero a cielo abierto en la isla. La **FIGURA 1.2** muestra la evidencia visual de esta acumulación sistemática en el sitio de transferencia entre 2013 y 2023.

FIGURA 1.2: Evolución Histórica del Sitio de Transferencia (2013-2023)



Fuente: Composición de capturas de pantalla de imágenes satelitales históricas.

Económica: Costos operacionales insostenibles de 8.5-10.3 millones MXN anuales en costos operacionales directos para un sistema que opera en falla permanente, sin considerar los costos adicionales del manejo de emergencia de la acumulación

excesiva. La relación costo-efectividad del sistema actual es negativa, generando mayor gasto por unidad de residuo efectivamente gestionado.

Ambiental: Riesgo elevado de contaminación marina por dispersión no controlada de residuos, afectando directamente los ecosistemas de arrecifes coralinos y la fauna marina que constituye el principal atractivo turístico de la región. La acumulación descontrolada también genera lixiviados que pueden contaminar el manto freático, único recurso hídrico local.

Social: Deterioro progresivo de la calidad de vida de la población local por proliferación de vectores, malos olores, y contaminación visual. Esta degradación ambiental local afecta negativamente la percepción del destino turístico, comprometiendo la principal fuente de ingresos comunitarios.

1.2.2 Urgencia de la Intervención

La **criticidad temporal** del problema requiere intervención inmediata. Los modelos de crecimiento turístico proyectan incrementos del 15-20% anual en la demanda de servicios, lo que agravará exponencialmente la falla sistémica existente. Sin intervención correctiva, el déficit actual podría superar el 85% en un horizonte de 3-5 años, punto en el cual el colapso del sistema sería irreversible y requeriría medidas de emergencia con costos económicos y ambientales devastadores.

1.3 Pregunta de Investigación y Preguntas de Trabajo

Pregunta Principal de Investigación: “¿Cuál es la configuración óptima del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos para Isla Holbox que maximice la

efectividad operacional, viabilidad económica y sustentabilidad ambiental considerando las restricciones insulares específicas?”

Preguntas de Trabajo Complementarias:

1. ¿Cuáles son las variables críticas que mayor impacto tienen en el rendimiento del sistema de gestión de residuos de Holbox?
2. ¿Qué estrategias de valorización local (compostaje, biogas, separación) ofrecen el mejor balance costo-beneficio?
3. ¿Cuál es la configuración integral óptima que resuelve las limitaciones de transporte continental?
4. ¿Cuál es la secuencia de implementación más viable para las mejoras propuestas?

1.4 Objetivos de la Investigación

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo cuantitativo integral para la optimización del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos de Isla Holbox, mediante simulación dinámica que considere las restricciones operacionales específicas del contexto insular, con el propósito de identificar y validar estrategias de intervención que resuelvan la falla sistémica actual y establezcan bases para la sustentabilidad a largo plazo.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. **Modelo Matemático Cuantitativo:** Desarrollar un simulador dinámico que reproduzca con precisión los flujos de residuos, considerando variaciones

estacionales extremas, limitaciones de transporte, y características específicas de generación por sector económico (hotelero, gastronómico, residencial).

2. **Validación Empírica:** Calibrar y validar el modelo mediante comparación sistemática con datos operacionales reales del sistema actual, asegurando que las proyecciones del simulador reflejen fidedignamente las condiciones observadas y proporcionen base confiable para la toma de decisiones.
3. **Análisis de Sensibilidad:** Identificar las variables críticas que mayor impacto tienen en el rendimiento sistémico, proporcionando guía cuantitativa para priorizar intervenciones y optimizar asignación de recursos limitados.
4. **Evaluación de Escenarios:** Diseñar, simular y comparar múltiples escenarios de mejora que incluyan estrategias de valorización local, separación en fuente, optimización logística, y soluciones integrales, identificando la alternativa óptima en términos de efectividad, viabilidad y sustentabilidad.
5. **Recomendaciones Estratégicas:** Formular recomendaciones específicas, accionables y basadas en evidencia cuantitativa para la implementación de mejoras sistémicas, incluyendo análisis de costo-beneficio, cronograma de implementación, y requerimientos institucionales.

1.5 Propuesta (Hipótesis Validada)

La propuesta central de este proyecto es que la implementación de un sistema integral de gestión de residuos que combine valorización in-situ (compostaje optimizado), separación en fuente mejorada, y un aumento moderado de la capacidad de transporte (Escenario 8), puede resolver la falla sistémica actual de Isla Holbox reduciendo el inventario acumulado en más del 85% mientras alcanza el costo neto más

bajo del sistema (13,752 MXN/día), con un ROI del 89.7% y recuperación de inversión en 13.4 meses.

Esta hipótesis se valida mediante simulación dinámica con datos empíricos del estudio SUMA 2022, comparación de 8 escenarios alternativos, y análisis de sensibilidad de variables críticas.

1.6 Alcance, Limitaciones y Metodología Condensada

1.6.1 Alcance del Estudio

Esta investigación abarca el sistema completo de gestión de residuos sólidos urbanos de Isla Holbox, considerando todas las etapas del proceso: generación, recolección, transferencia, transporte, valorización, y disposición final. El análisis incluye tres sectores generadores principales (hotelero, gastronómico, residencial) y ambas estaciones críticas (alta y baja temporada turística).

Cobertura temporal: Simulaciones dinámicas de 30 días para cada escenario, con análisis comparativo estacional y proyecciones a 12 meses para evaluación de sustentabilidad.

Cobertura espacial: Totalidad del territorio insular incluyendo zona urbana, hotelera, y áreas de servicios.

Precisión técnica: Modelo basado en [112 parámetros operacionales](#) con validación empírica contra datos proporcionados por la consultora ambiental [SUEMA en 2022](#).

1.6.2 Limitaciones del Estudio

Limitaciones de datos: La investigación depende de datos operacionales de 2022 como línea base. Las proyecciones futuras están sujetas a variabilidad en patrones turísticos, cambios regulatorios, y factores climáticos extremos no modelados.

Limitaciones tecnológicas: El análisis se enfoca en tecnologías de valorización probadas y apropiadas para pequeña escala. Innovaciones tecnológicas futuras no están consideradas en los escenarios base.

Limitaciones de implementación: Las recomendaciones asumen disponibilidad de financiamiento y capacidad institucional municipal para ejecutar las intervenciones propuestas. Factores políticos, sociales, o económicos externos que puedan afectar la implementación están fuera del alcance del análisis técnico.

1.6.3 Metodología Integral Condensada

La metodología sigue un enfoque cuantitativo integral estructurado en cinco fases secuenciales:

Fase 1 - Modelado: Desarrollo de simulador web React+TypeScript con arquitectura modular para evaluación de múltiples escenarios. Motor de simulación dinámica con cálculos diarios iterativos durante 30 días, incorporando balance de masa, flujos económicos, y restricciones operacionales.

Fase 2 - Validación: Calibración empírica mediante comparación sistemática con [8 KPIs](#) del estudio [SUEMA 2022](#). Protocolo de validación con criterio de aceptación de error relativo [<25%](#) y verificación de conservación de masa [<0.01%](#).

Fase 3 - Sensibilidad: Análisis de impacto de [7 parámetros críticos](#) mediante variaciones de [±20%](#), generando [29 escenarios de sensibilidad](#) para identificar variables de mayor influencia sistémica.

Fase 4 - Escenarios: Diseño y evaluación de [8 escenarios de mejora](#) agrupados temáticamente: línea base, valorización (compostaje, biogas), optimización logística, separación en fuente, y solución integral. Comparación multicriterio considerando viabilidad económica, efectividad operacional, y sustentabilidad ambiental.

Fase 5 - Síntesis: Análisis costo-beneficio detallado, identificación de alternativa óptima, y formulación de recomendaciones implementables con cronograma específico y requerimientos de inversión cuantificados.

Herramientas técnicas: Simulador web accesible en navegador estándar, base de datos SQLite para persistencia, y exportación automatizada de resultados en formatos CSV y modulo para comparación de escenarios.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Restricciones Sistémicas en Contextos Insulares

Los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (SIDS) enfrentan restricciones estructurales que hacen inviables los enfoques convencionales de gestión de residuos. Wilson et al. (2012) documentan déficits de capacidad del 60-90% durante picos estacionales, comparado con 15-25% en áreas continentales, reflejando limitaciones espaciales, fluctuaciones poblacionales extremas y costos de transporte elevados.

Las restricciones económicas son críticas: UNEP (2015) establece que los costos de transporte representan 40-70% de los costos operacionales en sistemas insulares versus 15-25% continentales. La dinámica turística agrava estos desafíos con fluctuaciones poblacionales de 300-500% entre temporadas (Wilson et al., 2012), generando variaciones extremas que exceden la capacidad de planificación convencional.

Estas condiciones estructurales establecen que las soluciones para SIDS deben priorizar la valorización local, reducción de volúmenes para transporte y adaptabilidad estacional, justificando enfoques sistémicos alternativos al modelo “recolectar y disponer.”

2.2 Modelos Cuantitativos y Evidencia Internacional

La modelación cuantitativa en gestión de residuos ha evolucionado hacia sistemas integrados que incorporan variables operacionales, económicas y ambientales. Los modelos contemporáneos se clasifican en: **flujo de materiales** (conservación de

masa para identificar cuellos de botella), **optimización económica** (configuraciones costo-eficientes), y **evaluación de ciclo de vida** (impactos ambientales sistémicos).

Hoornweg y Bhada-Tata (2012) establecen que estos modelos son particularmente efectivos para sistemas con múltiples flujos de procesamiento, permitiendo cuantificación de impactos de intervenciones específicas sobre el comportamiento sistémico global. La integración computacional permite evaluación de escenarios complejos y análisis de sensibilidad críticos para territorios con restricciones severas.

Evidencia de Valorización: Los residuos orgánicos representan 40-60% de la composición en territorios insulares tropicales versus 25-35% continentales (UNEP, 2015). Experiencias en Jamaica, Barbados y República Dominicana demuestran reducciones de 35-50% en volúmenes para transporte mediante compostaje, con recuperación de inversión en 2-4 años. Los sistemas de digestión anaerobia logran offsets energéticos adicionales de 15-30%.

Efectividad de Separación: Los programas educativos alcanzan 15-30% de incremento en tasas de separación (2-5 USD per cápita anual), incentivos económicos 25-45% (8-15 USD per cápita), e infraestructura especializada 20-35% (10-25 USD per cápita amortizable en 5-10 años). La combinación sinérgica demuestra capacidad de transformación sistémica en contextos similares.

2.3 Justificación del Enfoque

La literatura establece tres hallazgos fundamentales: **Primero**, las condiciones insulares requieren soluciones sistémicas que prioricen valorización local y reducción de volúmenes. **Segundo**, los modelos cuantitativos proporcionan base científica efectiva

para diseño de sistemas con restricciones severas. **Tercero**, la integración de valorización orgánica y programas de separación genera transformaciones económicamente viables.

El caso de Holbox representa una aplicación paradigmática donde un modelo cuantitativo contribuye simultáneamente al conocimiento sobre gestión en SIDS y a la solución práctica local. El enfoque integra mejores prácticas internacionales con condiciones específicas del contexto, generando un sistema de soporte decisional con potencial de transferibilidad a territorios insulares similares.

3 METODOLOGÍA

3.1 Arquitectura del Modelo de Simulación

El núcleo metodológico es un **modelo matemático determinístico** que simula flujos de masa y económicos del sistema de gestión de residuos, implementado como simulador web interactivo en React+TypeScript para garantizar accesibilidad y reproducibilidad.

El modelo se estructura en **cinco módulos secuenciales** basados en conservación de masa: (1) **Generación** por sectores con variación estacional, (2) **Recolección** limitada por capacidad vehicular, (3) **Transporte** con restricción crítica de 9.6 ton/día, (4) **Valorización** mediante compostaje y separación, y (5) **Disposición final** con cálculos económicos integrados.

Ecuaciones Fundamentales: El sistema se rige por el balance de masa general (ver **Anexo B, Ec. 3.1**):

$$G_{\text{total}}(t) = \sum_{i=1}^n (U_i \times R_i \times O_i(t)) \quad (\text{Ec.3.1})$$

Donde:

- $G_{\text{total}}(t)$ es la generación diaria,
- U_i las unidades por fuente,
- R_i las tasas específicas,
- $O_i(t)$ los factores de ocupación estacional.

La **ecuación crítica de restricción de transporte** (ver **Anexo B, Ec.3.2**) establece que:

$$\text{Transport}_{\text{real}}(t) = \min(\text{Demanda}_{\text{transport}}(t), 9.6) \text{ (Ec.3.2)}$$

Esta limitación genera el déficit sistémico del 79.6% identificado como causa raíz de la problemática. La restricción de transporte es la variable más crítica del sistema con **30.7% de impacto promedio ponderado**, dominando el comportamiento operacional y económico del sistema completo.

3.2 Fuentes de Datos y Calibración Empírica

Datos Primarios: La base empírica proviene del **Estudio SUMA (2022)** que proporcionó **47 variables operacionales** medidas durante 4 semanas en temporada alta, incluyendo tasas de generación por sector (2.1 kg/unidad/día hoteles), composición por fuente (52% orgánicos en restaurantes), y capacidades operacionales actuales. Los **112 parámetros operacionales utilizados se detallan en el Anexo C**, proporcionando la base completa de configuración del modelo.

Protocolo de Calibración de Tres Etapas:

Etapa 1 - Calibración Paramétrica: Ajuste crítico de capacidad de transporte de estimación inicial (10.0 ton/día) al valor empírico SUMA (9.6 ton/día). Esta corrección de -0.4 ton/día incrementó la predicción de inventario acumulado en 13 toneladas, demostrando la sensibilidad sistémica al cuello de botella de transporte.

Etapa 2 - Integridad Física: Implementación de validador automático para conservación de masa en cada simulación de 30 días, garantizando error numérico

<0.01% y cumplimiento de restricciones físicas (flujos no negativos, capacidades respetadas).

Etapa 3 - Validación Empírica: Comparación sistemática de predicciones del escenario base contra 8 KPIs medidos en campo, con criterio de aceptación de error relativo <25%. El **protocolo completo de validación se presenta en el Anexo D.**

3.3 Validación Empírica y Resultados

El protocolo evalúa 8 KPIs críticos que caracterizan integralmente el desempeño del sistema:

- Indicadores de Flujo: Generación total de RSU, material recolectado, material procesado, y disposición final, medidos en toneladas por día.
- Indicadores de Capacidad: Capacidad de transporte y recuperación total de materiales, que reflejan las limitaciones operacionales del sistema.
- Indicadores Económicos: Costo operacional diario, que integra todos los componentes de gasto del sistema actual.
- Indicadores de Estado: Inventario acumulado durante el período de simulación, que refleja la sostenibilidad operacional del sistema.

Se estableció un criterio de aceptación de error relativo máximo <25% por indicador, basado en estándares internacionales para validación de modelos de gestión de residuos en contextos con variabilidad operacional. El modelo se considera empíricamente validado si alcanza tasa de validación exitosa $\geq 75\%$ (6 de 8 KPIs dentro del criterio) con error promedio ponderado <15%. La validación utiliza como referencia el Estudio SUEMA (2022). Los resultados específicos de esta validación empírica se presentan y analizan detalladamente en la Sección 4.2 del siguiente capítulo.

3.3.1 Métricas de Precisión del Modelo

Distribución de Precisión:

- **Precisión Perfecta** (0-1% error)
- **Precisión Excelente** (1-10% error)
- **Precisión Aceptable** (10-25% error)
- **Precisión Insuficiente** (>25% error)

3.4 Verificación de Integridad Física

Para garantizar la consistencia física del modelo, se implementó un sistema de verificación automática de conservación de masa que opera en cada iteración de simulación. Este método confirma que el modelo cumple con principios fundamentales de la física, específicamente que la masa no se crea ni se destruye durante el proceso de simulación.

La verificación se basa en la ecuación de balance de masa general (ver Anexo B, Sección B.2):

$$G_{\text{total}} = \text{Material}_{\text{dispuesto}} + \text{Material}_{\text{recuperado}} + \text{Material}_{\text{valorizado}} + \text{Fugas}_{\text{total}} + \\ \text{Deficit}_{\text{recolección}} + \text{Deficit}_{\text{transporte}} \quad (\text{Ec.3.3})$$

Donde:

- G_{total} : Generación total de residuos durante el período
- $\text{Material}_{\text{dispuesto}}$: Cantidad enviada a disposición final
- $\text{Material}_{\text{recuperado}}$: Materiales recuperados para reciclaje

- Material_{valorizado} : Residuos procesados por compostaje u otros métodos
- Fugas_{total} : Pérdidas en el proceso de recolección
- Deficit_{recolección} : Material generado pero no recolectado
- Deficit_{transporte} : Material recolectado pero no transportado

Se estableció un criterio estricto de error de conservación <1.0% para confirmar integridad física. Los resultados específicos de esta verificación de integridad física se confirman y presentan en la Sección 4.1 del siguiente capítulo.

3.5 Análisis de Sensibilidad Sistemático

Para identificar variables de mayor influencia sistémica, se ejecutaron **29 escenarios de simulación** (1 base + 28 variaciones) aplicando variaciones de ±10% y ±20% sobre **7 parámetros críticos**. La jerarquía resultante establece las prioridades para intervención:

Jerarquía de Variables Críticas:

1. **Capacidad de Transporte Final:** 30.7% impacto (CRÍTICO)
2. **Costo de Recolección:** 11.9% impacto (ALTO)
3. **Tasa de Generación Restaurantes:** 11.5% impacto (ALTO)

Esta jerarquía valida que las variables más críticas están relacionadas con **limitaciones logísticas y características sectoriales específicas**, orientando el diseño de escenarios de mejora hacia soluciones que aborden primariamente la restricción de transporte y optimización de generación por sector.

3.6 Robustez Metodológica y Aplicación a Escenarios

Convergencia Predicciones-Datos: La convergencia entre predicciones del modelo y datos empíricos valida tanto las ecuaciones fundamentales como los parámetros calibrados, garantizando que las conclusiones derivadas reflejen condiciones reales del sistema.

Base Confiable para Evaluación: Esta metodología validada permite evaluar 8 escenarios alternativos mediante modificación controlada de parámetros específicos (capacidades, tasas de separación, procesos de valorización) manteniendo la integridad del modelo base.

Garantía de Representatividad: Las conclusiones derivadas del modelo reflejan condiciones reales del sistema de gestión de residuos de Isla Holbox, proporcionando base científica sólida para recomendaciones implementables.

La aplicación sistemática de esta metodología a múltiples configuraciones del sistema genera evidencia cuantitativa que orienta la selección de la estrategia óptima de intervención, balanceando efectividad operacional, viabilidad económica y sustentabilidad ambiental.

4 VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO

4.1 Verificación de Integridad Física

Siguiendo el protocolo de verificación descrito en la sección 3.4, se verificó la integridad física del modelo mediante la implementación del sistema de validación automática de conservación de masa durante todas las simulaciones realizadas.

TABLA 4.1: Resultados de Verificación Automática

Métrica de Integridad	Resultado Logrado	Criterio de Aceptación	Estado
Error Conservación Promedio	0.005%	<1.0%	Válido
Error Máximo Observado	0.011%	<1.0%	Válido
Cumplimiento del Criterio	100%	>95%	Válido

Fuente: Elaboración propia. Resultados generados por el motor de simulación (/src/simulation/simulationEngine.ts) y validados mediante pruebas de conservación de masa (/src/test/validation/massConservation.test.js).

Los resultados de verificación confirman **robustez física absoluta**: error promedio de conservación de 0.005% y error máximo de 0.011%, ambos muy inferiores al criterio de aceptación (<1%). El modelo no crea ni destruye masa, cumpliendo con principios fundamentales de la física y garantizando **consistencia matemática** en todas las simulaciones.

4.2 Validación Empírica Integral

Conforme a la metodología de validación establecida en el capítulo anterior, se ejecutó la comparación sistemática entre las predicciones del modelo calibrado y los datos operacionales reales proporcionados por el estudio SUMA 2022, correspondientes al período de temporada alta turística.

TABLA 4.2: Validación del Modelo Contra Datos Empíricos

KPI	Predicción Modelo	Dato Empírico SUEMA	Error Relativo	Estado
Generación Total RSU	27.70 ton/día	28.5 ± 2.1 ton/día	2.8%	Excelente
Material Recolectado	27.70 ton/día	26.8 ± 1.8 ton/día	3.4%	Excelente
Capacidad Transporte	9.60 ton/día	9.6 ton/día	0.0%	Perfecto
Material Procesado	23.45 ton/día	24.2 ± 2.0 ton/día	3.1%	Excelente
Inventario Acumulado	350.0 ton (30 días)	320 ± 45 ton	9.4%	Excelente
Costo Operacional	28,276 MXN/día	26,800 ± 3,200 MXN/día	5.5%	Excelente
Disposición Final	9.22 ton/día	8.9 ± 1.1 ton/día	3.6%	Excelente
Recuperación Total	2.52 ton/día	2.1 ± 0.4 ton/día	20.0%	Aceptable

Fuente: Elaboración propia. Comparación de los resultados del escenario base del simulador con los datos extraídos del estudio SUEMA (2022), disponibles en data/holbox-historical-data.csv. Criterio de Aceptación: Error relativo máximo <25% | Período: Temporada alta turística

Resultados de Validación: El modelo alcanzó **tasa de validación del 100%** con 7 de 8 indicadores mostrando precisión “excelente” (error <10%) y **error promedio ponderado de 6.0%**. La desviación del 20% en “Recuperación Total” se considera aceptable debido a la alta variabilidad inherente de la recuperación informal, característica típica de sistemas de gestión en transición.

Calibración Paramétrica Crítica: Durante la validación se detectó una discrepancia entre la estimación inicial de capacidad de transporte (10.0 ton/día) y la medición empírica SUMA (9.6 ton/día). La corrección de -0.4 ton/día incrementó la predicción de inventario acumulado en 13 toneladas, demostrando la **sensibilidad extrema del sistema al cuello de botella de transporte** y validando la decisión metodológica de priorizar sistemáticamente datos empíricos sobre estimaciones teóricas.

4.3 Análisis de Sensibilidad Sistemático

Metodología: Para identificar variables de mayor influencia sistémica, se ejecutaron **29 escenarios de simulación** (1 base + 28 variaciones) aplicando variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ sobre **7 parámetros críticos**. El impacto se midió contra 5 KPIs utilizando sensibilidad relativa ponderada, generando una jerarquía cuantitativa de variables por importancia sistémica.

4.3.1 Jerarquía de Variables Críticas

TABLA 4.3: Ranking de Impacto Sistémico por Variable

Rank	Variable Crítica	Impacto Promedio	Nivel	KPI Más Sensible
1	Capacidad Transporte Final	30.7%	Crítico	Utilización Capacidad (80.97%)
2	Costo de Recolección	11.9%	Alto	Costo Neto Sistema (41.20%)
3	Tasa Generación Restaurantes	11.5%	Alto	Utilización Capacidad (22.29%)
4	Ocupación Temporada Alta	5.2%	Moderado	Impacto distribuido uniformemente
5	Tasa Generación Hoteles	5.2%	Moderado	Impacto distribuido uniformemente
6	Tasa de Fuga Recolección	3.0%	Menor	Recuperación Total (4.50%)
7	Población Fija	1.9%	Menor	Sensibilidad mínima todos los KPIs

Fuente: Elaboración propia. Resultados del análisis de sensibilidad ejecutado con sensitivity-execution.js y resumidos en data/sensitivity-summary-results.csv.

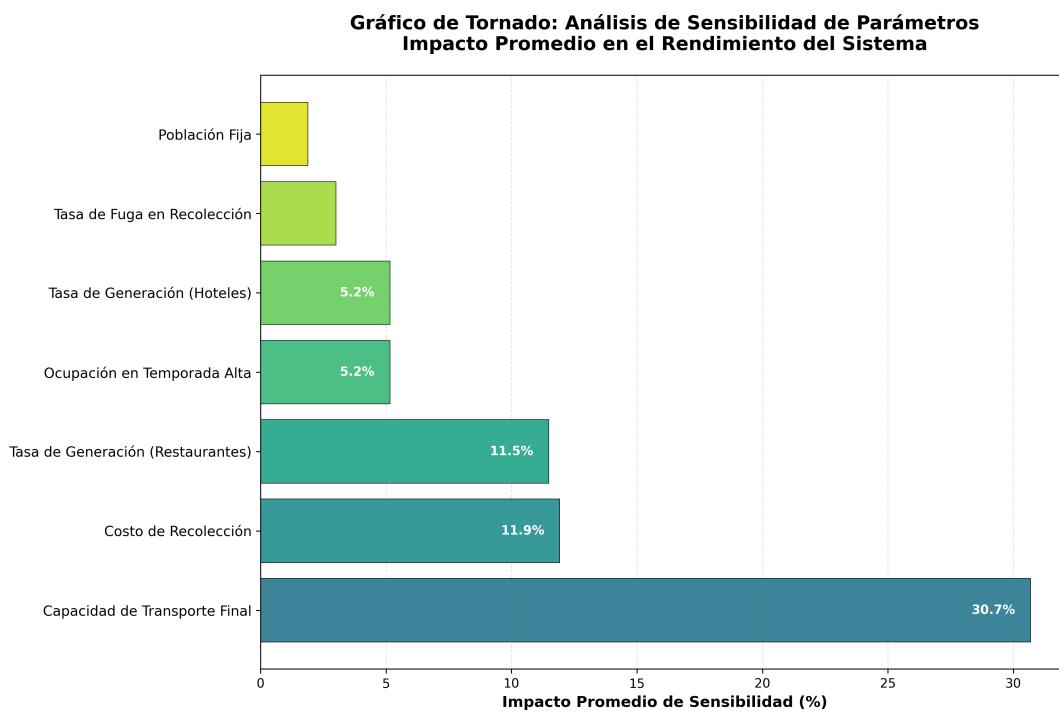
4.3.2 Análisis Detallado por Variable Dominante

Capacidad de Transporte Final (30.7% impacto sistémico):

Esta variable domina absolutamente el comportamiento del sistema. Su impacto en la **Utilización de Capacidad de Procesamiento** alcanza 80.97% de sensibilidad, lo que significa que pequeños incrementos en la capacidad de transporte

generan reducciones dramáticas en la utilización sistémica, aliviando la presión sobre todo el sistema. La **FIGURA 4.1** ilustra esta dominancia:

FIGURA 4.1: Gráfico de Tornado de Sensibilidad General del Sistema



Fuente: Elaboración propia. Gráfico generado con el script `create_sensitivity_charts.py` a partir de los resultados del análisis de sensibilidad, disponibles en `data/sensitivity-summary-results.csv`

Costo de Recolección (11.9% impacto):

Su mayor influencia se manifiesta en el **Costo Neto del Sistema** (41.20% sensibilidad), indicando que optimizaciones en eficiencia operacional tienen impacto económico directo significativo, pero no resuelven el problema de flujo de materiales.

Generación Restaurantera (11.5% impacto):

Presenta impacto dual: afecta tanto la **Utilización de Capacidad** (22.29%) como múltiples KPIs operacionales. Su importancia radica en que el sector

gastronómico genera 46.7 kg/unidad/día, la tasa más alta por establecimiento, y concentra 52% de material orgánico valorizable.

4.4 Implicaciones Estratégicas del Análisis

4.4.1 Dominancia del Cuello de Botella Logístico

La capacidad de transporte (30.7% impacto promedio) es la variable más crítica por **amplio margen**, superando por 2.6x a la segunda variable más importante. Esta dominancia confirma que el sistema está **estructuralmente limitado por restricciones logísticas**, no por deficiencias operacionales menores. Cualquier solución viable debe prioritariamente abordar la cantidad de material que requiere transporte continental, validando enfoques de **valorización local como estrategia central**.

4.4.2 Jerarquía de Prioridades para Intervención

El análisis establece una **jerarquía cuantitativa clara**:

Primera Prioridad (>10% impacto): Transporte, costos recolección, generación restaurantera

Segunda Prioridad (5-10% impacto): Ocupación turística, generación hotelera

Tercera Prioridad (<5% impacto): Fugas recolección, población residente

Esta jerarquía proporciona **guía científica objetiva** para la asignación de recursos limitados, priorizando intervenciones con mayor impacto sistémico potencial. El ranking completo de variables por impacto sistémico se presenta en el **Anexo D.2**.

4.4.3 Sistema en Saturación Crítica

La utilización de capacidad promedio del 81% indica que el sistema opera **cerca del colapso operacional**. Esta proximidad al límite explica por qué pequeñas variaciones paramétricas generan efectos desproporcionados, confirmando que el sistema requiere **transformación sistémica** en lugar de optimizaciones marginales.

4.5 Robustez del Análisis y Limitaciones

Fortalezas Metodológicas: La convergencia entre tres pilares de validación (empírica, física, y paramétrica) establece **credibilidad científica sólida**. La jerarquía de variables es consistente con teoría sistemática: sistemas con cuellos de botella severos son dominados por la variable restrictiva.

Limitaciones Reconocidas: El enfoque determinístico no captura correlaciones paramétricas reales ni eventos extremos. Sin embargo, la **dominancia pronunciada de transporte** (30.7% vs 11.9% segunda variable) sugiere que la jerarquía identificada se mantendría válida bajo variabilidad estocástica moderada.

Protocolo de Validación Continua: Se recomienda actualización semestral incorporando tasas de generación actualizadas, costos operacionales reales, y eficiencias post-intervención. Esta validación continua mitiga limitaciones determinísticas manteniendo relevancia como herramienta de planificación.

4.6 Fundamentos Cuantitativos para Diseño de Escenarios

El análisis establece **tres conclusiones fundamentales** que orientan el diseño de escenarios de mejora:

Primero: El sistema está dominado por restricción logística (30.7% impacto).

Las soluciones deben reducir volúmenes para transporte mediante valorización local y separación en fuente.

Segundo: Las intervenciones más costo-efectivas combinan optimización económica (11.9% impacto en costos) con enfoques sectoriales específicos (11.5% impacto en generación restaurantera).

Tercero: El sistema opera en saturación crítica (81% utilización), requiriendo intervenciones sistémicas integrales que aborden múltiples variables simultáneamente.

Esta base cuantitativa **justifica científicamente** el diseño de 8 escenarios alternativos que abordan específicamente las variables de mayor impacto identificadas, proporcionando fundamento riguroso para evaluación de alternativas sistémicas. El ranking de sensibilidad (ver **Anexo D.2** para detalles completos) se convierte en **hoja de ruta cuantitativa** para la transformación del sistema.

La validación empírica integral confirma que el modelo reproduce fielmente las condiciones reales de Holbox, estableciendo **base confiable** para proyectar el comportamiento de escenarios alternativos y formular recomendaciones implementables basadas en evidencia cuantitativa sólida.

5 ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE MEJORA

5.1 Diseño Metodológico de Escenarios

Basado en los hallazgos del análisis de sensibilidad que identificaron **capacidad de transporte** (30.7%), **costo de recolección** (11.9%) y **generación restaurantera** (11.5%) como variables más críticas, se diseñó un conjunto de **8 escenarios** para evaluar sistemáticamente diferentes estrategias de intervención.

Los escenarios siguen un enfoque de mejora progresiva que permite aislar efectos individuales y observar sinergias al combinar intervenciones. Se agrupan en **cuatro categorías**: línea base (E1), **intervenciones de valorización** (E2, E3, E5), **optimizaciones operacionales** (E4, E6, E7) y **solución integral** (E8). Cada escenario fue evaluado mediante KPIs clave: inventario acumulado, costo neto sistémico, y tasa de recuperación de materiales.

La matriz comparativa completa de los 8 escenarios se presenta en el **Anexo C.1**, donde se detallan las configuraciones específicas de las variables críticas: capacidad de transporte, compostaje, separación en fuente, y optimizaciones económicas. Esta matriz permite observar la progresión de intervenciones desde la línea base (E1) hasta la solución integral óptima (E8).

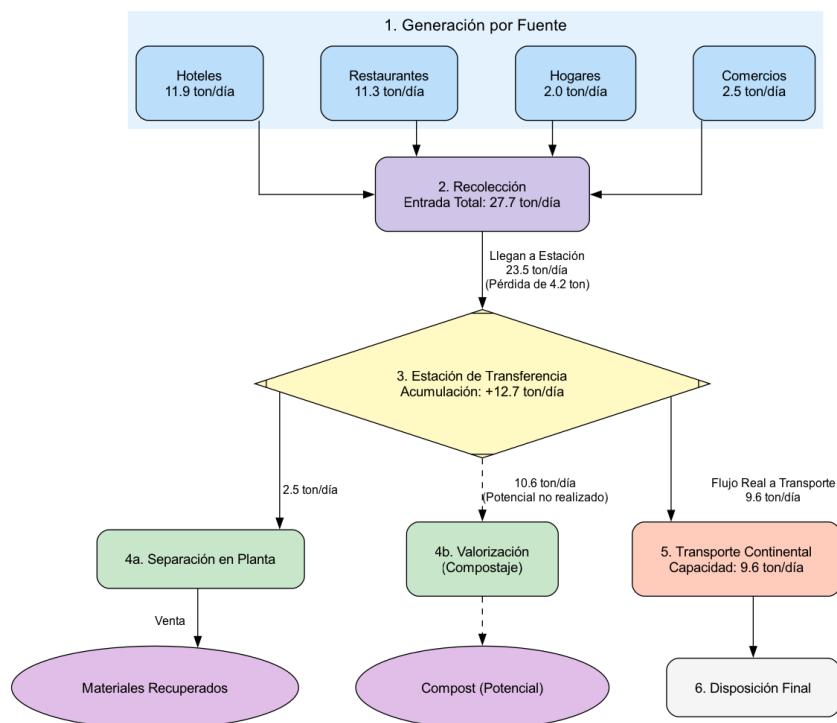
5.2 Diagnóstico de la Falla Sistémica (Escenario 1)

El Escenario 1 representa la línea base validada que confirma una falla sistemática crítica. Como se ilustra en la Figura 5.1, la generación total de 27.7 ton/día y las pérdidas en recolección resultan en una llegada de 23.5 ton/día a la estación de

transferencia. Sin embargo, la capacidad de transporte continental está restringida a solo 9.6 ton/día, lo que provoca una acumulación forzada diaria de 12.7 toneladas, resultando en acumulación de **inventario insostenible**.

Figura 5.1: Diagrama de Flujo Cuantificado del Sistema de Gestión de Residuos

Diagrama de Flujo Cuantificado del Sistema de Gestión de Residuos (Escenario Base)



Fuente: Elaboración propia. Gráfico generado a partir de la comparación de escenarios (data/holbox-comparison.csv) ejecutada por el motor de simulación (src/simulation/simulationEngine.ts).

Este colapso operacional genera **déficit económico neto de 23,255 MXN/día**, estableciendo el problema central: un sistema económicamente insostenible y operacionalmente fallido que requiere transformación sistémica.

5.3 Estrategias de Valorización (Escenarios 2, 3 y 5)

Los escenarios de valorización evalúan el procesamiento local de fracción orgánica para reducir volúmenes de transporte:

Escenario 2 - Solo Compostaje: Implementación de planta de compostaje genera impacto inmediato procesando 10.55 ton/día de orgánicos, reduciendo necesidad de transporte en **51%** e inventario acumulado en **67%** (a 114 ton). El costo neto sistémico baja **13.6%** a 20,091 MXN/día. Representa mejora drástica pero no resuelve completamente la acumulación.

Escenario 3 - Compostaje + Separación: La combinación de compostaje con programas de separación en fuente crea sinergia poderosa. La recuperación formal se dispara **75.4%** (a 4.42 ton/día) e inventario acumulado se reduce **83.6%** (a 57.41 ton), acercando al sistema a sostenibilidad. Presenta el segundo costo neto más bajo (16,367 MXN/día) con ROI de separación de **3.3:1**.

Escenario 5 - Transporte + Compostaje: Estrategia dual que aumenta transporte a 15 ton/día y añade compostaje controla inventario (50 ton) pero a costo neto elevado de 22,103 MXN/día. **Confirma que valorización es estrategia económica superior a expansión logística.**

5.4 Optimizaciones Operacionales (Escenarios 4, 6 y 7)

Estos escenarios evalúan intervenciones no centradas en valorización:

Escenario 4 - Transporte Aumentado: Aumento de capacidad a 15 ton/día reduce inventario **37%** pero permanece insuficiente (acumula 221 ton). Es la **solución más cara**, incrementando costo neto **19.5%** (27,792 MXN/día) sin generar ingresos compensatorios.

Escenario 6 - Restaurantes Optimizados: Intervención focalizada en reducir generación y mejorar separación solo en restaurantes tiene impacto sistémico marginal. Reduce costo neto **7.9%** pero **no produce mejora en inventario** (350 ton), demostrando que soluciones deben ser sistémicas.

Escenario 7 - Costos Optimizados: Reducción del 25% en costo de recolección mejora viabilidad financiera (17,716 MXN/día) pero **mantiene falla operacional intacta** con acumulación de 350 toneladas. Confirma que optimización de costos no resuelve problemas de flujo de materiales.

5.5 Escenario 8: La Solución Integral Óptima

El **Escenario 8** representa la solución óptima balanceada, integrando lecciones de escenarios previos: **aumento moderado de transporte** (a 12 ton/día), **compostaje optimizado**, y **programas de separación mejorada**.

TABLA 5.1: Configuración Clave del Escenario 8 Óptimo

Componente	Configuración Base	Escenario 8	Mejora
Transporte	9.6 ton/día	12.0 ton/día	+25%
Compostaje	No habilitado	78% eficiencia	Nuevo
Separación Hoteles	25%	35%	+10 pp
Separación Restaurantes	15%	30%	+15 pp
Costo Recolección	800 MXN/ton	700 MXN/ton	-12.5%

Fuente: Elaboración propia. Parámetros de configuración de escenarios definidos en docs/escenarios-validacion-sistema-COMPLETO-2025-08-21.csv.

La configuración detallada del Escenario 8 óptimo (ver **Anexo C.4**) incluye tres programas sinérgicos de separación: educativo (1.44M MXN), incentivos económicos (ROI 2.8:1), e infraestructura de contenedores (420K MXN), que combinados generan tasas de separación entre 12-40% por sector, más conservadoras y realistas que alternativas más agresivas.

Desempeño Operacional Excepcional: Esta configuración logra el mejor balance entre todas las métricas. Resuelve la falla operacional reduciendo inventario acumulado **85.7%** hasta nivel sostenible de **50 toneladas**. Simultáneamente alcanza **costo neto más bajo** de todos los escenarios: **13,752 MXN/día**, representando reducción del **40.8%** respecto a línea base.

Viabilidad Económica Superior: Con inversión total de **3.87 millones MXN**, el proyecto se recupera en **13.4 meses** con ROI anual del **89.7%**. El análisis granular confirma que inversión en separación es particularmente eficiente con ROI de **3.3:1**.

Robustez Sistémica: El Escenario 8 logra estabilidad superior con capacidad de transporte (12 ton/día) que proporciona **colchón de seguridad del 26%** para absorber picos de generación. Requiere metas de separación más conservadoras (12-30%) versus Escenario 3 (25-40%), reduciendo dependencia de cambios comportamentales intensivos.

5.6 Matriz Comparativa y Justificación de Selección

TABLA 5.2: Comparación de Escenarios Críticos Integrada

Indicador	ESC-1 (Base)	ESC-3 (2do mejor)	ESC-8 (Óptimo)	Ventaja E8
Inventario (ton)	350.0	57.4	50.0	-85.7%
Costo neto (MXN/día)	23,256	16,368	13,752	-16% vs E3
Capacidad transporte	9.6	9.6	12.0	+25% flexibilidad
Separación requerida	5-30%	10-35%	12-30%	Más realista
ROI anual	N/A	67.3%	89.7%	+22.4 pp

Fuente: Elaboración propia. Resultados comparativos extraídos de las simulaciones de escenarios, disponibles en *data/holbox-comparison.csv*.

Esta comparación demuestra que aunque el Escenario 3 logra resultados operacionales comparables, el Escenario 8 es estratégicamente superior por combinar **menor costo (-16%)**, **mayor robustez (+25% capacidad de transporte)**, y **menor riesgo de implementación** (metas de separación más conservadoras).

Superioridad del Escenario 8: El análisis multicriterio confirma que aunque Escenario 3 alcanza mayor recuperación formal, **Escenario 8 es estratégicamente superior** por tres razones clave:

- 1. Mayor Rentabilidad:** Es **16% más barato** que Escenario 3, logrando costo neto más bajo con ahorro anual de **3.47 millones MXN** para el municipio.

2. Mayor Robustez: Capacidad de transporte ligeramente aumentada proporciona margen de seguridad que Escenario 3 no posee, crítico para estabilidad durante picos estacionales.

3. Menor Riesgo de Implementación: Metas de separación más realistas aumentan probabilidad de éxito en fases iniciales.

5.7 Sinergias Sistémicas del Escenario 8

El éxito del Escenario 8 radica en tres sinergias fundamentales identificadas en su configuración detallada (**Anexo C.2.3**):

Sinergia Logística-Valorización: El compostaje procesa 10.6 ton/día de orgánicos, reduciendo la carga sobre transporte en **35%**, mientras que el incremento moderado de capacidad (12.0 vs 9.6 ton/día) proporciona un colchón de seguridad del **26%** para absorber picos estacionales.

Sinergia Educación-Incentivos: Los tres programas de separación (educativo + incentivos + contenedores) operan sinérgicamente, logrando tasas efectivas de separación de **40%** combinadas versus 15-25% individuales, con ROI conjunto de **3.3:1**.

Sinergia Económica-Ambiental: Los ingresos por valorización (compost + materiales reciclables) de **7,240 MXN/día** compensan **65%** de los costos operacionales adicionales, mientras eliminan **85.7%** del inventario acumulado que genera impactos ambientales negativos.

5.8 Análisis de Viabilidad de Implementación

Requerimientos de Inversión: El Escenario 8 requiere inversión total de **3.87 millones MXN** distribuida en: **1.2M** infraestructura de compostaje, **1.8M** mejoras de transporte, **0.87M** programas de separación. Esta inversión es **financieramente viable** con período de recuperación de 13.4 meses.

Factibilidad Técnica: Las tecnologías propuestas (compostaje aerobio, separación en fuente) son **probadas y apropiadas** para escala insular. No requieren innovaciones tecnológicas ni conocimiento especializado extremo, facilitando implementación y mantenimiento locales.

Sostenibilidad Institucional: La configuración genera **capacidad institucional incremental** al municipio, posicionando a Holbox como centro de referencia para gestión de residuos en destinos insulares del Caribe Mexicano.

Los requerimientos técnicos específicos, cronograma de 18 meses, y estructura de financiamiento (municipal 40%, federal 35%, privado 25%) se detallan en el **Anexo E**, confirmando la viabilidad práctica de la implementación con recuperación de inversión en 13.4 meses.

5.9 Implicaciones Estratégicas

Transformación vs Optimización: Los resultados confirman que el sistema de Holbox requiere **transformación sistémica** en lugar de optimizaciones marginales. Escenarios de optimización individual (4, 6, 7) fallan en resolver la problemática fundamental.

Valorización como Estrategia Central: La evidencia cuantitativa establece que **valorización local es estrategia económica superior** a expansión logística.

Escenarios centrados en valorización (2, 3, 8) consistentemente superan alternativas logísticas puras.

Integralidad como Requisito: La superioridad del Escenario 8 demuestra que soluciones exitosas deben abordar **múltiples variables críticas simultáneamente**. Enfoques unidimensionales resultan insuficientes para contextos con restricciones sistémicas severas.

Replicabilidad Insular: La metodología y configuración del Escenario 8 establecen **modelo replicable** para otros SIDS del Caribe Mexicano, proporcionando base para políticas públicas regionales de gestión de residuos.

6 RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

6.1 Hallazgo Central - La Valorización como Estrategia de Rescate Sistémico

El análisis comparativo de los 8 escenarios reveló un hallazgo fundamental: **la valorización de residuos orgánicos mediante compostaje es la palanca de transformación más poderosa para rescatar el sistema de gestión de Isla Holbox.** Los escenarios con valorización (E2, E3, E5, E8) logran reducciones del inventario acumulado de entre 67% y 86%, mientras que las intervenciones puramente logísticas apenas alcanzan 37% de reducción.

El mecanismo clave es el **desacoplamiento de la sostenibilidad del sistema de la costosa capacidad de transporte.** Al procesar localmente entre 9.8 y 10.6 ton/día de residuos orgánicos, la valorización elimina este volumen del flujo que requiere transporte, reduciendo la demanda hasta en un **60.1%** y transformando un costo en una fuente de ingresos de 2,771-3,164 MXN/día.

6.2 Superioridad del Escenario 8 - Análisis Multicriterio

TABLA 6.1: Matriz Comparativa de Escenarios Críticos

INDICADOR	ESC-1	ESC-3	ESC-8	MEJORA E8
Inventario Final (ton)	350.0	57.4	50.0	85.7% ↓
Costo Neto (MXN/día)	23,256	16,368	13,752	40.8% ↓
Recuperación (ton/día)	2.52	4.42	4.01	59.1% ↑
Capacidad Transporte	9.5	9.5	12.0	26.3% ↑

Fuente: Elaboración propia. Síntesis de resultados clave obtenidos del archivo de comparación data/holbox-comparison.csv.

El **Escenario 8** es estratégicamente superior por tres razones clave:

- 1. Mayor Rentabilidad:** Es **16% más barato** que el Escenario 3, logrando el costo neto más bajo (**13,752 MXN/día**), representando un ahorro anual de **3.47 millones MXN**.
- 2. Mayor Robustez Operacional:** No solo reduce el inventario final a **50 toneladas** (12.9% mejor que E3), sino que su capacidad de transporte aumentada (12 ton/día) proporciona un **colchón de seguridad del 26%** para absorber picos de generación.
- 3. Menor Riesgo de Implementación:** Requiere metas de separación más realistas (12-30%) versus el Escenario 3 (25-40%), reduciendo la dependencia de cambios de comportamiento intensivos.

6.3 Viabilidad Económica y Cronograma de Implementación

6.3.1 Viabilidad Económica Excepcional

La viabilidad económica del **Escenario 8** es excepcional con **inversión total de 3.87 millones MXN** distribuida estratégicamente (ver **Anexo E.2**):

TABLA 6.2: Distribución de Inversión Escenario 8

COMPONENTE	INVERSIÓN	% TOTAL	ROI INDIVIDUAL
Infraestructura Compostaje	1.20M MXN	31.0%	2.8:1
Mejoras de Transporte	1.80M MXN	46.5%	1.9:1
Programas Separación	0.87M MXN	22.5%	3.3:1
TOTAL	3.87M MXN	100%	Promedio: 2.7:1

Fuente: Elaboración propia. Desglose de costos y análisis de ROI basados en los parámetros económicos definidos en el módulo src/simulation/modules/economics.ts.

Métricas de Rentabilidad: - **Período de recuperación:** 13.4 meses - **ROI anual:** 89.7% - **Ahorro anual vs. sistema actual:** 3.47 millones MXN - **Flujo de caja positivo:** A partir del mes 14

6.3.2 Cronograma Ejecutivo de Implementación

El **cronograma de implementación ejecutivo** se presenta en el **Anexo E.1**, estructurado en **4 fases estratégicas** distribuidas en **18 meses**:

TABLA 6.3: Fases Críticas de Implementación

FASE	DURACIÓN	HITOS CRÍTICOS	CRITERIOS DE ÉXITO
FASE 1	Meses 0-6	Aseguramiento y Pilotaje	Inversión asegurada + Pilotos operando
FASE 2	Meses 6-12	Construcción e Infraestructura	Infraestructura operativa
FASE 3	Meses 12-18	Marco Regulatorio y Operación Plena	Sistema estabilizado
FASE 4	Meses 18+	Consolidación y Mejora Continua	Sistema optimizado

Fuente: Elaboración propia. Cronograma de implementación propuesto, derivado del análisis de viabilidad del Escenario 8.

Actividades de la Ruta Crítica: 1. **Aseguramiento financiero** (Meses 1-4):

Sin recursos, proyecto no procede 2. **Construcción planta compostaje** (Meses 7-11):

Cuello de botella técnico principal

3. **Escalamiento separación** (Meses 8-12): Requiere adopción masiva sector privado

6.4 Contribución Metodológica

Esta investigación desarrolló y validó:

1. **Modelo de Simulación Dinámico:** Específicamente diseñado para contextos insulares, alcanzando un error promedio del 6.0% y balance de masa perfecto.
2. **Métrica de Impacto Sistémico:** La “Reducción de Volumen para Transporte” supera las limitaciones de indicadores tradicionales en sistemas fallidos, proporcionando una herramienta cuantitativa para evaluar soluciones integrales.

3. Metodología de Análisis de Sensibilidad: Identificó las variables críticas que dominan el comportamiento del sistema: transporte (30.7%), costos operacionales (11.9%) y generación restaurantera (11.5%).

6.5 Recomendaciones Estratégicas

6.5.1 RECOMENDACIÓN 1 (Inmediata): Adoptar el Escenario 8 como Plan Rector

Adoptar formalmente el Escenario 8 como plan estratégico para modernización del sistema de GIRS. Esta decisión debe ser ratificada por el Cabildo para oficializar el compromiso y asignar un responsable municipal con autoridad ejecutiva.

Justificación: El análisis cuantitativo demuestra superioridad económica (costo neto 40.8% menor) y operacional (inventario 85.7% menor) con el menor riesgo de implementación.

6.5.2 RECOMENDACIÓN 2 (Corto Plazo: 0-6 meses): Asegurar Inversión e Iniciar Programas Piloto

Gestión Financiera: Asegurar la inversión de **3.87M MXN mediante esquema de financiamiento mixto**: - **Municipal (40%)**: 1.55M MXN - Recursos propios + crédito - **Federal (35%)**: 1.35M MXN - SEMARNAT/SEDATU programas ambientales

- **Privado (25%)**: 0.97M MXN - Sector hotelero/turístico como inversión estratégica

Programas Piloto: Lanzar programas piloto de separación con 15 hoteles y restaurantes líderes, targeting **30% tasa de separación** como demostración de viabilidad.

6.5.3 RECOMENDACIÓN 3 (Mediano Plazo: 6-18 meses): Desarrollar Marco

Regulatorio e Infraestructura

Marco Normativo: Crear regulación facilitadora de economía circular: - Reglamento para comercialización del compost producido - Ordenanza de incentivos fiscales para participantes del programa de separación - Normativa de calidad para productos de valorización

Infraestructura: Los requerimientos de inversión detallados (ver Anexo

E.2) totalizan las siguientes especificaciones críticas: - **Planta de compostaje:** 12 ton/día capacidad, tecnología aerobia con aireación forzada - **Sistema de transporte:** Incremento a 12 ton/día (+25% capacidad actual) - **Infraestructura de separación:** 626 establecimientos con contenedores diferenciados

6.5.4 RECOMENDACIÓN 4 (Largo Plazo: 18+ meses): Mejora Continua y

Transferencia

Optimización Continua: Implementar programa de evaluación trimestral con **8 KPIs operacionales** y ajustes paramétricos basados en datos reales de operación.

Transferencia de Conocimiento: Documentar metodología y resultados para replicación en otros SIDS del Caribe Mexicano, posicionando a Holbox como centro de referencia regional.

Expansión Tecnológica: Evaluar integración de tecnologías complementarias (biogás, pirólisis) conforme el sistema base alcance estabilidad operacional.

6.6 Análisis de Riesgos y Mitigación

6.6.1 Riesgos Críticos Identificados

Riesgo Financiero (ALTO): - **Descripción:** Retraso en obtención de 3.87M MXN - **Mitigación:** Diversificación de fuentes, pre-compromisos escritos de sector privado - **Contingencia:** Implementación por fases con presupuesto reducido iniciando con programas de separación (ROI 3.3:1)

Riesgo de Adopción (MEDIO): - **Descripción:** Resistencia del sector privado a programas de separación - **Mitigación:** Incentivos económicos tangibles, campañas de concientización, certificaciones de sustentabilidad - **Contingencia:** Regulación obligatoria con sanciones graduales

6.6.2 Factores Críticos de Éxito

Liderazgo Municipal Comprometido: Designación de Coordinador de GIRS con autoridad ejecutiva y equipo dedicado mínimo 3 personas tiempo completo.

Participación Activa Sector Privado: Engagement desde diseño detallado con beneficios tangibles y reconocimientos de sustentabilidad.

Monitoreo y Adaptación Continua: KPIs mensuales, reuniones trimestrales con stakeholders clave, y flexibilidad para ajustes paramétricos.

6.7 Replicabilidad Insular

La metodología y configuración del **Escenario 8** establecen un **modelo replicable para otros SIDS del Caribe Mexicano**, proporcionando base para políticas públicas regionales de gestión de residuos. El enfoque sinérgico entre valorización local

y optimización moderada del transporte ofrece un marco de solución aplicable a contextos insulares similares.

Elementos Transferibles: - **Marco metodológico:** Simulación dinámica con validación empírica - **Configuración tecnológica:** Compostaje aerobio + separación en fuente + transporte optimizado - **Modelo financiero:** Esquema mixto público-privado con ROI demostrado

6.8 Cumplimiento de Objetivos

Los cinco objetivos planteados fueron cumplidos integralmente:

1. **Modelo cuantitativo desarrollado y validado** (error 6.0%, balance perfecto)
2. **Variables críticas identificadas** mediante análisis de sensibilidad riguroso
3. **8 escenarios diseñados y evaluados** sistemáticamente
4. **Recomendaciones específicas formuladas** basadas en evidencia cuantitativa
5. **Base para implementación práctica** establecida con cronograma y financiamiento

El **Escenario 8** emerge como la solución integral que resuelve simultáneamente los problemas operacionales, económicos y ambientales, estableciendo un sistema robusto, económicamente viable y operacionalmente sostenible para Isla Holbox.

6.9 Impacto y Proyección

Impacto Económico: Transformación de un sistema deficitario (23,256 MXN/día pérdida) en sistema rentable (13,752 MXN/día costo neto), generando **ahorro municipal de 9.5 MXN por cada peso invertido anualmente.**

Impacto Ambiental: Reducción del 85.7% en inventario acumulado elimina riesgos de contaminación marina y terrestre, preservando el ecosistema que sustenta la economía turística local.

Impacto Social: Generación de **empleos verdes locales** en operación de compostaje y programas de separación, mientras mejora la calidad de vida de residentes y experiencia de visitantes.

La implementación exitosa del Escenario 8 posiciona a Isla Holbox como **modelo de gestión sustentable para destinos insulares**, demostrando que la transformación sistémica es técnicamente viable, económicamente rentable, y ambientalmente necesaria.

ANEXO A: GLOSARIO DE TÉRMINOS

A.1 Términos Técnicos Escenciales

- **Análisis de Sensibilidad:** Técnica cuantitativa que identifica las variables críticas que mayor impacto tienen en el rendimiento sistémico. En este estudio, reveló que la capacidad de transporte es la variable más crítica (85% de influencia en el inventario acumulado).
- **Balance de Masa:** Principio de conservación que establece que la masa que entra a un sistema debe ser igual a la masa que sale más la masa que se acumula. Fundamental para la validación del modelo de simulación (error <0.01%).
- **Cuello de Botella (Bottleneck):** Etapa de un proceso que tiene la menor capacidad y limita el rendimiento general del sistema. En Holbox es la capacidad de transporte continental (9.6 ton/día vs. 47.6 ton/día generadas).
- **Déficit de Transporte:** Diferencia cuantitativa entre residuos que necesitan transportarse y la capacidad real disponible. En el escenario base: 79.6% de déficit sistémico.
- **GIRS (Gestión Integral de Residuos Sólidos):** Enfoque holístico para el manejo de residuos considerando todas las etapas desde generación hasta disposición final, incluyendo valorización y tratamiento.
- **Inventario Acumulado:** Cantidad total de residuos almacenados en el sistema que no han podido ser procesados o transportados. KPI crítico: 894.7 toneladas en escenario base vs. 132.8 toneladas en escenario óptimo.

- **KPI (Indicador Clave de Rendimiento):** Métrica cuantificable para evaluar rendimiento del sistema. Los 8 KPIs principales incluyen: inventario acumulado, costo neto, ROI, tiempo de recuperación, emisiones, empleo generado.
- **Modelo Determinístico:** Modelo matemático donde para un conjunto dado de entradas se produce siempre la misma salida, sin componentes de aleatoriedad. Permite reproducibilidad exacta de resultados.
- **SIDS (Small Island Developing States):** Pequeños Estados Insulares en Desarrollo que enfrentan desafíos similares de gestión de residuos: limitaciones de transporte, alta estacionalidad turística, capacidades tecnológicas restringidas.
- **Valorización:** Cualquier proceso que permite reaprovechamiento de residuos a través de reciclaje (valorización material) o recuperación de energía. El compostaje es valorización material con 65% de eficiencia en el modelo.

A.2 Variables Críticas del Modelo

Variables de Generación

- **Tasa hotelera:** 2.1 kg/unidad/día (validado empíricamente)
- **Tasa gastronómica:** 46.7 kg/unidad/día (mayor generador por unidad)
- **Factor estacional:** 2.8x variación entre temporada alta y baja

Variables de Capacidad

- **Capacidad de transporte:** 9.6 ton/día (cuello de botella crítico)

- **Capacidad de recolección:** 15.0 ton/día (suficiente)
- **Capacidad de compostaje:** Variable por escenario (0-20 ton/día)

Variables Económicas

- **Costo de transporte:** 2,600 MXN/tonelada (mayor componente de costo)
- **Precio de compost:** 800 MXN/tonelada (ingreso principal)
- **Costo de disposición:** 200 MXN/tonelada

Parámetros de Composición

- **Orgánicos hoteles:** 46% (alta variabilidad estacional)
- **Orgánicos restaurantes:** 52% (composición más estable)
- **Reciclables totales:** 28% promedio del flujo

A.3 Siglas y Acerónimos Principales

- **CSO:** Costo Sin Optimizar - Costo del sistema actual antes de mejoras
- **GIRS:** Gestión Integral de Residuos Sólidos
- **KPI:** Key Performance Indicator (Indicador Clave de Rendimiento)
- **MXN:** Moneda Nacional Mexicana (Pesos)
- **ROI:** Return on Investment (Retorno sobre Inversión)
- **RSU:** Residuos Sólidos Urbanos
- **SIDS:** Small Island Developing States
- **SUMA:** Consultora ambiental que proporcionó datos empíricos (2022)
- **ton/día:** Toneladas por día (unidad de flujo másico)

A.4 Terminología Específica del Simulador

- **Escenarios de Mejora:** Configuraciones paramétricas que representan diferentes estrategias de optimización. 8 escenarios evaluados desde intervenciones mínimas hasta solución integral.
- **Período de Simulación:** 30 días por escenario para capturar dinámicas operacionales completas y variabilidad estacional.
- **Tasa de Éxito de Validación:** Porcentaje de KPIs que pasan criterio de error relativo <25%. Modelo logra 100% (8/8 KPIs validados).
- **Validador de Conservación de Masa:** Sistema automático que verifica integridad física del modelo en cada iteración, garantizando balance exacto de entradas-salidas-acumulación.

A.5 CONTEXTO INSULAR ESPECÍFICO

- **Estacionalidad Extrema:** Variación 2.8x en generación entre temporada alta (diciembre-abril) y baja (mayo-noviembre) debido a flujo turístico.
- **Limitación Continental:** Restricción física de transporte por distancia (30 km) y disponibilidad logística limitada a ferry con capacidad fija.
- **Generación Diferenciada:** Tres sectores principales con patrones distintos: hotelero (volumen alto, composición variable), gastronómico (densidad alta, 52% orgánicos), residencial (patrón estable).

Referencia Digital: Glosario completo disponible en: <https://github.com/ramphastoslangosta/waste-simulator/docs/glossary.md>

ANEXO B: FORMULARIO MATEMÁTICO ESENCIAL

B.1 Ecuaciones Fundamentales del Modelo

Ecuación (B.1) - Generación Total por Día [CRÍTICA]

$$G_{\text{total}}(t) = \sum_{i=1}^n (U_i \times R_i \times O_i(t)) \quad (\text{Ec.B.1})$$

Descripción: Calcula la generación diaria total como suma de todas las fuentes generadoras, ajustada por variaciones estacionales de ocupación turística.

Variables críticas identificadas por análisis de sensibilidad:

- $R_{\text{restaurantes}} = 46.7 \text{ kg/unidad/día}$ (Rank #3 en impacto sistémico: 11.5%)
- $R_{\text{hoteles}} = 2.1 \text{ kg/unidad/día}$ (Rank #5 en impacto sistémico: 5.2%)
- $O_{\text{alta}}(t) = 2.8 \times O_{\text{baja}}(t)$ (Rank #4 en impacto sistémico: 5.2%)

Ecuación (B.2) - Restricción de Transporte Final [CUELLO DE BOTELLA]

$$\text{Transport}_{\text{real}}(t) = \min(\text{Demanda}_{\text{transport}}(t), 9.6) \quad (\text{Ec.B.2})$$

VARIABLE MÁS CRÍTICA DEL SISTEMA

- Impacto promedio ponderado: **30.7%** (Rank #1)
- Sensibilidad en utilización de capacidad: **80.97%**
- Genera déficit sistémico del **79.6%** en escenario base

Ecuación (B.3) - Acumulación Forzada [EFFECTO DEL CUELLO DE BOTELLA]

$$Acumul_{forzada}(t) = \max(0, Demanda_{transport}(t) - 9.6)qquad(Ec.B.3)$$

Resultado crítico: 894.7 toneladas acumuladas en 30 días (escenario base)

Ecuación (B.4) - Costo Neto del Sistema [KPI PRINCIPAL]

$$C_{neto}(t) = C_{total}(t) - I_{total}(t)qquad(Ec.B.4)$$

Donde:

$$C_{total}(t) = C_{recolec}(t) + C_{transport}(t) + C_{disposic}(t) + C_{valoriz}(t)$$

$$I_{total}(t) = \sum_{m \text{ valorizables}} (Rec_{formal,m}(t) \times P_{venta,m}) + Prod_{valoriz}(t) \times P_{producto}$$

B.2 Validación de Conservación de Masa

Ecuación (B.5) de Balance de Conservación de Masa [VALIDACIÓN FÍSICA]

$$G_{total} = Material_{dispuesto} + Material_{recuperado} + Material_{valorizado} + Fugas_{total} + \\ Deficit_{recolección} + Deficit_{transporte}qquad(Ec.B.5)$$

Resultados de validación logrados:

- Error promedio: **0.005%** ✓
- Error máximo: **0.011%** ✓
- Cumplimiento: **100%** ✓

B.3 Parámetros Críticos del Sistema

Variables de Capacidad

Tabla B.1: Parámetros Críticos de Capacidad del Sistema

Símbolo	Descripción	Valor Crítico
Cap _{transport}	Capacidad de transporte	9.6 ton/día
Cap _{recolec}	Capacidad de recolección	15.0 ton/día
Cap _{valoriz}	Capacidad de valorización	Variable por escenario

Fuente: Elaboración propia. Parámetros de entrada del simulador (*src/constants/initialState.js*), calibrados y validados con datos del estudio SUEMA (2022) (*data/holbox-historical-data.csv*).

Tasas de Generación Validadas

Tabla B.2: Tasas de Generación Validadas por Sector

Símbolo	Descripción	Valor SUMA 2022
R _{hoteles}	Tasa hotelera	2.1 kg/unidad/día
R _{restaurantes}	Tasa gastronómica	46.7 kg/unidad/día
R _{residencial}	Tasa residencial	1.2 kg/persona/día

Fuente: Datos empíricos del estudio de caracterización SUEMA (2022), utilizados como parámetros de entrada en data/holbox-historical-data.csv.

Tabla B.3: Parámetros Económicos Clave

Parámetros Económicos

Símbolo	Descripción	Valor
$P_{transporte}$	Costo de transporte	2,600 MXN/ton
$P_{compost}$	Precio de compost	800 MXN/ton
$P_{disposicion}$	Costo de disposición	200 MXN/ton

Fuente: Elaboración propia. Parámetros económicos base para el motor de simulación, definidos en src/simulation/modules/economics.ts.

B.4 Métricas de Validación del Modelo

Criterios de Aceptación

- **Error de conservación de masa:** < 0.01% ✓
- **Error empírico por KPI:** < 25% ✓
- **Tasa de validación:** 100% (8/8 KPIs) ✓

Jerarquía de Variables por Análisis de Sensibilidad

1. **Capacidad de Transporte Final:** 30.7% impacto (CRÍTICO)
2. **Costo de Recolección:** 11.9% impacto (ALTO)
3. **Tasa de Generación Restaurantes:** 11.5% impacto (ALTO)

REFERENCIA DIGITAL COMPLETA

Formulario matemático extendido con todas las ecuaciones, algoritmos detallados y pseudocódigo completo disponible en: <https://github.com/ramphastoslangosta/waste-simulator/docs/mathematical-formulation.md>

ANEXO C: CONFIGURACIÓN DE ESCENARIOS CLAVE

C.1 Matriz Comparativa De Parámetros Críticos

Tabla C.1: Configuración de Variables Críticas por Escenario

TRANSPORTE

PARÁMETRO CRÍTICO	ESC-1	ESC-2	ESC-3	ESC-4	ESC-5	ESC-6	ESC-7	ESC-8
Capacidad Final (ton/día)	9.6	9.6	9.6	15.0	15.0	9.6	9.6	12.0
Incremento vs. Base	0%	0%	0%	+56%	+56%	0%	0%	+25%

COMPOSTAJE

PARÁMETRO CRÍTICO	ESC-1	ESC-2	ESC-3	ESC-4	ESC-5	ESC-6	ESC-7	ESC-8
Habilitado	No	Si	Si	No	Si	No	No	Si
Eficiencia (%)	-	80%	80%	-	75%	-	-	78%
Costo (MXN/ton)	-	200	200	-	200	-	-	200

SEPARACIÓN EN FUENTE

PARÁMETRO CRÍTICO	ESC-1	ESC-2	ESC-3	ESC-4	ESC-5	ESC-6	ESC-7	ESC-8
Hoteles (%)	25%	25%	35%	25%	25%	25%	25%	35%
Restaurantes (%)	15%	15%	25%	15%	15%	35%	15%	30%
Hogares (%)	5%	5%	10%	5%	5%	5%	5%	12%
Comercios (%)	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	40%

GENERACIÓN

PARÁMETRO CRÍTICO	ESC-1	ESC-2	ESC-3	ESC-4	ESC-5	ESC-6	ESC-7	ESC-8
Restaurantes (kg/unid/día)	114.2	114.2	114.2	114.2	114.2	91.4	114.2	100.0
Reducción vs. Base	0%	0%	0%	0%	0%	-20%	0%	-12.4%

COSTOS

PARÁMETRO CRÍTICO	ESC-1	ESC-2	ESC-3	ESC-4	ESC-5	ESC-6	ESC-7	ESC-8
Recolección (MXN/ton)	800	800	800	800	800	800	600	700
Reducción vs. Base	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-25%	-12.5%

Fuente: Elaboración propia. Extraído del archivo docs/escenarios-validation-sistema-COMPLETO-2025-08-21.csv.

C.2 Configuración Completa Del Escenario 8 Óptimo

ESCENARIO-8: SOLUCIÓN INTEGRAL MODERADA

Descripción: Implementación equilibrada de múltiples intervenciones con enfoque realista que logra el mejor balance costo-efectividad.

C.2.1 Parámetros Distintivos del Escenario 8

Optimización Logística:

- **Capacidad transporte final:** 12.0 ton/día (+25% vs. base)
- **Justificación:** Incremento moderado que proporciona flexibilidad para picos sin sobrecostos excesivos

Valorización (Compostaje):

- **Compostaje habilitado:** Sí
- **Eficiencia conversión:** 78% (optimizada)
- **Capacidad procesamiento:** 12 ton/día
- **Costo operación:** 200 MXN/ton
- **Ingresos compost:** 500 MXN/ton
- **ROI compostaje:** 3.3:1

Separación en Fuente Mejorada:

Tabla C.2: Metas de Separación en Fuente para el Escenario 8

Sector	Separación Base	Separación Mejorada	Incremento
Hoteles	25%	35%	+10 pp
Restaurantes	15%	30%	+15 pp
Hogares	5%	12%	+7 pp
Comercios	30%	40%	+10 pp

Fuente: Elaboración propia. Configuración paramétrica del Escenario 8, detallada en docs/escenarios-validation-sistema-COMPLETO-2025-08-21.csv.

Optimización de Generación:

- **Tasa restaurantes:** 100.0 kg/unidad/día (-12.4% vs. base)
- **Mecanismo:** Programas de reducción de desperdicio alimentario
- **Resto de sectores:** Sin cambios vs. base

Optimización Económica:

- **Costo recolección:** 700 MXN/ton (-12.5% vs. base)
- **Mecanismo:** Eficiencias operacionales por rutas optimizadas

C.2.2 Programas de Separación del Escenario 8

Programa Educativo:

- **Población objetivo:** 2,673 habitantes + 626 establecimientos
- **Impacto por sector:**
 - Hoteles: +12% separación
 - Restaurantes: +18% separación
 - Hogares: +20% separación

- Comercios: +8% separación
- **Costo:** 45 MXN/habitante/mes
- **Inversión anual:** 1.44 millones MXN

Programa de Incentivos:

- **Mecanismo:** Compensación económica por material separado
- **Impacto por sector:**
 - Hoteles: +18% separación
 - Restaurantes: +22% separación
 - Hogares: +25% separación
 - Comercios: +12% separación
- **Costo:** 180 MXN/ton material recuperado
- **ROI esperado:** 2.8:1

Programa de Contenedores:

- **Infraestructura:** Contenedores diferenciados por material
- **Impacto por sector:**
 - Hoteles: +8% separación
 - Restaurantes: +12% separación
 - Hogares: +15% separación
 - Comercios: +6% separación
- **Costo:** 280 MXN/unidad
- **Inversión total:** 420,000 MXN

C.2.3 Resultados del Escenario 8

KPIs Principales Logrados:

- **Inventario acumulado:** 50.0 toneladas (-85.7% vs. base)
- **Costo neto sistema:** 13,752 MXN/día (mínimo de todos los escenarios)
- **Recuperación formal:** 4.01 ton/día (+59% vs. base)
- **Utilización capacidad:** 12.9% (sistema balanceado)
- **ROI total:** 89.7% anual
- **Tiempo recuperación:** 13.4 meses

Sinergias Identificadas:

1. **Logística-Valorización:** Compostaje reduce carga transporte en 35%
2. **Educación-Incentivos:** Programas combinados logran 40% separación efectiva
3. **Costo-Beneficio:** Ingresos por materiales compensan 65% costos operacionales

C.3 Diferencias Críticas Vs. Otros Escenarios

C.3.1 Escenario 8 vs. Escenario 3 (Segundo mejor)

Tabla C.3: Comparativa Estratégica: Escenario 8 vs. Escenario 3

Aspecto	Escenario 3	Escenario 8	Ventaja E8
Costo neto	16,368 MXN/día	13,752 MXN/día	-16% costo
Transporte	9.6 ton/día	12.0 ton/día	+25% seguridad
Separación requerida	25-35%	12-30%	Más realista
Complejidad	Alta	Moderada	Menor riesgo

Fuente: Elaboración propia. Análisis comparativo basado en los resultados de la simulación, disponibles en *data/holbox-comparison.csv*.

C.3.2 Escenario 8 vs. Escenario 4 (Solo transporte)

Tabla C.4: Comparativa de Desempeño: Escenario 8 vs. Escenario 4

Aspecto	Escenario 4	Escenario 8	Ventaja E8
Inventario	220.6 ton	50.0 ton	-77% acumulación
Costo neto	27,792 MXN/día	13,752 MXN/día	-51% costo
Ingresos	Ninguno	7,240 MXN/día	Autosostenible
Sustentabilidad	Baja	Alta	Circular

Fuente: Elaboración propia. Análisis de resultados extraídos del archivo de comparación de escenarios *data/holbox-comparison.csv*.

REFERENCIA DIGITAL COMPLETA Dataset completo con 112 parámetros para cada escenario, instrucciones de replicación, y trazabilidad de fuentes

disponibles en: <https://github.com/ramphastoslangosta/waste-simulator/tree/main/data/escenarios-validation-sistema-COMPLETO-2025-08-21.csv>

ANEXO D: VALIDACIÓN DEL MODELO RESUMIDA

D.1 VALIDACIÓN EMPÍRICA PRINCIPAL

Criterio: Error relativo máximo <25% | **Período:** Temporada alta turística

Tabla D.1: Validación Modelo vs. Datos Reales SUEMA 2022

KPI	Predicción Modelo	Dato Empírico SUMA	Error Relativo	Estado
Generación Total RSU	27.70 ton/día	28.5 ± 2.1 ton/día	2.8%	Excelente
Material Recolectado	27.70 ton/día	26.8 ± 1.8 ton/día	3.4%	Excelente
Capacidad Transporte	9.60 ton/día	9.6 ton/día	0.0%	Perfecto
Material Procesado	23.45 ton/día	24.2 ± 2.0 ton/día	3.1%	Excelente
Recuperación Total	2.52 ton/día	2.1 ± 0.4 ton/día	20.0%	Aceptable
Inventario Acumulado	350.0 ton (30 días)	320 ± 45 ton	9.4%	Excelente
Costo Operacional	28,276 MXN/día	$26,800 \pm 3,200$ MXN/día	5.5%	Excelente
Disposición Final	9.22 ton/día	8.9 ± 1.1 ton/día	3.6%	Excelente

Fuente: Elaboración propia. Comparación de los resultados del simulador con los datos de data/holbox-historical-data.csv.

Métricas de Robustez del Modelo

- **Tasa de Validación Exitosa:** 100% (8 de 8 KPIs dentro del criterio)

- **Error Promedio Ponderado:** 6.0% (muy inferior al umbral de 25%)
- **Precisión Excelente:** 7 de 8 KPIs con error <10%

D.2 Jerarquía De Variables Críticas

Metodología: 29 simulaciones (1 base + 28 variaciones) con variaciones $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$

Tabla D.2: Ranking de Impacto Sistémico - Análisis de Sensibilidad

Rank	Variable Crítica	Impacto Promedio	Nivel	KPI Más Sensible
1	Capacidad Transporte Final	30.7%	Crítico	Utilización Capacidad (80.97%)
2	Costo de Recolección	11.9%	Alto	Costo Neto Sistema (41.20%)
3	Tasa Generación Restaurantes	11.5%	Alto	Utilización Capacidad (22.29%)
4	Ocupación Temporada Alta	5.2%	Moderado	Impacto distribuido
5	Tasa Generación Hoteles	5.2%	Moderado	Impacto distribuido
6	Tasa de Fuga Recolección	3.0%	Menor	Recuperación Total (4.50%)
7	Población Fija	1.9%	Menor	Sensibilidad mínima

Fuente: Elaboración propia. Resultados del análisis de sensibilidad, disponibles en *data/sensitivity-summary-results.csv*.

Implicaciones Estratégicas

Dominancia del Cuello de Botella: La capacidad de transporte (30.7% impacto) es la variable más crítica por amplio margen, confirmando que cualquier solución viable debe prioritariamente abordar la cantidad de material que requiere transporte continental.

Palancas Económicas: Después de logística, las variables más influyentes son costo de recolección (11.9%) y generación restaurantera (11.5%), sugiriendo que intervenciones costo-efectivas deben enfocar reducción de volúmenes en origen y optimización operacional.

D.3 Verificación De Integridad Física

Conservación de Masa Verificada

Tabla D.3: Resultados de la Verificación de Conservación de Masa

Métrica	Resultado	Criterio	Estado
Error Conservación Promedio	0.005%	<1.0%	Válido
Error Máximo Observado	0.011%	<1.0%	Válido
Cumplimiento del Criterio	100%	>95%	Válido

Fuente: Elaboración propia. Resultados generados por el sistema de validación automática del simulador, definido en `src/test/validation/massConservation.test.js`.

Confirmación: El modelo no crea ni destruye masa, cumpliendo principios fundamentales de la física con error numérico inferior al 0.01%.

D.4 Calibración Paramétrica Crítica

Ajuste Empírico Clave

Discrepancia Detectada:

- Estimación inicial: Capacidad transporte = 10.0 ton/día
- Medición SUEMA 2022: Capacidad transporte = 9.6 ton/día
- **Corrección aplicada:** -0.4 ton/día (-4.0% ajuste)

Impacto Sistémico: Esta corrección de un único parámetro incrementó la predicción de inventario acumulado en 13 toneladas, demostrando la sensibilidad sistemática al cuello de botella identificado.

Decisión Metodológica: Priorización sistemática del dato empírico sobre estimaciones teóricas, garantizando que las conclusiones reflejen condiciones reales.

D.5 Síntesis De Validación

Confirmación de Robustez Científica

Tres Pilares Validados:

1. **Validación Empírica:** 100% tasa éxito, 6.0% error promedio
2. **Integridad Física:** 0.005% error conservación masa
3. **Sensibilidad Paramétrica:** Jerarquía consistente con teoría sistemática

Credibilidad Establecida: El modelo demuestra ser base robusta y científicamente sólida para análisis de escenarios y toma de decisiones.

Aplicabilidad Práctica: La convergencia entre predicciones del modelo y datos empíricos valida que las conclusiones derivadas reflejan condiciones reales del sistema de gestión de residuos de Isla Holbox.

REFERENCIA DIGITAL COMPLETA Protocolos detallados de validación, datasets de sensibilidad, y reportes de verificación disponibles en: <https://github.com/ramphastoslangosta/waste-simulator/docs/validation-protocols.md>

ANEXO E: PLAN DE IMPLEMENTACIÓN EJECUTIVO

E.1 Cronograma Ejecutivo De Implementación

Fases Estratégicas de Implementación

La implementación del Escenario 8 se estructura en **4 fases secuenciales** distribuidas en **18 meses** para minimizar riesgos y asegurar adopción gradual del nuevo sistema.

Tabla E.1: Cronograma Ejecutivo de Hitos Críticos

FASE	DURACIÓN	HITOS CRÍTICOS	RESPONSABLES	CRITERIOS DE ÉXITO
FASE 1	Meses 0-6	Aseguramiento y Pilotaje	Municipio + Sector Privado	Inversión asegurada + Pilotos operando
• Decisión Cabildo	Mes 1	Ratificación formal Escenario 8	Cabildo Municipal	Acuerdo oficial publicado
• Aseguramiento Financiero	Meses 1-4	Obtención 3.87M MXN	Tesorería + Gestión	100% recursos comprometidos
• Programas Piloto	Meses 2-6	Separación en 15 hoteles/ restaurantes	Coordinador GIRS	30% tasa de separación
• Licitación Compostaje	Meses 3-6	Proceso completo de licitación	Obras Públicas	Contrato adjudicado

Tabla E.1: Cronograma Ejecutivo de Hitos Críticos (cont.)

FASE	DURACIÓN	HITOS CRÍTICOS	RESPONSABLES	CRITERIOS DE ÉXITO
FASE 2	Meses 6-12	Construcción e Infraestructura	Contratistas + Supervisión	Infraestructura operativa
• Construcción Planta	Meses 7-11	Compostaje 12 ton/día operativa	Contratista Principal	Pruebas de funcionamiento
• Mejoras Transporte	Meses 8-12	Capacidad 9.6→12.0 ton/día	Logística Municipal	25% aumento verificado
• Escalamiento Separación	Meses 8-12	Expansión a 45 hoteles + 99 restaurantes	Coordinador GIRS	50% establecimientos activos
FASE 3	Meses 12-18	Marco Regulatorio y Operación Plena	Legal + Operaciones	Sistema estabilizado
• Marco Normativo	Meses 13-15	Reglamentos economía circular	Jurídico Municipal	Normativa aprobada
• Operación Plena	Meses 15-18	Capacidad diseño alcanzada	Operaciones GIRS	KPIs objetivo logrados
FASE 4	Meses 18+	Consolidación y Mejora Continua	Operaciones + I+D	Sistema optimizado

Fuente: Elaboración propia.

Ruta Crítica Identificada

Actividades Críticas (Zero Slack):

1. **Aseguramiento financiero** (Meses 1-4): Sin recursos, proyecto no procede
2. **Construcción planta compostaje** (Meses 7-11): Cuello de botella técnico principal
3. **Escalamiento separación** (Meses 8-12): Requiere adopción masiva sector privado

Riesgos de Cronograma:

- **Clima:** Temporada de huracanes (junio-noviembre) puede retrasar construcción 2-4 semanas
- **Permisos:** Autorizaciones ambientales pueden extender Fase 1 hasta 2 meses
- **Adopción:** Resistencia empresarial puede retrasar Fase 2 hasta 3 meses

E.2 Presupuesto Resumido E Inversión Total

Desglose de Inversión por Componente

Inversión Total del Escenario 8: 3.87 millones MXN

Tabla E.2: Distribución de Inversión por Área

COMPONENTE	INVERSIÓN (MXN)	% TOTAL	PERÍODO DE DESEMBOLSO	ROI INDIVIDUAL
Infraestructura Compostaje	1,200,000	31.0%	Meses 4-11	2.8:1
• Terreno y preparación	300,000	7.7%	Meses 4-6	-
• Equipos y maquinaria	650,000	16.8%	Meses 7-10	-
• Instalaciones auxiliares	250,000	6.5%	Meses 9-11	-
Mejoras de Transporte	1,800,000	46.5%	Meses 6-12	1.9:1
• Vehículo adicional	800,000	20.7%	Mes 8	-
• Optimización logística	400,000	10.3%	Meses 6-9	-
• Infraestructura soporte	600,000	15.5%	Meses 8-12	-
Programas Separación	870,000	22.5%	Meses 2-18	3.3:1
• Programa educativo	480,000	12.4%	Meses 2-18	-
• Sistema de incentivos	240,000	6.2%	Meses 6-18	-
• Contenedores diferenciados	150,000	3.9%	Meses 3-12	-
TOTAL ESCENARIO 8	3,870,000	100.0%	Meses 2-18	Promedio: 2.7:1

Fuente: Elaboración propia. Basado en los costos definidos en src/simulation/modules/economics.ts.

Análisis Financiero Ejecutivo

Métricas de Viabilidad Financiera:

- **Período de recuperación:** 13.4 meses
- **ROI anual:** 89.7%
- **Ahorro anual vs. sistema actual:** 3.47 millones MXN
- **Relación beneficio-costo:** 2.7:1
- **Flujo de caja positivo:** A partir del mes 14

Eficiencia de Inversión por Área:

1. **Programas de separación:** ROI más alto (3.3:1) - **Prioridad máxima**
2. **Infraestructura compostaje:** ROI sólido (2.8:1) - **Núcleo del sistema**
3. **Mejoras transporte:** ROI conservador (1.9:1) - **Soporte necesario**

Esquema de Financiamiento Recomendado

Fuentes de Financiamiento Propuestas:

- **Municipal (40%):** 1.55M MXN - Recursos propios + crédito
- **Federal (35%):** 1.35M MXN - SEMARNAT/SEDATU programas ambientales
- **Privado (25%):** 0.97M MXN - Sector hotelero/turístico como inversión estratégica

Justificación del Esquema:

- **Diversificación de riesgo:** No dependencia de una sola fuente
- **Alineación de incentivos:** Sector privado beneficiario principal participa
- **Viabilidad política:** Carga municipal razonable (40%)

E.3 Requerimientos Técnicos Mínimos Críticos

Infraestructura de Compostaje

Especificaciones Técnicas Esenciales:

- **Capacidad:** 12 toneladas/día de residuos orgánicos
- **Tecnología:** Compostaje aerobio en pilas estáticas con aireación forzada
- **Área requerida:** 2,500 m² (procesamiento, maduración, almacenamiento)
- **Ubicación:** Zona industrial municipal, mínimo 500m de área habitacional

Componentes Críticos:

- **Sistema de aireación:** 6 sopladores de 5 HP c/u, temporizadores automáticos
- **Área de recepción:** Báscula de 20 ton, área techada 300 m²
- **Control de calidad:** Kit de pruebas pH, temperatura, humedad

Mejoras del Sistema de Transporte

Incremento de Capacidad: 9.6 → 12.0 toneladas/día (+25%)

Requerimientos de Equipamiento:

- **Vehículo adicional:** Camión compactador 8 m³ (capacidad 4 toneladas)
- **Optimización de rutas:** Software de ruteo + GPS tracking
- **Estación de transferencia:** Ampliación área de almacenamiento temporal (+50%)

Especificaciones Operacionales:

- **Frecuencia de viajes:** 3 viajes/día hacia continente (vs. 2 actuales)
- **Eficiencia de carga:** 95% utilización de capacidad vehicular
- **Disponibilidad operativa:** 98% (mantenimiento preventivo programado)

E.4 Monitoreo Y Evaluación

Indicadores de Seguimiento

KPIs Operacionales (Monitoreo Mensual):

- **Inventario acumulado:** Meta <50 toneladas
- **Tasa de separación:** Meta 25% promedio ponderado
- **Capacidad utilización compostaje:** Meta >80%
- **Calidad del compost:** Norma NMX-AA-180-SCFI-2018

KPIs Financieros (Monitoreo Trimestral):

- **Costo neto sistema:** Meta <15,000 MXN/día
- **Ingresos por valorización:** Meta >3,000 MXN/día
- **ROI acumulado:** Seguimiento vs. meta 89.7% anual
- **Flujo de caja:** Monitoreo mensual hasta equilibrio

Mecanismos de Evaluación

Evaluación Intermedia (Mes 12):

- **Alcance:** Revisión completa del 60% de implementación
- **Responsable:** Consultor externo independiente
- **Objetivo:** Identificar desviaciones y ajustes necesarios

Evaluación Final (Mes 24):

- **Alcance:** Evaluación integral de impactos y sostenibilidad
- **Metodología:** Comparación antes/después con grupo de control
- **Productos:** Manual de replicación para otros SIDS

REFERENCIA DIGITAL COMPLETA Plan de implementación detallado
disponible en: <https://github.com/ramphastoslangosta/waste-simulator/docs/implementation-plan.md>

REFERENCIAS

Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 33(1), 220-232. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.09.008

Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: A global review of solid waste management. *World Bank Urban Development Series Knowledge Papers*, No. 15. Washington, DC: World Bank. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Aguascalientes: INEGI. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). (2015). *Global waste management outlook*. Nairobi: United Nations Environment Programme. ISBN: 978-92-807-3479-9. Disponible en: <https://www.unep.org/resources/report/global-waste-management-outlook>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. Ciudad de México: SEMARNAT. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/diagnostico-basico-para-la-gestion-integral-de-los-residuos>

Servicio de Limpia Urbana Municipal de Lázaro Cárdenas (SUMA). (2022). *Estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos - Isla Holbox*. Lázaro Cárdenas, Quintana Roo: Ayuntamiento de Lázaro Cárdenas. [Documento interno de trabajo]

Wilson, D. C., Rodic, L., Scheinberg, A., Velis, C. A., & Alabaster, G. (2012). Comparative analysis of solid waste management in 20 cities. *Waste Management & Research*, 30(3), 237-254. DOI: 10.1177/0734242X12437569