



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Huella ambiental de la Unidad Académica
de la UNAM en Sisal, Yucatán, México,
con un enfoque de Análisis de Ciclo de
Vida Organizacional**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Ambiental

P R E S E N T A

Nohemí Juárez Hernández

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado HUELLA AMBIENTAL DE LA UNIDAD ACADÉMICA DE LA UNAM EN SISAL, YUCATAN, MEXICO, CON UN ENFOQUE DE ANALISIS DE CICLO DE VIDA ORGANIZACIONAL, que presenté para obtener el título de INGENIERA AMBIENTAL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

NOHEMI JUAREZ HERNANDEZ
Número de cuenta: 318020453

INDICE GENERAL

RESUMEN	9
ABSTRACT	11
DEDICATORIAS	13
AGRADECIMIENTOS	14
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVO GENERAL	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	19
1.1 Principios del ACV	20
1.2 Fases del ACV	23
1.2.1 Definición del objetivo y alcance	24
1.2.2 Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (ICV)	25
1.2.3 Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida (EICV)	25
1.2.4 Interpretación de Ciclo de Vida	26
1.3 Análisis de Ciclo de Vida Organizacional (ACV-O)	27
1.4 Herramientas computacionales para el ACV y ACV-O	31
1.5 Enfoques derivados del ACV	32
1.5.1 Huella de carbono	32
1.5.2 Huella de agua	32
1.5.3 Análisis del Ciclo de Vida Social	33
1.6 Estudios previos del ACV-O en universidades	34
1.7 Sisal	35
1.7.1 Localización geográfica de Sisal	35
1.7.2 Población y actividades económicas	35
1.7.3 Infraestructura y servicios básicos	36
1.7.4 Problemáticas socioambientales y retos de sostenibilidad ambiental en Sisal	36
1.8 Unidad Académica de la UNAM en Sisal	38
1.8.1 Historia	38
1.8.2 Características generales del sitio	39
1.8.3 Infraestructura y funcionamiento	41
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DEL ACV-O	43
2.1 Definición de objetivo y alcance del ACV-O	43
2.1.1 Objetivo del ACV-O	43

2.1.2 Alcance del ACV-O	43
2.1.3 Funciones del sistema.....	43
2.1.4 Límites del sistema.....	43
2.1.5 Uso de criterios de priorización	45
2.1.6 Organización estudiada.....	46
2.1.7 Unidad de reporte	55
2.1.8 Período de referencia.....	55
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO	56
3.1 Categorías de impactos seleccionadas.....	57
3.1.1 Cambio Climático (<i>Climate Change</i>)	59
3.1.2 Acidificación terrestre (<i>Terrestrial Acidification</i>).....	59
3.1.3 Eutrofización marina (<i>Marine eutrophication</i>).....	60
3.1.4 Eutrofización de agua dulce (<i>Freshwater eutrophication</i>).....	60
3.1.5 Agotamiento de la capa de ozono (<i>Ozone depletion</i>).....	61
3.1.6 Recursos energéticos: no renovables, fósiles (<i>Fossil resource scarcity</i>).....	62
3.1.7 Uso de agua (<i>Water use</i>).....	62
3.1.8 Formación de partículas (<i>Fine particulate matter formation</i>)	63
3.2 Software utilizado	64
3.3 Calidad de los datos.....	64
3.4 Procedimiento de recopilación de datos	64
3.5 Consideraciones del estudio.....	66
CAPÍTULO 4: INVENTARIO DE CICLO DE VIDA	69
4.1 Análisis de inventario de Ciclo de Vida (ICV)	69
4.2 Actividades directas.....	69
4.3 Actividades indirectas corriente arriba	79
4.4 Actividades indirectas corriente abajo.....	81
CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA (EICV)	82
5.1 Huella ambiental, aplicando el método ReCiPe	82
5.2 Huella ambiental, aplicando el método IMPACT World+	85
5.3 Huella ambiental por categorías de impacto	87
5.3.1 Cambio Climático	87
5.3.2 Acidificación Terrestre	92
5.3.3 Eutrofización Marina.....	97
5.3.4 Eutrofización de Agua Dulce	102

5.3.5 Agotamiento de la Capa de Ozono	107
5.3.6 Recursos energéticos: no renovables, fósiles.....	112
5.3.7 Uso de Agua.....	116
5.3.8 Formación de partículas	121
5.3.9 Impactos ambientales derivados de la movilidad.....	126
5.3.10 Comparación de los resultados del ACV-O en la Unidad Académica Sisal con los resultados del ACV-O en la Facultad de Ciencias y Tecnología (FaST)	127
5.4 Propuestas para mejorar la sostenibilidad de la Unidad Académica	129
5.4.1 PROPUESTA PARA LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO	129
5.4.2 PROPUESTA PARA LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO POR EL USO DE AIRE ACONDICIONADO	131
CAPITULO 6: CONCLUSIONES.....	134
REFERENCIAS	136
Anexo 1. Registro fotográfico de fauna en la Reserva Estatal El Palmar y alrededores de la Unidad Académica de Sisal	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas del Ciclo de Vida (adaptado de Knauf Industries, 2023).....	21
Figura 2. Fases de un ACV (adaptado de ISO 14040:2006)	23
Figura 3. Beneficios del ACV-O. Elaboración propia basada en la Guidance on Organizational Life Cycle Assessment (Martínez Blanco et al., 2015).....	30
Figura 4. Logo de OpenLCA (GreenDelta, 2025).....	31
Figura 5. Logo de SimaPro (PRé Sustainability, 2025)	31
Figura 6. Logo de Sphera (antes GaBi) (Thinkstep, 2025)	31
Figura 7. Localización SISAL, Yucatán (Google Earth, 2025).....	35
Figura 8. Imagen satelital de la Unidad Académica de la UNAM en Sisal, Yucatán, México (Google Earth, 2023).....	40
Figura 9. Mapa ilustrativo de la UAS.....	42
Figura 10. Límites del sistema de ACV-O de la Unidad Académica.....	44
Figura 11. Diagrama de flujo del laboratorio de engorda de camarón.....	47
Figura 12. Diagrama de flujo del laboratorio de reproducción de camarón.....	48
Figura 13. Diagrama de flujo del laboratorio de ecología y cultivo de especies marinas ornamentales	49
Figura 14. Diagrama de flujo del laboratorio de ecología y manejo de costas y mares.....	50
Figura 15. Diagrama de flujo del laboratorio de peces marinos	51
Figura 16. Diagrama de flujo del laboratorio de nutrición acuícola & biotecnología.....	52
Figura 17. Diagrama de flujo del laboratorio de ingeniería y procesos costeros.....	53
Figura 18. Estructura de modelación del Análisis de Ciclo de Vida Organizacional de la UAS.....	68
Figura 19. Contribuciones de impactos ambientales por toda la UAS con el método ReCiPe	82
Figura 20. Contribuciones de impactos ambientales por toda la UAS con el método IMPACT World+	85
Figura 21a. Impactos generales en Cambio Climático.....	87
Figura 21b. Impactos en Cambio Climático actividades corriente arriba	88
Figura 21c. Impactos en Cambio Climático actividades directas.....	89
Figura 21d. Impactos en Cambio Climático actividades corriente abajo	90
Figura 22a. Impactos generales en Acidificación Terrestre.....	92
Figura 22b. Impactos en Acidificación Terrestre actividades corriente arriba	93
Figura 22c. Impactos en Acidificación Terrestre actividades directas.....	94
Figura 22d. Impactos en Acidificación Terrestre actividades corriente abajo	95
Figura 23a. Impactos generales en Eutrofización Marina	97

Figura 23b. Impactos en Eutrofización Marina actividades corriente arriba.....	98
Figura 23c. Impactos en Eutrofización Marina actividades directas	99
Figura 23d. Impactos en Eutrofización Marina actividades corriente abajo	100
Figura 24a. Impactos generales en Eutrofización de Agua Dulce.....	102
Figura 24b. Impactos en Eutrofización de Agua Dulce actividades corriente arriba	103
Figura 24c. Impactos en Eutrofización de Agua Dulce actividades directas.....	104
Figura 24d. Impactos en Eutrofización de Agua Dulce actividades corriente abajo.....	105
Figura 25a. Impactos generales en Agotamiento de la Capa de Ozono.....	107
Figura 25b. Impactos en Agotamiento de la Capa de Ozono actividades corriente arriba	108
Figura 25c. Impactos en Agotamiento de la Capa de Ozono actividades directas	109
Figura 25d. Impactos en Agotamiento de la Capa de Ozono actividades corriente abajo.....	110
Figura 26a. Impactos generales en Recursos energéticos.....	112
Figura 26b. Impactos en Recursos Energéticos actividades corriente arriba.....	113
Figura 26c. Impactos en Recursos Energéticos actividades directas.....	114
Figura 27a. Impactos generales en Uso de agua	116
Figura 27b. Impactos en Uso de Agua actividades corriente arriba.....	117
Figura 27c. Impactos en Uso de Agua actividades directas.....	118
Figura 27d. Impactos en Uso de Agua actividades corriente abajo	119
Figura 28a. Impactos generales en Formación de Partículas.....	121
Figura 28b. Impactos en Formación de Partículas actividades corriente arriba	122
Figura 28c. Impactos en Formación de Partículas actividades directas.....	123
Figura 28d. Impactos en Formación de Partículas actividades corriente abajo	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferencias entre ACV y ACV-O. Elaboración propia basada en la Guidance on Organizational Life Cycle Assessment (Martínez Blanco et al., 2015).....	29
Tabla 2. Características y limitaciones de software de ACV.	31
Tabla 3. Superficies Total de la Unidad Académica Sisal (Universidad Nacional Autónoma de México, 2011).	39
Tabla 4. Superficies de la Unidad Académica Sisal ocupada por la infraestructura (Universidad Nacional Autónoma de México, 2011).....	40
Tabla 5. Categorías ReCiPe de impacto elegidas para el ACV-O (Huijbregts et al, 2017).....	57
Tabla 6. Categorías IMPACT World+ de impacto elegidas para el ACV-O (Bulle et al., 2019).....	58
Tabla 7. Composición del mix eléctrico utilizado en el estudio (SEMARNAT & CRE, 2024).	66
Tabla 8. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio del área de engorda experimental de camarón.....	70
Tabla 8. (Continuación) Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio del área de engorda experimental de camarón.	71
Tabla 9. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de reproducción de camarón.	71
Tabla 10. (Continuación) Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de reproducción de camarón.....	72
Tabla 11. Materiales e insumos de entrada del laboratorio de ecología y manejo de costas y mares.	72
Tabla 11. (Continuación) Materiales e insumos de entrada del laboratorio de ecología y manejo de costas y mares.....	73
Tabla 12. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de ecología y cultivo de especies ornamentales.....	73
Tabla 13. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de ecofisiología aplicada para organismos acuáticos.....	74
Tabla 14. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular.....	74
Tabla 14. (Continuación) Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular.	75
Tabla 14. (Continuación) Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular.	76
Tabla 15. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de nutrición acuícola y biotecnología.....	76
Tabla 15. Tabla 15. (Continuación)Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de nutrición acuícola y biotecnología.....	77
Tabla 16. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de productos marinos, ciencias ambientales costeras, ecotoxicología y biorremediación.	79

Tabla 17. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de ingeniería y procesos costeros.....	79
Tabla 18. Materiales e insumos de entrada de la Movilidad.....	80
Tabla 19. Materiales e insumos de entrada y salida de los Servicios Generales.	80
Tabla 20. Materiales e insumos de salida de los Servicios Generales corriente abajo.	81
Tabla 21. Impactos ambientales de actividades directas e indirectas por categoría de impacto ambiental, aplicando el método ReCiPe.	84
Tabla 22. Impactos ambientales de actividades directas e indirectas por categoría de impacto ambiental, aplicando el método IMPACT World+.....	86
Tabla 23. Contribución porcentual a la categoría de Cambio Climático por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+	91
Tabla 23. Contribución porcentual a la categoría de Acidificación Terrestre por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+.....	96
Tabla 24. Contribución porcentual a la categoría de Eutrofización Marina por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+	101
Tabla 25. Contribución porcentual a la categoría de Eutrofización de Agua Dulce por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+.....	106
Tabla 26. Contribución porcentual a la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+.....	111
Tabla 27. Contribución porcentual a la categoría de Recursos Energéticos por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+	115
Tabla 28. Contribución porcentual a la categoría de Uso de Agua por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+	120
Tabla 29. Contribución porcentual a la categoría de Formación de Partículas por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+.....	125

RESUMEN

Las universidades consumen recursos, generan residuos y producen impactos ambientales para dar como resultado capital humano y conocimiento científico. Cada clase, proyecto de investigación, estudiante egresado o actividad administrativa depende de energía, agua, materiales y servicios que mantienen el funcionamiento de la universidad. Aunque estos procesos generan beneficios sociales y científicos, también generan impactos ambientales, algo que a veces puede pasar desapercibido porque la atención está en los logros académicos. Por eso, es indispensable hacer uso de herramientas cuantitativas que ayuden a identificar las actividades que contribuyen a los impactos ambientales, como el Análisis de Ciclo de Vida Organizacional (ACV-O), para que los resultados positivos o negativos en la huella ambiental de las organizaciones institucionales no pasen desapercibidos.

Cuando una organización opera o se localiza en una región con una gran biodiversidad natural, debe promover prácticas sostenibles, ya que las decisiones sobre la infraestructura, consumo y movilidad pueden favorecer o arriesgar los ecosistemas locales. Por ello, este estudio evalúa los impactos ambientales de la Unidad Académica de la UNAM en Sisal (UAS), que se localiza a pocos km de la reserva estatal “El Palmar”, en Yucatán, México, empleando la metodología de ACV-O, siguiendo la norma ISO 14072:2024. El análisis se realizó tomando como referencia el año 2024.

El inventario del ciclo de vida se elaboró a partir de información proporcionada por la comunidad de la Unidad y se complementó con bases de datos secundarias. Este inventario considera las actividades relacionadas con el consumo de energía eléctrica y agua, la movilidad de la comunidad universitaria, el uso de equipos e insumos, así como la gestión de residuos sólidos y aguas residuales. Para la evaluación de impactos se utilizó el software OpenLCA, aplicando los métodos ReCiPe e IMPACT World+, con el propósito de comparar los resultados para cada método. El uso de ambos métodos demostró diferencias, especialmente en las categorías de eutrofización de agua dulce, agotamiento de la capa de ozono y uso de agua. Los resultados muestran que, para este estudio, el método IMPACT World+ es más representativo, porque su modelación se basa en entornos de Latinoamérica, a diferencia de ReCiPe, que se modela en un contexto europeo.

Los resultados de ambos métodos muestran que la mayor contribución a los impactos ambientales sucede en las actividades corriente arriba o corriente abajo, donde los principales contribuyentes corresponden al consumo de energía eléctrica, a los equipos de aire acondicionado y a la movilidad de la comunidad universitaria, con una participación entre el 92 % y el 96 %. Esto demuestra que la mayor carga ambiental de la Unidad no sucede como resultado de sus actividades directas, sino de procesos previos o posteriores a su operación.

Con los resultados, se establecen propuestas de instalación de sistemas de paneles solares y la implementación de un protocolo de mantenimiento para reducir fugas de refrigerantes en los equipos de aire acondicionado.

ABSTRACT

Universities consume resources, generate waste, and have environmental impacts in order to produce human capital and scientific knowledge. Every class, research project, graduate, and administrative activity depends on energy, water, materials, and services that keep the university running. Although these processes yield social and scientific benefits, they also generate environmental impacts, something that can sometimes go unnoticed because the focus is on academic achievements. Therefore, it is essential to use quantitative tools that help identify activities contributing to environmental impacts, such as Organizational Life Cycle Assessment (OLCA), so that the positive or negative results in the environmental footprint of institutional organizations do not go unnoticed.

When an organization operates or is located in a region with high natural biodiversity, it must promote sustainable practices, as decisions regarding infrastructure, consumption, and mobility can either benefit or threaten local ecosystems. Therefore, this study assesses the environmental impacts of the UNAM Academic Unit in Sisal (UAS), located a few kilometers from the “El Palmar” state reserve in Yucatán, Mexico, using the O-LCA methodology in accordance with ISO 14072:2024. The analysis was conducted using the year 2024 as a reference.

The life cycle inventory was developed based on information provided by the Unit’s community and supplemented with secondary databases. This inventory considers activities related to electricity and water consumption, the mobility of the university community, the use of equipment and supplies, as well as solid waste and wastewater management. For the impact assessment, OpenLCA software was used, applying the ReCiPe and IMPACT World+ methods, with the aim of comparing the results for each method. The use of both methods revealed differences, particularly in the categories of freshwater eutrophication, ozone depletion, and water use. The results show that, for this study, the IMPACT World+ method is more representative because its modeling is based on Latin American environments, unlike ReCiPe, which is modeled in a European context.

The results of both methods show that the greatest contribution to environmental impacts occurs in upstream or downstream activities, where the main contributors are electricity consumption, air conditioning equipment, and the mobility of the university community, accounting for between 92% and 96%. This demonstrates that the Unit's greatest environmental burden does not result from its direct activities, but rather from processes occurring before or after its operation.

Based on these results, proposals have been made to install solar panel systems and implement a maintenance protocol to reduce refrigerant leaks in air conditioning units.

DEDICATORIAS

A Dios, por ser mi guía y fortaleza, por sostenerme en los momentos de duda y por permitirme llegar hasta este punto de mi vida. Gracias por las oportunidades, por las puertas que se abrieron y también por las que se cerraron.

A mi padre, por su esfuerzo incansable, por enseñarme el valor del trabajo, la responsabilidad y la perseverancia. Gracias por cada sacrificio, por tu confianza y por hacerme sentir capaz de lograr lo que me propusiera.

A mi madre, por su amor, por cada palabra de aliento, por su paciencia y por ser mi lugar seguro. Gracias por escucharme, por ser mi fortaleza en momentos difíciles y por enseñarme con su ejemplo el valor del amor incondicional.

A mis hermanas, por su compañía a lo largo de mi vida, por sus consejos y por estar presentes en los momentos importantes. Gracias por el cariño que nos une y por ser parte fundamental de quien soy.

A mis familiares, por su cariño, por sus consejos y por estar presentes de distintas formas a lo largo de este camino. Gracias por celebrar conmigo cada pequeño avance y por recordarme que nunca estuve sola.

A Bruno, gracias por creer en mí y por brindarme calma cuando más la necesitaba. Gracias por acompañarme durante todo este proyecto, un recuerdo que quedará siempre conmigo. Tu cariño y tu compañía fueron fundamentales para alcanzar este logro.

Dedico este logro a todos los que caminaron conmigo y confiaron en mí.

AGRADECIMIENTOS

*Agradezco profundamente a mi directora de tesis, la **Dra. Leonor Patricia Güereca**, por su apoyo, su orientación, paciencia y confianza durante todo este proyecto.*

*Agradezco especialmente a **Johnny Omar Valdez Iuit** por su apoyo durante mi estancia y trabajo en la Unidad Académica. Su disposición para ayudar, así como su apoyo para acercarme al personal de la Unidad, fueron clave para poder desarrollar esta investigación. Sin su ayuda, este trabajo no hubiera sido posible.*

*Agradezco a los maestros **Enrique César Valdez, Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose, Catalina Ferat Toscano y Clauda Julieta Espinosa Pérez** por sus valiosas enseñanzas durante la carrera, por su orientación y ejemplo profesional, que dejaron una huella en mi formación académica.*

*A la **Facultad de Ingeniería (FI)** y a la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**, por abrirme sus puertas y brindarme las herramientas necesarias para crecer profesional y personalmente, permitiéndome formar parte de una institución de excelencia.*

*Agradezco a la **Unidad Académica de Sisal** de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, agradezco al personal de la Unidad por su disposición y apoyo durante el desarrollo del trabajo de campo y la recopilación de información.*

*Al grupo de investigación de **Ciclo de Vida, Cambio Climático y Sostenibilidad (CIVICCS)**, por compartirme sus conocimientos, experiencias y por crear un ambiente de apoyo mutuo, que enriqueció mi visión sobre la ingeniería ambiental y la investigación.*

INTRODUCCIÓN

Sisal, Yucatán, se localiza en el municipio de Hunucmá, en la costa noroeste de la península de Yucatán, frente al Golfo de México (SEDUMA, 2017). En el censo de 2020 realizado por el INEGI, Sisal contaba con una población de 2,078 habitantes en el 2020 (INEGI, 2020). Históricamente, su principal actividad económica ha sido la pesca, sin embargo, para impulsar el turismo, en 2020 se incluyó dentro de la lista de Pueblos Mágicos por la Secretaría de Turismo del Gobierno de México (SECTUR, 2020). Este programa “Pueblos Mágicos” busca dar valor a comunidades con gran riqueza natural y cultural, como el pueblo de Sisal que se destaca por tener un gran potencial turístico y por ser un lugar clave para la conservación ambiental, debido a su riqueza natural.

En septiembre de 2009 se fundó la Unidad Académica Sisal (UAS) de la UNAM, creada para investigar fenómenos costeros como oleaje, hidrodinámica, cambio climático, resiliencia y procesos oceánicos (SECIHTI, s.f.).

A lo largo de los años de operación de la UAS, se han desarrollado investigaciones, proyectos, conferencias, estudios concluidos en los niveles de licenciatura, maestría y doctorado, así como la publicación de material científico, entre otros. Todo esto con el objetivo de generar información que contribuya a la toma de decisiones no solo en Sisal, sino en todo Yucatán. A pesar de todos los beneficios científicos y técnicos aportados por la UAS, la construcción y operación de la Unidad trajo consigo nuevos retos ambientales, como un incremento en la generación de residuos, en el consumo de recursos, en las emisiones originadas por el transporte y por las actividades cotidianas de estudiantes, académicos, investigadores y personal administrativo. Mientras que algunos miembros de la comunidad universitaria se establecieron permanentemente en Sisal, otros realizan traslados diarios; la suma de todo esto ha provocado cambios ambientales y sociales.

La UAS se ubica en un entorno estratégico del ecosistema costero de Yucatán, caracterizado por una alta biodiversidad y la presencia de ecosistemas como dunas, manglares, humedales y playas. Ubicada a escasos 450-500 m de la UAS, se encuentra la Reserva Estatal “El Palmar” (RAMSAR, 2003) reconocida como sitio RAMSAR (Convención de Ramsar, 1971) e integrada al Corredor Biológico Mesoamericano (SECTUR, 2020), la cual incrementa su valor ecológico y exige que

sus actividades académicas, científicas y operativas se desarrollen bajo criterios de sostenibilidad y gestión ambiental responsable.

Por otra parte, es importante recalcar que las instituciones educativas desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de la sociedad, al generar, conservar y difundir conocimiento. En ellas se forman profesionales y ciudadanos con pensamiento crítico. Por su papel crucial, la UAS tiene la responsabilidad de implementar prácticas sostenibles que contribuyan a mitigar los impactos negativos sobre el medio ambiente. Para que pueda considerarse una organización ejemplar en materia ambiental, no basta con la formación académica de profesionales. Es necesario que también implemente prácticas y operaciones de bajo impacto; relacionadas con sus objetivos institucionales, orientados a la conservación y al aprovechamiento sostenibles de los ambientes costeros a través de la investigación teórica y aplicada.

Las universidades funcionan como “laboratorios vivos” de sostenibilidad porque permiten poner en práctica, observar y evaluar estrategias de gestión ambiental en situaciones reales. Además de su labor educativa y de investigación, pueden contribuir a combatir el cambio climático en el país (Paredes-Canencio et al.,2024). El estudio “Carbon footprint review in higher learning environment towards campus sustainability”, señala que las universidades pueden influir en las decisiones personales y profesionales de los estudiantes y en su impacto ambiental (Misni et al., 2024).

Por esa razón, es importante evaluar detalladamente los impactos ambientales de la UAS para poder proporcionar medidas de mejora que hagan de la Unidad un lugar más sostenible y resiliente con el medio ambiente. Para llevar a cabo la evaluación de los impactos ambientales se hace uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que nace como una herramienta que permite cuantificar y caracterizar de manera completa los impactos ambientales de productos (ISO 14044:2006). Sin embargo, en el año 2014 se publicó un nuevo enfoque dentro del ACV, que es el Análisis de Ciclo de Vida Organizacional (ACV-O) estandarizado por la norma ISO 14072:2014. Este nuevo enfoque busca identificar los impactos ambientales de las organizaciones considerando todas sus entradas y salidas, tomando como referencia la productividad de dicha

organización. Esta metodología resulta muy valiosa para evaluar los impactos ambientales de la UAS.

En México, únicamente se ha llevado a cabo un ACV-O, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para el Banco de México (Gómez Sánchez, 2016), que evaluó los impactos ambientales asociados a las operaciones de esta institución bajo el enfoque de ACV aplicado a una organización completa, no a un producto o procesos en específico. Este estudio es la prueba de los múltiples beneficios de utilizar la metodología de ACV en organizaciones, ya que permite identificar con precisión sus impactos ambientales y establecer acciones que logren guiar a las organizaciones a mejorar su desempeño ambiental.

Hasta el momento, de acuerdo con las investigaciones realizadas, este trabajo es el primero en aplicar el ACV-O a una institución educativa en México y Latinoamérica, lo cual representa un reto y al mismo tiempo, un avance en la generación de conocimiento orientado a buscar la sostenibilidad de la UAS. Los resultados de este estudio no solo aportarán material para la planeación de organizaciones amigables con el medio ambiente, sino que también podrán servir como referencia para replicar o eliminar prácticas o procesos en otras instituciones educativas u organizaciones ubicadas en entornos costeros.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar los impactos ambientales de la Unidad Académica de la UNAM en Sisal, Yucatán, con el uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida Organizacional, con el propósito de identificar las actividades y procesos que generan mayor impacto ambiental en la Unidad, desarrollando propuestas de mejora.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir el objetivo y el alcance del estudio de ACV-O, estableciendo las funciones del sistema, la unidad funcional, los límites del sistema y los criterios metodológicos, obteniendo la información través de visitas de campo, investigación bibliográfica y solicitudes de información.
- Elaborar el Inventario de Ciclo de Vida de la Unidad Académica de la UNAM en Sisal, a través de cuestionarios, entrevistas y la recopilación de datos cuantitativos y cualitativos de las entradas y salidas (agua, energía, materiales e insumos y residuos).
- Realizar la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida mediante el uso del software OpenLCA, generando un perfil ambiental del funcionamiento de la Unidad.
- Interpretar los resultados del ACV-O, identificar las actividades y procesos con mayor impacto ambiental, y proponer recomendaciones para mejorar el desempeño ambiental de la Unidad.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

En octubre de 1984, se reunió por primera vez la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CMMAD), conocida también como la Comisión Brundtland, donde se comenzó un debate por la creciente preocupación por “*la capacidad del medio ambiente para satisfacer las necesidades presentes y futuras*” (Aguado Puig, 2018). Este debate abordó las problemáticas asociadas al deterioro ambiental y sus consecuencias para el desarrollo humano, entre las cuales se encuentra el conflicto entre el crecimiento económico y el cuidado del medio ambiente (CMMAD, 1987). Después de varios años de trabajo, en 1987 se publicó el Informe Brundtland, también conocido como *Nuestro Futuro Común*, que marcó un acontecimiento significativo (*Informe Brundtland, 1987*), al definir el desarrollo sostenible como:

“...*el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.*”

Después de la definición de desarrollo sostenible, se fomentaron diversos esfuerzos internacionales para trabajar en conjunto afín de proteger el medio ambiente y el bienestar humano, dando como resultado la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible (WSDS) en Johannesburgo en 2002, donde se hizo un llamado a promover programas enfocados en el consumo y la producción sostenibles. En este mismo informe, se detallan las estrategias para modificar los métodos insostenibles de consumo y producción. En dicho evento se promueve la aplicación de procedimientos de evaluación de los efectos en el medio ambiente (*Informe de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, 2002*).

Harold Smith es considerado como uno de los propulsores del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con el estudio que presentó en la Conferencia Mundial de Energía de 1963, que informaba sobre las cantidades de energía para la fabricación de productos químicos (Curran, 2006). Otro trabajo que se puede considerar pionero del ACV fue elaborado en 1969, en donde Harry E. Teasley Jr, director de la División de Envases de “The Coca Cola Company”, encargó hacer un análisis exhaustivo sobre la cantidad de energía necesaria, materiales e impactos ambientales asociados a lo largo del ciclo de vida de envases, desde la extracción de materias primas hasta su disposición

final. Este estudio arrojó información relevante sobre el impacto que tienen los envases de plástico (Hunt, Sellers, Franklin, 1992).

El ACV surge formalmente en 1993, cuando la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC) introduce el Código de Prácticas para ACV, definiéndolo como *“un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso de materia y energía, así como las emisiones o vertidos al entorno, con el fin de determinar los impactos derivados del uso de recursos y de dichas emisiones a lo largo de todo su ciclo de vida”* (SETAC, 1993).

Esta definición constituyó la base conceptual para el desarrollo y posterior estandarización del ACV mediante las normas internacionales ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, las cuales establecen los principios, el marco metodológico, los requisitos y las directrices para la realización de estudios de ACV.

1.1 Principios del ACV

El ACV es una metodología científica que evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio, definida en la norma ISO 14040:2006 como, *“metodología estandarizada para evaluar los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados a un producto, proceso o actividad, a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final (ISO 14040:2006)”*. Esta metodología, como lo menciona la norma, debe considerar todos los aspectos del ciclo de vida de un producto o servicio, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los productos, pasando por todas las etapas intermedias de su vida útil como lo muestra la Figura 1 (ISO 14040:2006).



Figura 1. Etapas del Ciclo de Vida (adaptado de Knauf Industries, 2023)

Dependiendo de los objetivos de cada estudio de ACV, se pueden tener diferentes alcances, siendo los más habituales (EeBGuide, 2012):

- De la puerta a la puerta: Sólo se analiza lo que ocurre dentro de la organización, principalmente el proceso productivo.
- De la cuna a la puerta: Incluye desde la extracción y el procesamiento de las materias primas hasta que llega a la empresa.
- De la puerta a la tumba: Se estudia desde que el producto sale de la empresa hasta su disposición final o desecho.
- De la cuna a la tumba: Considera todo el ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto.
- De la cuna a la cuna: Analiza todo el ciclo de vida, con un enfoque circular, es decir, pensando en establecer procesos en los que se puede reciclar o reutilizar.

Asimismo, el nivel de detalle del ACV puede variar, ya que depende del objetivo que se debe cumplir. Esto da lugar a tres tipos de ACV (Universitat Carlemany, 2024):

1. ACV conceptual: El ACV conceptual es el análisis más sencillo. Se utiliza para las primeras etapas de un producto, servicio o proceso. Su objetivo es identificar, de manera general y cualitativa, los principales impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida. Se caracteriza por el uso de datos limitados y de aproximaciones, y por no necesitar un inventario detallado.

2. ACV simplificado: Este tipo de ACV tiene un nivel de dificultad intermedio, a diferencia del ACV conceptual, solo se cuantifican algunos aspectos ambientales. El análisis considera únicamente las etapas más relevantes del ciclo de vida, con el objetivo de obtener resultados similares a los de un ACV completo, pero con el uso de menos recursos económicos y de elaboración.
3. ACV completo: El ACV completo representa el nivel más detallado. Incluye los análisis cualitativo y cuantitativo del inventario, que abarcan todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. Requiere una recolección detallada de datos, lo que implica una mayor inversión de tiempo y recursos económicos.

El ACV presenta múltiples beneficios y aplicaciones desde distintas perspectivas. Hauschild, Rosenbaum y Olsen (2018) señalan que algunos beneficios y aplicaciones se presentan en el ámbito gubernamental e industrial;

En el ámbito gubernamental, se utiliza como herramienta de apoyo para la elaboración, implementación y evaluación de políticas públicas, lo que permite identificar opciones más sostenibles y evaluar su eficacia. Ejemplos de ello son la Integrated Product Policy de la Unión Europea, orientada a minimizar los impactos de los productos a lo largo de su ciclo de vida, o la inclusión del ACV en las directrices de “better regulation” de la Comisión Europea para evaluar el desempeño de las políticas existentes y el desarrollo de nuevas regulaciones (Rubik & Scholl, 2002). En el sector industrial, el ACV es una herramienta clave para desarrollar mejoras en los productos y procesos, al identificar las áreas de mayor impacto.

Para lograr estos beneficios y objetivos, el ACV requiere seguir una serie de fases que se explican a continuación.

1.2 Fases del ACV

La metodología del ACV de acuerdo con la ISO 14040:2006 consta de 4 fases:

1. Definición de objetivos y alcance
2. Análisis de inventario (ICV)
3. Evaluación de impactos (EICV)
4. Interpretación de resultados

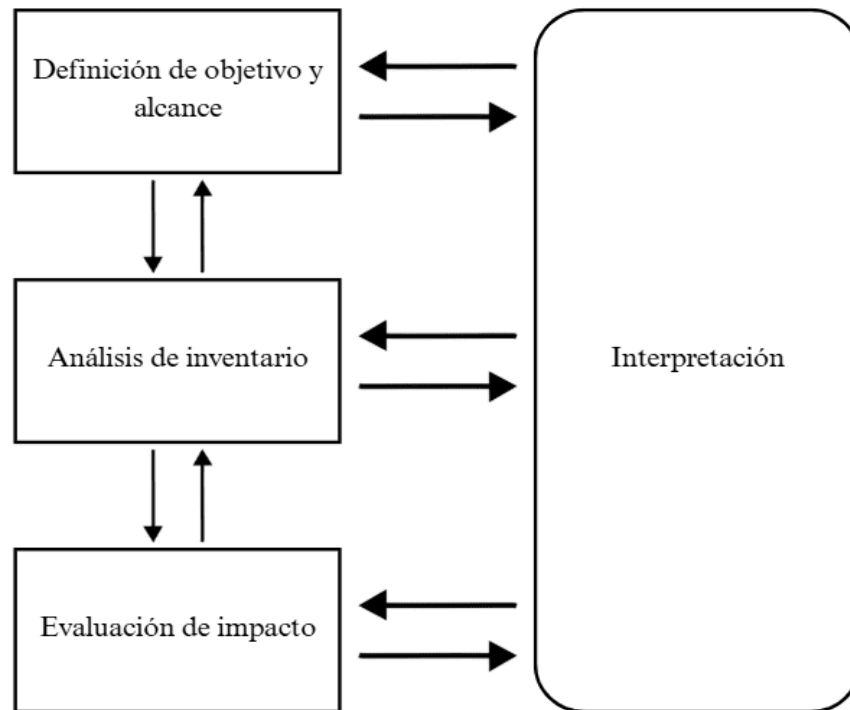


Figura 2. Fases de un ACV (adaptado de ISO 14040:2006)

Cada fase representa un orden lógico, sin embargo, esto no implica que deban aplicarse de manera estrictamente secuencial. Siendo posible abordar las fases de forma no lineal, siempre y cuando se mantenga la coherencia del sistema evaluado.

A continuación, se detallan las fases y elementos de un ACV tomando como referencia la ISO 14040:2006 y el manual *Life Cycle Assessment: Theory and Practice* de Hauschild, Rosenbaum & Olsen, escrito en 2018.

1.2.1 Definición del objetivo y alcance

Objetivo: En esta fase inicial, se define el propósito del ACV, respondiendo las preguntas ¿Qué?, ¿Cómo?, ¿Para quién?, ¿En dónde?, ¿Para qué periodo?, con la finalidad de asegurar la congruencia entre los objetivos, la metodología, los resultados y las aplicaciones esperadas.

Alcance del estudio: Se debe indicar cuál va a ser la profundidad y los detalles del estudio.

El alcance incluye los siguientes elementos clave:

Funciones del sistema: Estas funciones describen qué hace el sistema y sirven como base para definir la unidad funcional, que permite cuantificar y comparar los flujos de entrada y salida de manera coherente a lo largo del ciclo de vida.

Unidad Funcional: Es una medida cuantitativa de la función que cumple un producto o un sistema. Sirve como referencia común para todos los datos de entrada y salida del ACV, garantizando que la comparación entre distintos productos o sistemas se realice de manera justa.

Límites del sistema: Establece las actividades y los procesos que se consideran en el análisis. Es importante considerar que aquí se establecerá todo lo que incluirá el sistema de estudio (las entradas y salidas, los límites espaciales, temporales y funcionales). Si se considera que hay datos que no modifiquen de forma significativa los resultados del estudio, pueden no ser considerados.

Procedimientos de asignación: En caso de que un proceso genere más de un producto, se deben establecer las cargas ambientales entre ellos.

Categorías de impacto y método: En esta sección se definen los impactos ambientales a evaluar y el método para cuantificarlos. La metodología establece los métodos de cálculo y modelado de los impactos, por ejemplo, ReCiPe, CML, TRACI e IMPACT World+.

Requisitos de calidad de datos: Aquí se definen las características de los datos necesarios para el estudio. La descripción detallada será importante para conocer la fiabilidad de los resultados.

1.2.2 Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (ICV)

En esta fase se deben recopilar todos los datos sobre las entradas y salidas que componen el sistema a estudiar. Estas entradas pueden incluir el uso de recursos como agua, energía eléctrica, combustibles, y salidas como emisiones atmosféricas, descargas de agua residual y residuos sólidos o peligrosos. Para poder llevar a cabo el inventario, se puede realizar la recopilación de datos existentes de otras fuentes de datos, de encuestas o entrevistas, y la medición directa de algunos parámetros. En algunas ocasiones, al recopilar estos datos, se requieren procedimientos de cálculo. La precisión de estos datos es clave para que los resultados del ACV sean confiables. Esta fase se considera la más larga y exhaustiva del ACV, ya que debe realizarse cuidadosamente para evitar errores que puedan afectar los resultados finales.

1.2.3 Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida (EICV)

En esta fase, los datos obtenidos en la fase anterior se analizan para determinar los impactos ambientales de las etapas de la vida útil del producto o servicio, por categorías de impacto. Existen diversas herramientas y bases de datos que permiten realizar este tipo de evaluaciones, como los programas informáticos OpenLCA o SimaPro, que facilitan la aplicación de métodos estándar como, ReCiPe o CML, entre otros.

Las categorías de impacto en un ACV pueden variar según el método de evaluación del impacto utilizado. Existen diferentes métodos, dentro de los que se incluyen:

- CML (Centrum voor Milieukunde Leiden)
- TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts)
- ReCiPe (2008, actualizado en 2016 y 2023)
- IMPACT World+ fue desarrollado por un equipo internacional de investigadores, liderado por CIRAI (International Reference Centre for the Life Cycle of Products, Processes and Services), en colaboración con otras instituciones como la Technical University of Denmark (DTU), (Bulle et al., 2019).

Algunos ejemplos de categorías de impacto son, cambio climático, eutrofización marina, eutrofización de agua dulce, formación de partículas, uso de agua, uso de tierra, recursos fósiles y agotamiento de la capa de ozono, entre otras.

En este estudio, se utilizan los métodos ReCiPe e IMPACT World+ para evaluar los impactos ambientales. Debido a las características propias de cada uno, ReCiPe es uno de los métodos más reconocidos en la literatura de ACV, lo que podría permitir comparar los resultados con otros estudios; por otro lado, IMPACT World+ tiene un enfoque regional que representa el contexto Latinoamericano.

Al elegir estos dos métodos se aprovechan las fortalezas de ambos, lo que permite elegir el más representativo para este estudio. Considerando su capacidad para reflejar adecuadamente los impactos ambientales asociados a las actividades de la UAS, para proponer medidas de mitigación adecuadas.

1.2.4 Interpretación de Ciclo de Vida

Una vez evaluados los impactos ambientales, los resultados se analizan y se identifican áreas de mejora.

Esta fase permite que la metodología de ACV pueda ir más allá de la evaluación de impactos por productos y procesos, dando lugar a enfoques que permitan evaluar el desempeño ambiental de sistemas más complejos, como las organizaciones.

1.3 Análisis de Ciclo de Vida Organizacional (ACV-O)

Aunque la metodología de ACV fue desarrollada originalmente para productos, su aplicación a nivel organizacional se vuelve cada vez más relevante. Según la “Guidance on Organizational Life Cycle Assessment”, los primeros esfuerzos dentro de la comunidad de ciclo de vida sobre la huella organizacional surgieron en la década de 1990, combinando el análisis de insumo-producto con el ACV (Lave et al., 1995). En este contexto surge el Análisis de Ciclo de Vida Organizacional (ACV-O), que fue formalmente publicado en diciembre de 2014 a través de la norma ISO/TS 14072:2014 “Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida, Requisitos y directrices para la evaluación del ciclo de vida organizacional” (ISO 14072:2014). Cabe mencionar que esta norma fue sustituida en octubre 2024 por la versión ISO 14072:2024, la cual incluye como referencia normativa a las ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 con las que se sustenta un ACV tradicional. Según la norma ISO 14072:2024, el ACV-O es: *“Un proceso sistemático que recopila y evalúa los recursos utilizados, los productos generados y los posibles impactos ambientales de todas las actividades de una organización, considerando todo su ciclo de vida”*.

A diferencia del ACV de un producto, el ACV-O estudia una organización completa, incluyendo su estructura y operaciones. Esto permite analizar de manera conjunta todos los productos y servicios que ofrece. Se considera que evaluar el ciclo de vida de una organización es considerablemente más complejo que hacerlo con productos, ya que muchas organizaciones están involucradas en varios ciclos de vida de productos, cada uno con su propio conjunto de impactos ambientales.

Al mismo tiempo que se establece la norma ISO 14072:2014, el PNUMA, SETAC y la Life Cycle Initiative lanzaron en el mismo mes la guía titulada “Guidance on Organizational Life Cycle Assessment” (Martínez Blanco et al., 2015). Esta guía aporta detalles más específicos sobre cómo aplicar estudios de ACV en una organización, dando un enfoque más estructurado y estandarizado. Esta Guía se usará como referencia en este estudio, ya que proporciona información completa y detallada sobre los pasos a seguir y consideraciones para un correcto ACV-O.

Marco Técnico del ACV-O

De acuerdo con la norma ISO 14072:2024, en los ACV-O se debe seguir la siguiente estructura:

- Definición del objetivo y alcance
 - Elementos de la definición del objetivo
 - Aplicación prevista
 - Razones para realizar el estudio
 - Público objetivo
 - Declaración sobre el uso de resultados comparativos
 - Elementos de la definición del alcance
 - Organización estudiada
 - Seguimiento del desempeño ambiental
 - Unidad de informe
 - Productos, procesos, instalaciones y emplazamientos
 - Período de referencia
 - Límite del sistema
 - Procedimientos de asignación
 - Metodología y tipos de impactos
 - Interpretación prevista
 - Requisitos de datos
 - Supuestos y limitaciones
 - Opciones de valor y elementos opcionales
 - Requisitos de calidad de los datos
 - Tipo de revisión crítica
 - Tipo y formato del informe
- Análisis de Inventario
- Evaluación de Impacto
- Interpretación de resultados

Aunque la metodología del ACV-O comparte la estructura general del ACV tradicional, existen diferencias clave entre los dos, esto debido al enfoque organizacional, como se muestra en la Tabla 1:

Criterio	ACV	ACV-O
Enfoque	Producto o servicio.	Organización completa.
Unidad funcional/ Unidad de reporte	Unidad funcional del producto, por ejemplo, kg, lt, m, etc.	Unidad de reporte que establece la salida total de la organización, por ejemplo, producción, ingresos, número de alumnos, trabajos de investigación, etc.
Alcance	Desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto.	Analiza todas las operaciones de la organización en función de su producción, consumo de recursos y emisiones, etc.
Inventario de insumos y flujos	Datos específicos de producción, transporte y consumo del producto.	Datos de actividades corriente arriba, corriente abajo y directas.
Normativa	ISO 14040:2006, ISO 14044:2006.	ISO 14072:2024.
Uso	Identificar oportunidades para mejorar un producto, servicio o proceso.	Medir el desempeño ambiental de una organización y proponer estrategias de mejora.

Tabla 1. Diferencias entre ACV y ACV-O. Elaboración propia basada en la Guidance on Organizational Life Cycle Assessment (Martínez Blanco et al., 2015)

A través de esta metodología, las organizaciones pueden alcanzar varios objetivos que se pueden clasificar en objetivos analíticos, gerenciales y sociales.

La clasificación de los objetivos analíticos permite tener una visión de las operaciones internas y de la cadena de valor, facilitando la identificación de los puntos críticos que aportan a los impactos ambientales y ayudando a entender los riesgos y las oportunidades de la reducción de impactos. En cuanto a los objetivos gerenciales, contribuye a la mejora del sistema de la organización, reforzando el conocimiento de los procesos internos promoviendo la eficiencia en la gestión de recursos y permitiendo reducir los costos operativos mediante la optimización del consumo de materiales y de la energía.

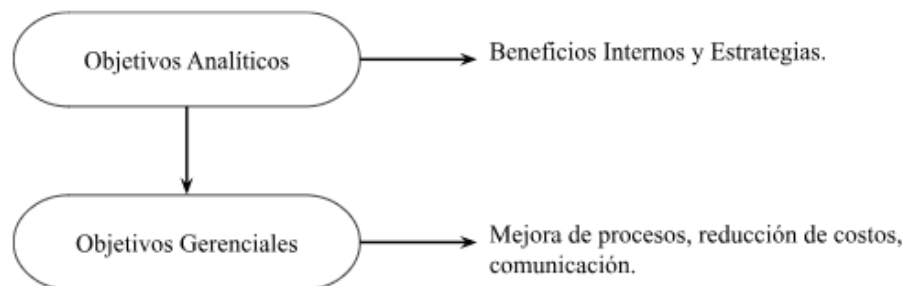


Figura 3. Beneficios del ACV-O. Elaboración propia basada en la Guidance on Organizational Life Cycle Assessment (Martínez Blanco et al., 2015)

Aunque esta metodología puede ser aplicada en cualquier fase de un proyecto, lo más recomendable es implementarla desde la concepción del proyecto que dará como resultado una organización. Evaluar los impactos desde la planeación permite considerar alternativas con menor impacto y diseñar procesos que beneficien a la empresa en los tres pilares fundamentales del desarrollo sostenible: económico, social y ambiental. Asimismo, se considera que el ACV-O también es una herramienta de creación de escenarios que permite estimar los posibles resultados de diferentes acciones. Mejorar los procedimientos organizacionales, aumentar el conocimiento y la comprensión de los procesos internos ayuda a una mejor gestión de las operaciones a lo largo de la cadena de valor (García, 2023).

1.4 Herramientas computacionales para el ACV y ACV-O

Para poder cuantificar los impactos ambientales a través de la metodología de ACV, se hace uso de software especializado, como por ejemplo, OpenLCA, SimaPro y Thinkstep. Estas herramientas permiten calcular automáticamente los impactos ambientales a partir de los datos de entrada y salida del sistema, aplicando métodos de evaluación de impacto reconocidos internacionalmente.

En la Tabla 2, se pueden comparar algunas de las características más representativas de los programas más utilizados para el ACV.




Software	Características	Limitaciones
 <p><i>Figura 4. Logo de OpenLCA (GreenDelta, 2025)</i></p>	Gratuito, flexible, compatible con bases comerciales y libres.	Requiere instalación y configuración; curva de aprendizaje media
 <p><i>Figura 5. Logo de SimaPro (PRé Sustainability, 2025)</i></p>	Estándar académico e industrial, gran cantidad de bases de datos integradas.	Costoso, licencia restringida.
 <p><i>Figura 6. Logo de Sphera (antes GaBi) (Thinkstep, 2025)</i></p>	Muy usado en la industria, gran número de bases de datos.	Pago, interfaz menos intuitiva que la de OpenLCA.

Tabla 2. Características y limitaciones de software de ACV

1.5 Enfoques derivados del ACV

Con el paso de los años y el aumento de las necesidades de administrar eficientemente los recursos, el ACV ha desarrollado enfoques especializados que permiten evaluar impactos ambientales en áreas clave. Estos enfoques responden a demandas más amplias y específicas en la gestión de la sostenibilidad.

A continuación, se describen los principales enfoques derivados del ACV,

1.5.1 Huella de carbono

La huella de carbón nació como parte de la huella ecológica. Desde 1999 surgió el concepto, pero no fue sino hasta 2003 que empezó a tener mayor popularidad. Este tipo de análisis cuantifica la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera como resultado de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios (Pandey et al., 2010; Wiedmann, 2009). Los GEI son gases en la atmósfera que atrapan el calor y contribuyen al cambio climático. Estos gases, como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, son liberados por actividades humanas.

Este análisis se mide en masa de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq), siendo el CO₂ el principal GEI del análisis de la huella de carbono, sin embargo, también pueden considerarse otros GEI. Su cálculo sigue los principios del Protocolo Kioto acerca de GEI o la norma ISO 14064 que establece los fundamentos para acreditar y garantizar los cálculos de emisiones de GEI (ISO 14064-1:2018).

1.5.2 Huella de agua

La huella de agua surgió debido a la preocupación por la creciente demanda de agua, la escasez hídrica y el deterioro de la calidad del recurso. Esto impulsó la necesidad de conocer los impactos relacionados con el agua para su mejor gestión del agua a nivel local, regional, nacional y global (ISO 14046:2014), por lo que se desarrolló la metodología huella de agua basada en la norma ISO 14046:2014, que la define como:

Métrica(s) que cuantifican los posibles impactos ambientales relacionados con el agua (ISO 14046:2014)

Y establece los siguientes lineamientos para una correcta estimación:

- Se basa en un Análisis de Ciclo de Vida (según la norma ISO 14044).
- Es modular (es decir, se pueden realizar evaluaciones de partes específicas de un proceso o producto y posteriormente sumarse a los demás módulos para representar la huella de agua).
- Identifica los posibles impactos ambientales relacionados con el agua.
- Incluye las dimensiones geográficas y temporales pertinentes.
- Identifica la cantidad de agua utilizada y los cambios en su calidad.

Realizar una huella de agua trae consigo muchos beneficios, entre ellos, logra evaluar la magnitud de los posibles impactos ambientales relacionados con el recurso, identifica oportunidades para reducir los posibles impactos ambientales relacionados con el agua asociados a los productos, procesos y organizaciones en las distintas etapas de su ciclo de vida, facilita la eficiencia hídrica y optimizar la gestión e informa a los responsables de la toma de decisiones en la industria, el gobierno o las organizaciones no gubernamentales sobre sus posibles impactos ambientales relacionados con el agua (ISO 14046:2014).

Sin embargo, una evaluación de la huella de agua por sí sola no es suficiente para describir los posibles impactos ambientales generales de productos, procesos u organizaciones, ya que solo toma en consideración los impactos relacionados con el recurso. Para realizar el análisis completo se debería integrar en un Análisis de Ciclo de Vida, lo que resultaría fundamental para evaluar de manera conjunta múltiples categorías de impacto ambiental.

1.5.3 Análisis del Ciclo de Vida Social

El Análisis del Ciclo de Vida Social (ACV-S) es una metodología que evalúa los impactos sociales positivos o negativos ocasionados por el funcionamiento de una organización (Finkbeiner et al., 2010). El ACV-S analiza las consecuencias sobre las personas o grupos involucrados en la cadena de valor de una organización (Andrews et al., 2009), incorporando aspectos como las condiciones laborales, salud, seguridad, derechos humanos, equidad, bienestar y desarrollo, demostrando que las decisiones operativas influyen en la calidad de vida de las personas involucradas.

Este análisis sigue las mismas fases del ACV tradicional, según la ISO 14044:2006 (definición de objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación de impactos e interpretación). Dentro de este estudio no se realizará un ACV-S.

1.6 Estudios previos del ACV-O en universidades.

Uno de los estudios destacados en esta área es el piloto realizado en la Facultad de Ciencia y Tecnología (FaST) de la Universitas Pelita Harapan (UPH), en Indonesia. Este proyecto tuvo como objetivo evaluar el desempeño ambiental de la Facultad y sentar las bases para incorporar la sostenibilidad en la gestión institucional. Los resultados del estudio identificaron que los principales contribuyentes a los impactos ambientales fueron: el consumo de electricidad adquirida, y el transporte de empleados en automóviles medianos hacia West Jakarta. Entre las propuestas para reducir los impactos, se incluye el desarrollo de políticas para el ahorro y seguimiento de energía, la incorporación de actividades sostenibles, la creación de un transporte colectivo de empleados, y la selección de proveedores con una buena gestión de residuos electrónicos (Martínez-Blanco, Forin, & Finkbeiner, 2017).

En la siguiente sección se presentan las características espaciales, sociales, económicas e institucionales de la UAS, con la finalidad de conocer la situación actual.

1.7 Sisal

1.7.1 Localización geográfica de Sisal

Sisal es un pueblo costero, que en el pasado fue llamado Santa María de Sisal o ZiZal. Se ubica en el municipio de Hunucmá, en la península de Yucatán, a orillas del Golfo de México, a aproximadamente 50 km de la ciudad de Mérida. Según Google Earth (2025), el sitio se encuentra en las coordenadas 21°10'00.33" N, 90°01'28.15" O, con una altitud promedio de 5 m sobre el nivel del mar. El territorio donde se asienta forma parte de la planicie costera yucateca, caracterizada por su relieve plano y por la presencia de humedales, manglares y dunas costeras.

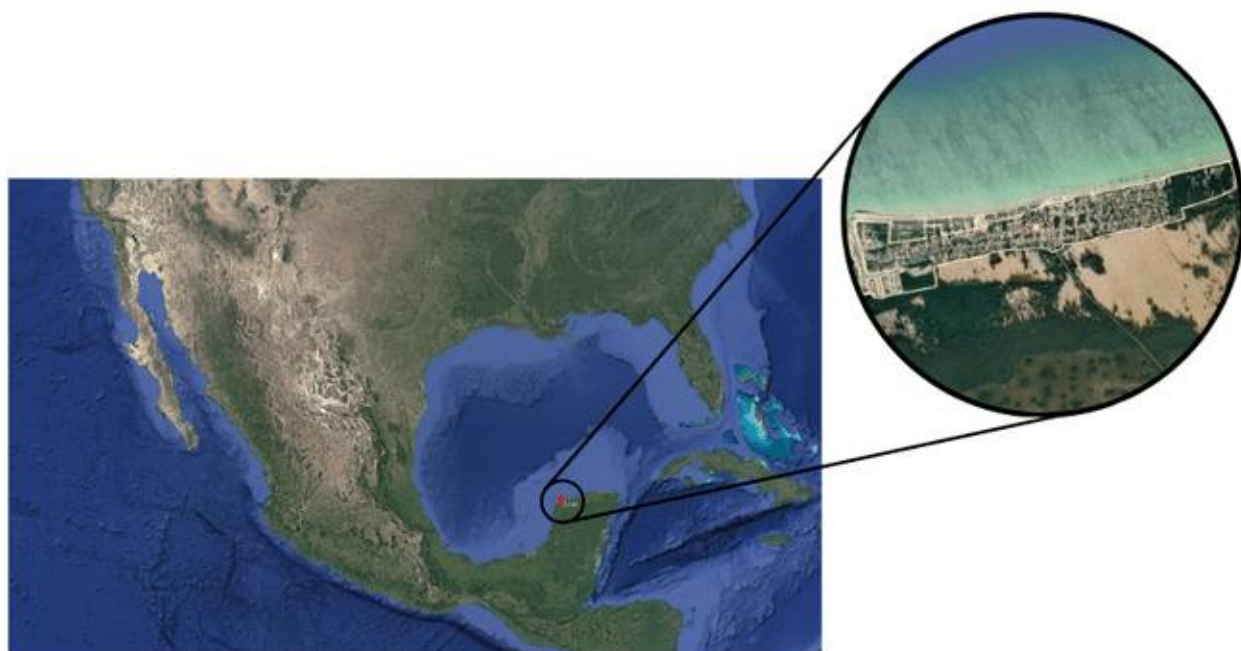


Figura 7. Localización SISAL, Yucatán (Google Earth, 2025)

1.7.2 Población y actividades económicas

De acuerdo con datos del último censo disponible del INEGI del 2020, la localidad de Sisal contaba con una población aproximada de 2,078 habitantes y con una distribución relativamente equilibrada entre hombres y mujeres (1,059 hombres y 1,019 mujeres) (INEGI,2020). La mayoría de la población está en edad de productiva, pero cada vez hay más personas mayores, debido a que muchos jóvenes se mudan a las ciudades.

Las principales actividades económicas son la pesca, la acuicultura y el turismo de naturaleza, donde sobresalen los recorridos para observar aves y áreas naturales. Tras el nombramiento de Sisal como “Pueblo Mágico”, el turismo ganó más importancia en las actividades económicas, aumentando la demanda de hospedaje, gastronomía y actividades recreativas, por lo que la comunidad de Sisal se tuvo que dedicar principalmente a esta actividad y a la venta de productos pesqueros, artesanías y alimentos procesados. Esta dependencia económica hace que la comunidad esté expuesta a factores como la estacionalidad turística, el cambio climático y la sobreexplotación de recursos marinos, por lo que se hace necesario desarrollar distintas actividades productivas para asegurar que la comunidad pueda afrontar cambios económicos.

1.7.3 Infraestructura y servicios básicos

Sisal, enfrenta desafíos en sus servicios básicos, ya que el agua potable, la energía eléctrica y telefonía, se ven afectadas durante la temporada alta turística, debido a la alta demanda de estos servicios, y a la poca capacidad de cubrirlas. Según el “Estudio de satisfacción local en cuatro pueblos mágicos de Yucatán 2023” (Observatorio Turístico de Yucatán, 2023), el 36 % de los residentes consideran necesario mejorar los servicios públicos y de infraestructura.

En términos de conectividad, Sisal cuenta con servicios de telefonía fija y móvil, así como con acceso a internet. En cuanto al transporte, la localidad está conectada por carretera con Hunucmá y Mérida, sin embargo, la frecuencia del transporte público es reducida, lo que dificulta el acceso a servicios educativos y de salud en ambas ciudades.

1.7.4 Problemáticas socioambientales y retos de sostenibilidad ambiental en Sisal

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales ha reportado la ocupación ilegal de terrenos ganados al mar, es decir, superficies costeras que anteriormente estaban cubiertas por mar y que en la actualidad son tierra firme (SEMARNAT, 2025). De acuerdo con el último cambio que tuvo la Ley General de Bienes Nacionales (2004), estos terrenos son propiedad de la nación y están bajo dominio público, por lo que no se pueden vender, perder ni embargar. No obstante, en Sisal

se ha documentado la invasión, desmonte y lotificación de estas áreas con fines comerciales, sin las autorizaciones correspondientes. Esta situación ha generado impactos ambientales negativos como la pérdida de manglares y dunas, la alteración de la dinámica costera y la erosión de playas, además de un conflicto social entre pobladores, autoridades y órganos de procuración de justicia ambiental (PROFEPA, 2025).

De acuerdo con la tesis “La magia del despojo. Patrimonialización y turística del espacio rural: los Pueblos Mágicos de Maní y Sisal, Yucatán” de González Márquez (2024), el nombramiento de Sisal como “Pueblo Mágico” dio como resultado la construcción de viviendas turísticas, cerca de manglares y dunas costeras, contradiciendo el Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Costa de Yucatán (POETCY), donde se establece que espacios con valor ambiental estratégico no pueden ser ocupados por estos proyectos. Esta situación ha hecho que se empiecen a deteriorar los atractivos de la naturaleza y que la comunidad local se vea desplazada o excluida debido al aumento del precio de la tierra.

Ambas situaciones se dan bajo condiciones insuficientes de gobernanza ambiental, donde la fragilidad institucional permite tanto la ocupación ilegal de terrenos federales como el avance de proyectos inmobiliarios con impactos significativos sobre el medio ambiente.

Otro reto crítico es el suministro de agua potable, ya que Sisal y los pueblos de los alrededores dependen principalmente de un acuífero costero que se encuentra amenazado por la intrusión salina. Investigaciones muestran que el aumento del nivel del mar y los cambios en la recarga del acuífero incrementarán la salinidad del agua subterránea. Para el año 2100, la población se verá obligada a extraer agua dulce a más de 18 km del litoral debido a la salinización del acuífero (Canul-Macario, 2024). La intrusión salina amenaza la reproducción de especies locales y afecta los ecosistemas (Novelo, I., & Soto, E., 2024). El suministro a largo plazo no está garantizado, lo que evidencia la vulnerabilidad de la infraestructura hídrica ante el cambio climático y la expansión urbana.

1.8 Unidad Académica de la UNAM en Sisal

1.8.1 Historia

La UAS fue creada en septiembre de 2009 como parte de un proyecto que recibió el respaldo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y del Gobierno del Estado de Yucatán y surge como un esfuerzo de la UNAM para integrar y fortalecer actividades de investigación, docencia y vinculación en este estado de Yucatán (Instituto de Ingeniería, 2009).

La UNAM participa en el Parque Científico y Tecnológico de Yucatán a través de la Unidad Académica Sisal, con tres unidades (Acuerdo para la Creación de la Unidad Académica de Ciencias y Tecnología de la UNAM en Yucatán, 2015):

- Facultad de Ciencias
- Facultad de Química
- Instituto de Ingeniería

Además, debido a su propósito, la UAS esta posee infraestructura y equipo para monitorear la costa, como tres embarcaciones, una estación de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA), una estación del Observatorio Hidrológico del IIUNAM, una torre de flujo, dos torres de videomonitorización fijas, una portátil y equipos para monitoreo oceanográfico y playero, entre otros equipos especializados (Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, s. f.). Su ubicación estratégica, junto al Puerto de Sisal, le otorga un entorno natural propicio para el estudio de los procesos físicos costeros.

Desde 2012, la UAS se ha convertido en subsede del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (PMyDI) de la UNAM, específicamente en la especialidad de Ingeniería de Costas y Ríos, lo que ha contribuido a ampliar la oferta educativa de la UNAM en la región. Además, la Unidad participa activamente en la Licenciatura en Ciencias de la Tierra de la ENES-Mérida, proporcionando formación académica en los últimos semestres de la carrera. La UAS ha logrado una destacada producción de conocimiento, que se refleja en la cantidad y calidad de los artículos publicados en revistas internacionales. También ha sido clave en la formación de recursos

humanos, en colaboración con programas nacionales e internacionales, así como en la ejecución de proyectos de investigación y de servicios técnicos (Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, s.f.).

1.8.2 Características generales del sitio

El terreno destinado a la UAS está delimitado por coordenadas geográficas específicas, que abarcan una superficie total de 58,960.16 m², el acuerdo de destino publicado en el Diario Oficial de la Federación el 6 de diciembre de 2010. Este terreno incluye una modificación respecto a las bases originales publicadas en 2001, añadiendo 8,590.23 m² de terreno ganado al mar. Sin embargo, tras una verificación física y mediante planos actualizados, se constató que la superficie actual es de 58,011.06 m², lo que representa una disminución de 949.10 m² respecto a lo otorgado originalmente. No se menciona a qué se debe esta disminución, pero podría deberse a algún proceso natural como erosión, ajustes en la precisión de los planos o un mal cálculo previo (Universidad Nacional Autónoma de México, s.f.).

El área del predio ocupada por infraestructura se distribuye para distintos usos, tal como se muestra en la Tabla 4.

Descripción	Superficie (m ²)	Porcentaje
Edificios e infraestructura de apoyo existentes (Tabla 3)	12,008.18	20.70 %
Infraestructura por construir o ampliar	2,866.11	4.94 %
Espacio proyectado para crecimiento futuro	19,932.31	34.36 %
Áreas destinadas a actividades de bajo impacto	18,283.53	31.52 %
Zonas de conservación	4,920.87	8.48 %
TOTAL	58,011.00	100 %

Tabla 3. Superficies Total de la Unidad Académica Sisal (Universidad Nacional Autónoma de México, 2011)

Descripción	Superficie (m ²)	Porcentaje
Edificios	3,687.18	30.70 %
Estacionamientos	1,095.00	9.11 %
Andadores, senderos y caminos	3,566.00	29.69 %
Sistema de tratamiento de agua y biofiltros	1,464.00	12.19 %
Estanques acuacultura	1,525.00	12.69 %
Reservorios de agua marina	600.00	4.99 %
Área para disposición de residuos	11.00	0.09 %
Edificio control de estanques	60.00	0.49 %
TOTAL	12,008.18	100 %

Tabla 4. Superficies de la Unidad Académica Sisal ocupada por la infraestructura (Universidad Nacional Autónoma de México, 2011)



Figura 8. Imagen satelital de la Unidad Académica de la UNAM en Sisal, Yucatán, México (Google Earth, 2023)

1.8.3 Infraestructura y funcionamiento

La UAS dispone de una infraestructura científica consolidada que respalda sus actividades de docencia e investigación en el ámbito costero. Dentro de sus instalaciones se encuentran diversos laboratorios especializados, entre los que destacan:

Facultad de Ciencias:

- Área de engorda experimental de camarón
- Área de reproducción de camarón
- Ecología y cultivo de especies marinas ornamentales
- Laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular
- Ecología y manejo de costas y mares
- Laboratorio de peces marinos
- Laboratorio de ecofisiología aplicada para organismos acuáticos (LABECO)
- Alimento vivo
- Ecotoxicidad

Facultad de Química:

- Productos naturales marinos
- Ciencias ambientales costeras
- Ecotoxicología y biorremediación

Instituto de Ingeniería:

- Laboratorio de ingeniería y procesos costeros
- Laboratorio nacional de resiliencia costera (LANRESC)

Además de los laboratorios, la UAS dispone de una planta generadora de energía autónoma operada con diésel, la cual permite garantizar el suministro eléctrico a toda la Unidad durante interrupciones del servicio público. No obstante, el consumo de combustible asociado a dicha planta no fue considerado dentro del alcance del presente estudio, debido a que los cortes en el suministro de energía eléctrica comenzaron a registrarse a partir del año 2025, mientras que el periodo de análisis evaluado corresponde al año 2024. Asimismo, dispone de una pequeña planta de tratamiento de aguas residuales, complementada con tres lagunas de oxidación para el tratamiento de los efluentes de los laboratorios. En la Figura 6, se muestra un mapa de la UAS.



Figura 9. Mapa ilustrativo de la UAS

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DEL ACV-O

2.1 Definición de objetivo y alcance del ACV-O

2.1.1 Objetivo del ACV-O

De acuerdo con la norma ISO 14072:2024, todo estudio de ACV-O debe establecer cuál será el objetivo del estudio, el cual orienta la definición del alcance, la recopilación de datos y la interpretación de resultados. En el presente trabajo, este objetivo coincide con el objetivo general de la investigación, el cual consiste en evaluar los impactos ambientales de la UAS, a través de un ACV-O, con el propósito de identificar las actividades y procesos que generan mayor impacto ambiental.

2.1.2 Alcance del ACV-O

Para este trabajo se evalúa el desempeño ambiental de la Unidad Académica de la UNAM, en Sisal, Yucatán.

2.1.3 Funciones del sistema

La función del sistema de la UAS es ofrecer servicios educativos a nivel superior (licenciatura, maestría y doctorado), incluyendo actividades de docencia e investigación, que permiten la formación de capital humano, así como la generación y transmisión de conocimiento científico y técnico.

2.1.4 Límites del sistema

El límite del sistema de este estudio se definió bajo un enfoque de la cuna a la puerta, considerando datos de inventario correspondientes a la extracción de materias primas, producción y transporte de materiales y energía hasta el lugar de uso.

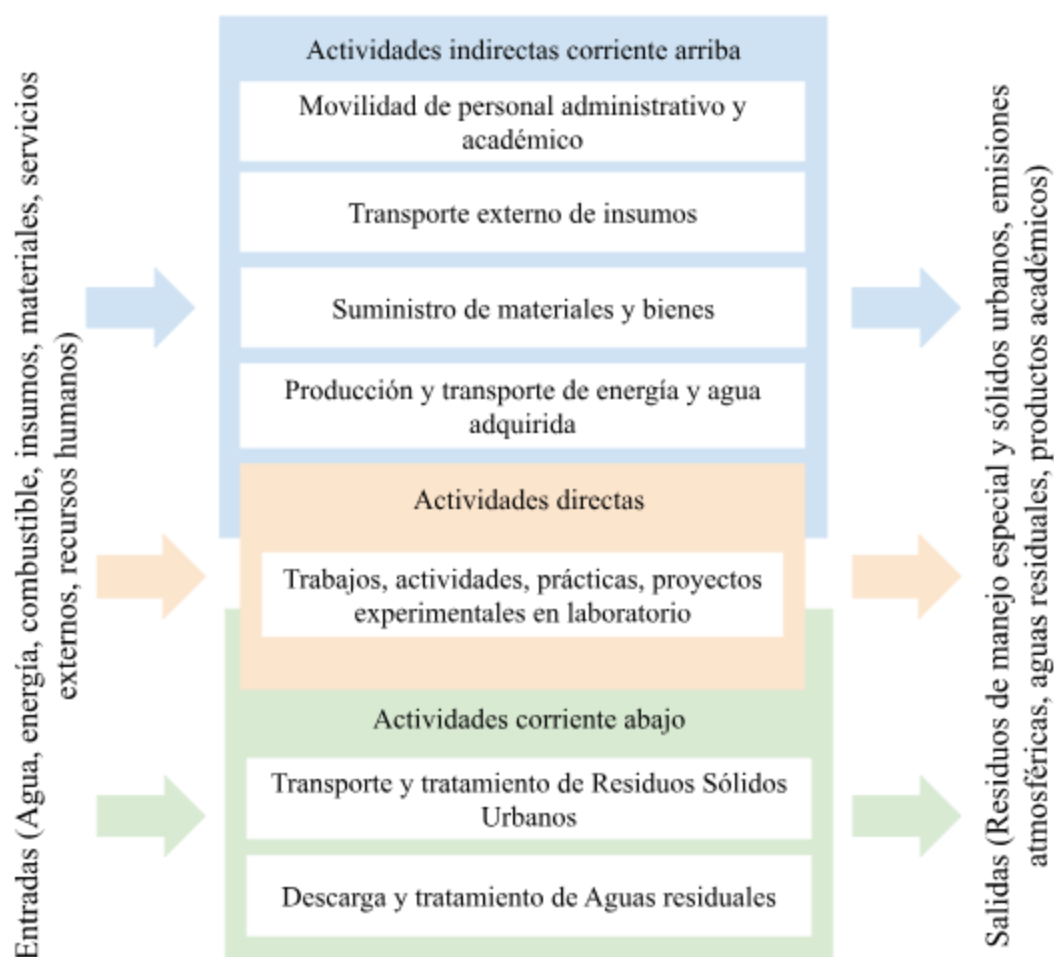


Figura 10. Límites del sistema de ACV-O de la Unidad Académica

2.1.4.1 Límites temporales

El año de referencia de los datos utilizados para la elaboración del inventario del ciclo de vida, corresponde al año 2024.

2.1.4.2 Límites geográficos

La evaluación se centra únicamente en la Unidad Académica, considerando todos sus edificios, así como las actividades relacionadas a la Unidad que generan directamente un impacto ambiental. Se incluyen también los impactos asociados al transporte de la comunidad que se desplaza desde otros puntos de la Ciudad de Mérida hacia la UAS, ya que, aunque esta actividad no sucede dentro de las instalaciones, es la consecuencia directa de su funcionamiento.

2.1.4.3 Límites de procesos

Incluidos:

- Consumo de energía eléctrica
- Consumo de agua
- Generación y disposición de residuos sólidos y manejo especial
- Adquisición de insumos y materiales
- Transporte vinculado a la operación de la Unidad
- Actividades académicas (impartición de clases teóricas y prácticas, la realización de prácticas en laboratorios, el desarrollo de proyectos de investigación, así como la asesoría y dirección de trabajos académicos)
- Servicios generales

Excluidos:

- Actividades personales que no estén ligadas a la operación de la Unidad
- Servicios institucionales que no afecten directamente la operación de la Unidad

2.1.4.4 Límites tecnológicos

Se consideran únicamente las tecnologías y procesos existentes en la Unidad.

2.1.5 Uso de criterios de priorización

Para este estudio no se aplicaron criterios de priorización para seleccionar o excluir procesos realizados dentro de la UAS, ya que el objetivo del ACV-O fue evaluar de manera integral las operaciones de la organización durante el año 2024.

Es importante considerar que la disponibilidad, calidad y nivel de detalle de los datos influyeron en la profundidad del modelado de algunos flujos y actividades. En este sentido, aquellos procesos para los cuales se contó con información más detallada pudieron ser representados con mayor precisión, mientras que otros se modelaron de forma más simplificada, sin que esto comprometa la representatividad del sistema analizado.

2.1.6 Organización estudiada

La organización estudiada es la Unidad Académica de la UNAM en Sisal, Yucatán. Esta Unidad se divide en 3 entidades: el Instituto de Ingeniería, la Facultad de Ciencias y la Facultad de Química, que trabajan de forma independiente entre ellas. Cada una cuenta con laboratorios especializados, y generan conocimiento científico, tesis de maestría, tesis de doctorado, contribuyen a la formación de recursos humanos de alta especialidad y colaboran en la solución de problemas de interés nacional. A continuación, se describe cada uno de los laboratorios.

Dentro de la Facultad de Ciencias se encuentran:

2.1.6.1 Laboratorio de engorda experimental de camarón

El laboratorio de engorda experimental de camarón es una instalación acuícola diseñada para el crecimiento controlado de camarones juveniles, con el objetivo de que alcancen la talla deseada. En este laboratorio se engordan 3 diferentes tipos de camarones: *Litopenaeus vannamei*, *Farfantepenaeus brasiliensis* y *Penaeus indicus*. El principal objetivo de la existencia de este laboratorio es la creación de conocimiento científico a través de la experimentación con ejemplares de camarones, por ello cada uno de los procesos está intensivamente controlado con la finalidad de tener ejemplares con las mejores características, tales como tamaño, color y un buen estado de salud.

Dentro de la infraestructura del laboratorio, se tiene un sistema de aireación intensivo que distribuye oxígeno a través de mangueras de PVC por difusora alimentada por un soplador de 5 caballos de fuerza, lo que asegura que las 24 horas del día y los 7 días de la semana los estanques cuenten con altas tasas de oxígeno. Se provee oxígeno hasta a 24 estanques de 20 m³ de material de fibra de vidrio con una geomembrana de PVC.

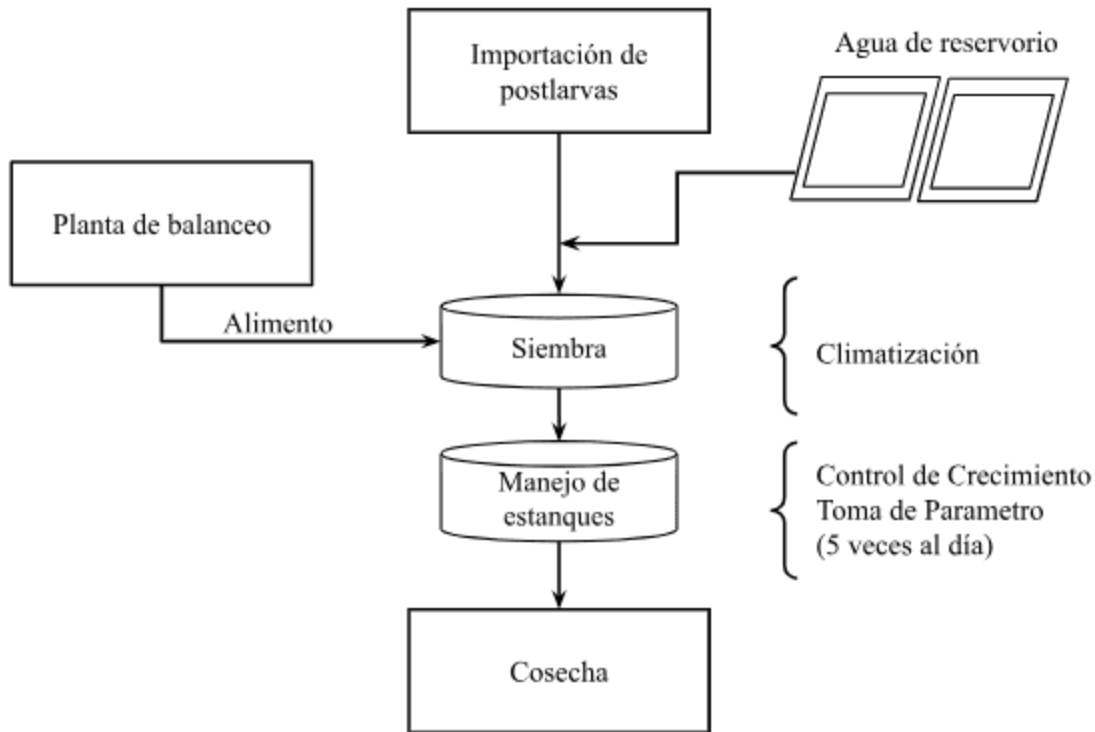


Figura 11. Diagrama de flujo del laboratorio de engorda de camarón

2.1.6.2 Laboratorio de reproducción de camarón

El laboratorio de reproducción de camarón es una instalación acuícola diseñada para la obtención de larvas viables a partir de organismos reproductores. En este laboratorio se reproducen organismos previamente engordados en el laboratorio de engorda de camarones, por lo que se sustentan entre sí. La instalación de este laboratorio cuenta con un total de 6 estanques de 20 m³ cada uno hecho de fibra de vidrio, que se alimentan de agua del reservorio que es filtrada antes de llegar a los estanques de reproducción, asegurando la eliminación de material particulado suspendido. Los estanques cuentan con un sistema de recirculación que hace el recambio del agua al 100 % cada dos días, debido a la materia orgánica producida por los organismos y por los residuos de la alimentación semihúmeda.

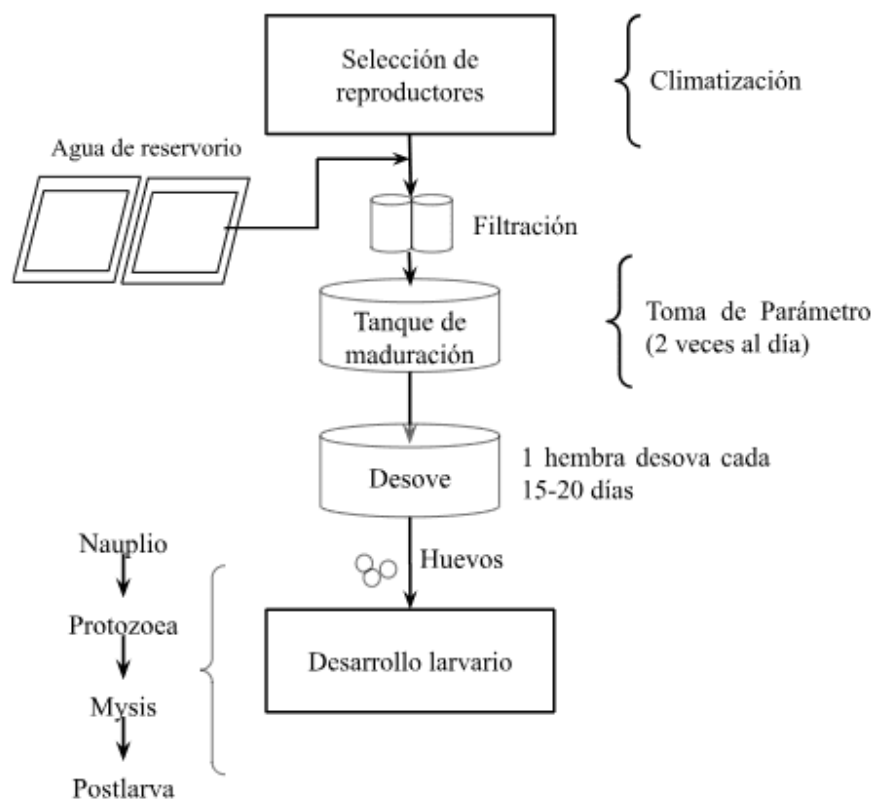


Figura 12. Diagrama de flujo del laboratorio de reproducción de camarón

2.1.6.3 Laboratorio de ecología y cultivo de especies marinas ornamentales

El laboratorio de Ecología y Cultivo de especies marinas ornamentales está dedicado al estudio, mantenimiento y reproducción controlada de organismos ornamentales como el *Hippocampus erectus*, con el objetivo de crear material científico a través de la experimentación. En este laboratorio se combinan actividades de investigación científica con prácticas de campo, debido a que aún se requiere la captura controlada de ejemplares con fines de estudio y conservación. La infraestructura del laboratorio está constituida por al menos 25 tanques de 70 lt cada uno y 10 tanques de 9 lt, cada uno de estos con sus respectivos filtros y bombas de agua que mantienen el agua en constante movimiento. El laboratorio opera bajo condiciones controladas que permiten simular los ambientes naturales de los *Hippocampus erectus* mediante el manejo de la temperatura,

salinidad, pH, oxígeno disuelto e iluminación. Estas condiciones aseguran la supervivencia y el bienestar de los organismos.

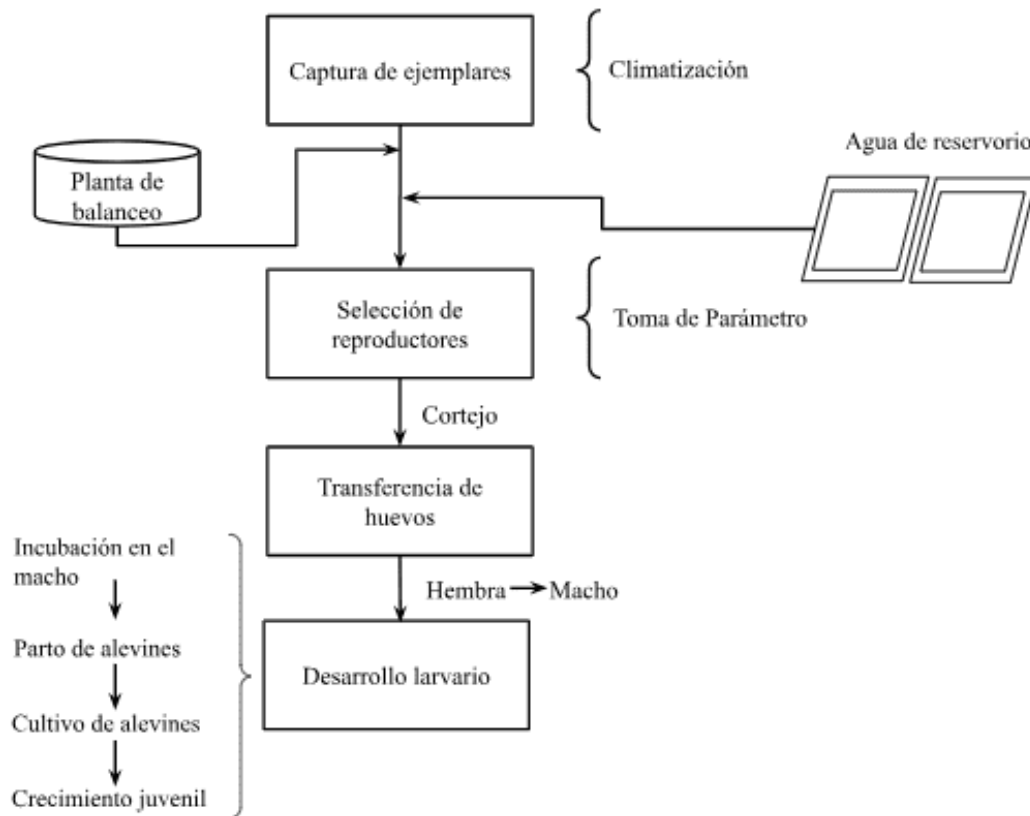


Figura 13. Diagrama de flujo del laboratorio de ecología y cultivo de especies marinas ornamentales

2.1.6.4 Laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular

El laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular está destinado a la realización de experimentos en diversas áreas de la ciencia. Los experimentos que se llevan a cabo en el laboratorio dependen completamente de los proyectos de investigación de los estudiantes, lo que sugiere que la carga de entradas y salidas de insumos y reactivos químicos no es constante debido a la variabilidad de la demanda de insumos en el laboratorio. El laboratorio cuenta con una amplia gama de equipos, reactivos químicos e insumos, los cuales se encuentran bajo calefacción controlada, con la finalidad de preservarlos y mantenerlos estabilizados.

2.1.6.5 Laboratorio de ecología y manejo de costas y mares

El laboratorio de ecología y manejos de costas y mares se dedica al estudio, preservación y conservación de plantas, invertebrados y vertebrados. El laboratorio cuenta con áreas de almacenamiento donde se encuentra una amplia gama de colecciones biológicas que pueden ser consultadas para la investigación, el área de almacenamiento cuenta con equipos de ventilación y calefacción, además de áreas donde se preparan las muestras, y se realizan los estudios taxonómicos. En este laboratorio se combinan actividades científicas con prácticas de campo, ya que la mayoría de las muestras son recolectadas por la comunidad

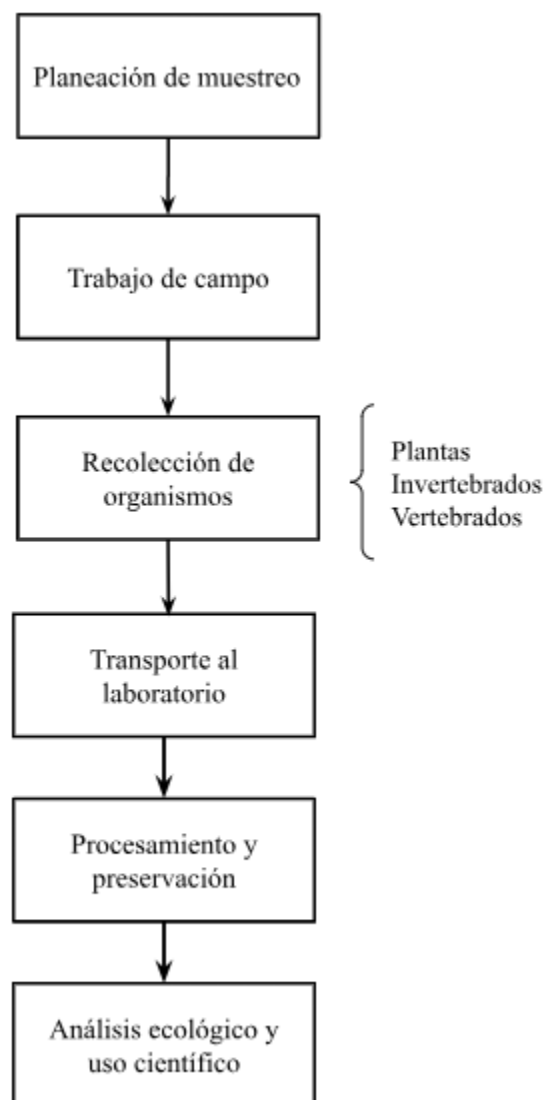


Figura 14. Diagrama de flujo del laboratorio de ecología y manejo de costas y mares

2.1.6.6 Laboratorio de peces marinos

El laboratorio cuenta con dos áreas: una de larvicultura y preengorda, que fue implementada a partir de 2025, y otra dedicada a la reproducción. El área de larvicultura y preengorda está diseñada para el cultivo temprano de peces marinos, en esta área se cultiva principalmente el *Trachinotus carolinus* o mejor conocido como pámpano de la Florida, cuenta con 3 estanques de 5 m³ destinados al desarrollo larvario y 10 estanques de 0.5 m³ para la preengorda. El área de reproducción está destinada a reproducir especies marinas adultas, incluyendo el robalo blanco del Atlántico y el mero. Cuenta con 6 estanques de 10 m³ diseñados para proporcionar suficientes espacios y condiciones adecuadas que favorezcan la maduración. El laboratorio también produce una parte del alimento vivo para larvas y juveniles, para esto se disponen 2 tanques de 0.5 m³ para el cultivo de rotíferos y artemias.

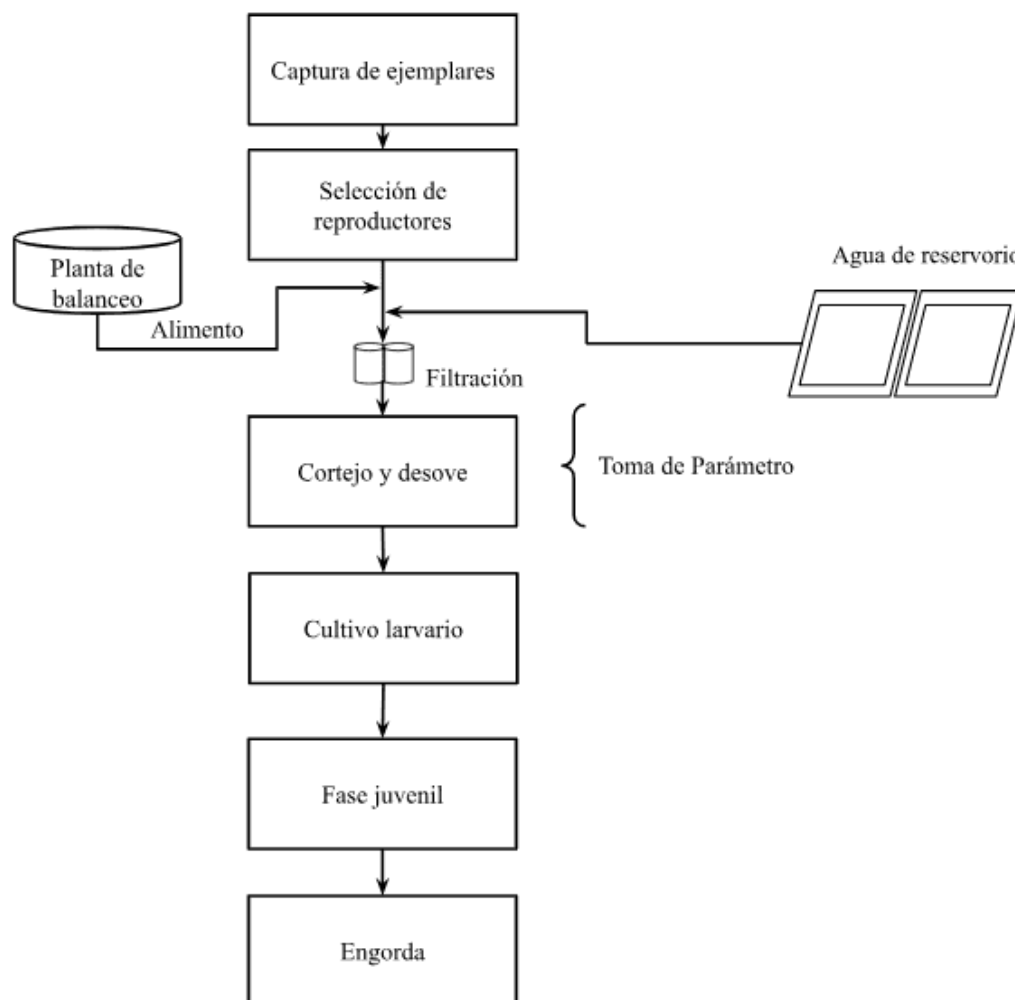


Figura 15. Diagrama de flujo del laboratorio de peces marinos

2.1.6.7 Laboratorio de nutrición acuícola & biotecnología

El laboratorio de nutrición acuícola & biotecnología se dedica a la formulación de dietas y a la elaboración de estrategias nutricionales para organismos acuáticos. Su objetivo es optimizar cada una de las dietas desarrolladas, promoviendo mejoras que repercutan positivamente en los organismos, tanto en su crecimiento, como en su salud o en su eficiencia reproductiva. Estos lineamientos los determinan los que solicitan la dieta, pudiendo ser estudiantes que están realizando investigaciones o personas externas a la Facultad de Ciencias. El laboratorio cuenta con áreas para la preparación de las dietas, análisis químicos de alimentos y sistemas de prueba experimentales con organismos acuáticos. En cuanto a infraestructura, el laboratorio cuenta con equipos especializados como molinos, tamizadores, balanzas analíticas, hornos, mezcladoras, prensas y cuenta con al menos 30 tanques de aproximadamente 10 lt con un sistema de aireación. El laboratorio opera en condiciones de temperatura controlada, lo cual es indispensable para asegurar que los alimentos no perezcan.

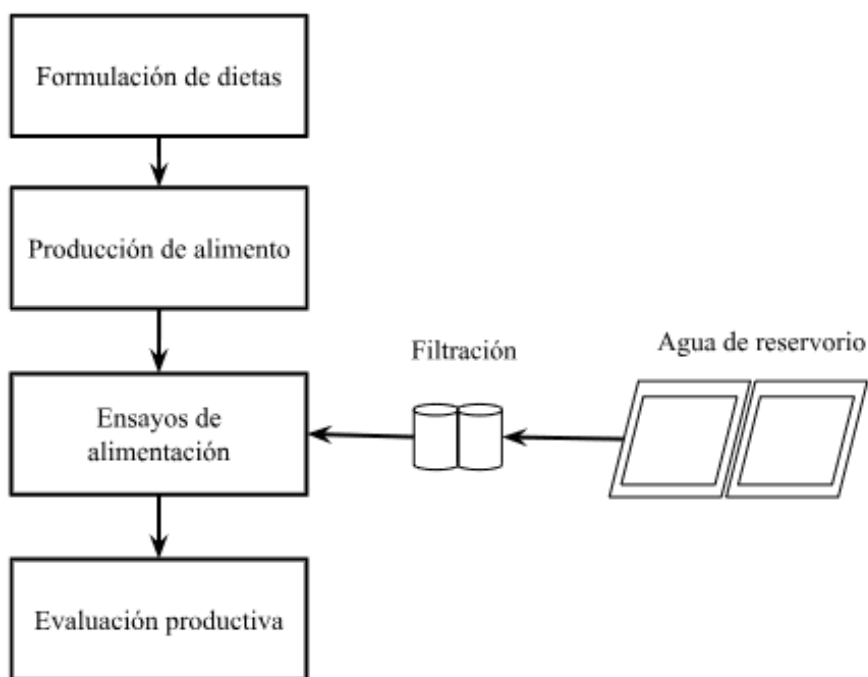


Figura 16. Diagrama de flujo del laboratorio de nutrición acuícola & biotecnología

Dentro del Instituto de Ingeniería se encuentra:

2.1.6.8 Laboratorio de ingeniería y procesos costeros

El laboratorio de ingeniería y procesos costeros se dedica al estudio, análisis y modelación de procesos físicos que ocurren en zonas costeras, tales como el oleaje, las corrientes y el transporte de sedimentos, entre otros. El laboratorio cuenta con infraestructura especializada, en la que se destaca un canal de olas, diseñado para reproducir condiciones controladas de oleaje. Esto permite simular distintos escenarios, variando parámetros como la altura, el periodo y la dirección de las olas, con el fin de estudiar el comportamiento y crear conocimiento a través de ello. Aquí mismo se desarrollan otros experimentos con el uso de equipos e instrumentos de medición, tales como sensores de nivel de agua, anemómetros láser Doppler, ecosonda para batimetría y clúster de cómputo, entre otros equipos especializados para cada área de estudio.

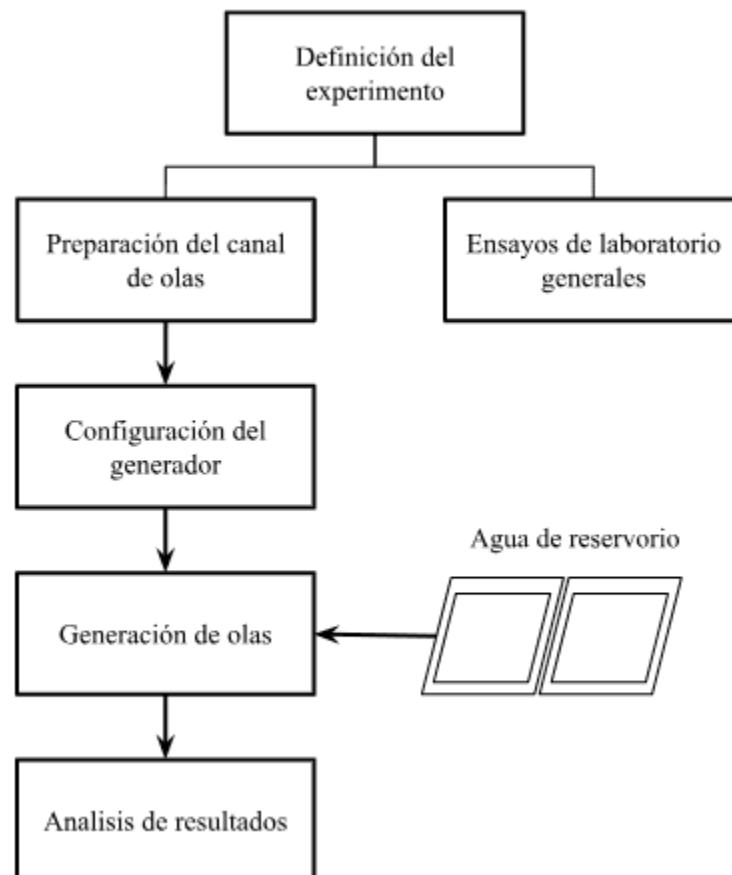


Figura 17. Diagrama de flujo del laboratorio de ingeniería y procesos costeros

Dentro de la Facultad de Química se encuentran:

2.1.6.9 Laboratorio de productos naturales marinos

El laboratorio de productos naturales marinos se dedica al estudio de compuestos biológicamente activos presentes en organismos marinos, como algas, vertebrados e invertebrados. Su principal objetivo es utilizar el mar como fuente de nuevos compuestos farmacéuticos que contribuyan al combate de enfermedades. Para alcanzar el objetivo, el laboratorio tiene tres líneas de investigación:

- Productos naturales marinos presentes en organismos endémicos de la Península de Yucatán
- Productos naturales marinos en microorganismos de cenotes y sedimentos de la costa de Yucatán
- Biotecnología y biocatálisis para la generación de productos naturales marinos

Adicionalmente, el laboratorio cuenta con un plan para el manejo de residuos orgánicos, donde minimiza los residuos orgánicos a través de la neutralización para, posteriormente aprovecharlos mediante un sistema de composta.

2.1.6.10 Laboratorio de ciencias ambientales costeras y ecotoxicología

El laboratorio de ciencias ambientales costeras y ecotoxicología se dedica al estudio del efecto de los contaminantes en los organismos y de cómo se comporta la toxicidad ante diferentes factores como la temperatura, pH, salinidad, etc.

2.1.6.11 Laboratorio de biorremediación

El laboratorio de biorremediación se dedica a la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales; esta remoción se lleva a cabo a través del uso de microorganismos como microalgas, que logran remover metales, fósforo, materia orgánica y nitrógeno. El laboratorio, para promover

el reciclaje de nutrientes, evalúa si es viable aprovechar la biomasa de microalgas generada para producir biocombustibles, alimentos u otros productos.

2.1.7 Unidad de reporte

La unidad de reporte de este estudio corresponde a la operación anual de la UAS, durante el año 2024, considerando una comunidad total de 214 personas, integrada por estudiantes, personal académico y personal administrativo.

La operación institucional se caracteriza por el desarrollo de actividades académicas, de investigación y de formación de recursos humanos, cuyos principales resultados organizacionales durante el periodo de referencia incluyen la realización de 1,600 muestras y 1,800 análisis, así como la generación de 59 publicaciones científicas indizadas y 74 no indizadas, la participación en 126 conferencias académicas, el desarrollo de 51 proyectos de investigación, la titulación de 15 estudiantes de licenciatura, 21 de maestría y 14 de doctorado y, la elaboración de 15 tesis.

La movilidad asociada a la comunidad de la Unidad Académica se realiza mediante diversos medios de transporte, incluyendo bicicleta, transporte público (autobús), vehículos de uso personal, vehículos compartidos, motocicletas y, de manera ocasional, viajes en avión.

2.1.8 Período de referencia

El año de referencia de este estudio es 2024.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO

La evaluación de impacto se realizó mediante la aplicación de los métodos ReCiPe e IMPACT World+, con el objetivo de analizar y comparar los resultados de ambos. El uso de dos métodos reduce la incertidumbre, fortaleciendo la interpretación de los resultados desde diferentes perspectivas científicas.

El método IMPACT World+ (IMPACT World+ *midpoint* method for Continental Latin America, versión 1.251) ofrece una modelación que representa las condiciones medianas de un área específica, en este caso Latinoamérica (Bulle et al., 2013). Este enfoque es adecuado para estudios a organizaciones, ya que permite aproximar los impactos ambientales a las condiciones geográficas reales. Una desventaja es que el método no considera el punto exacto donde se generan los impactos, sino que da resultados de un escenario regional.

El método ReCiPe (2016 v1.03, *midpoint* (H)) fue seleccionado por su alcance internacional, siendo uno de los métodos con mayor aceptación, facilitando la comparación con otros estudios. El objetivo de este método es traducir las emisiones y extracción de recursos en valores numéricos que representan los impactos ambientales, siendo estos valores los que expresan la gravedad del impacto ambiental (Schumacher, 2025).

El uso de ambos métodos permite tomar tanto fortalezas como desventajas de la modelación de cada método: mientras que IMPACT World+ aporta una mayor contexto regional, ReCiPe ofrece un marco de referencia global.

3.1 Categorías de impactos seleccionadas

La selección de las categorías de impacto se hizo de acuerdo con la carga ambiental en cada una de ellas, seleccionando las que representan mayores impactos ambientales en la organización. Las categorías seleccionadas para este estudio se detallan en la Tabla 5.

Categoría ReCiPe (midpoint H)	Unidad de la categoría	Factor de caracterización de punto medio (CFm)
Cambio Climático	ton CO ₂ eq	Potencial de calentamiento global
Acidificación terrestre	ton SO ₂ eq	Potencial de acidificación terrestre
Eutrofización marina	kg N eq	Potencial de eutrofización del mar
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	Potencial de eutrofización del agua dulce
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC – 11 eq	Potencial de agotamiento del ozono
Recursos energéticos: no renovables, fósiles	ton oil eq	Potencial de combustibles fósiles
Uso de agua	m ³ agua	Potencial de consumo de agua
Formación de partículas	kg PM _{2.5} eq	Potencial de formación de material particulado

Tabla 5. Categorías ReCiPe de impacto elegidas para el ACV-O (Huijbregts et al, 2017)

Categoría IMPACT World+	Unidad de la categoría	Factor de caracterización
Cambio Climático	ton CO ₂ eq	Potencial de calentamiento global
Acidificación terrestre	ton SO ₂ eq	Potencial de acidificación terrestre
Eutrofización marina	kg N _{lim} eq	Potencial de eutrofización del mar
Eutrofización de agua dulce	kg PO ₄ P _{lim} eq	Potencial de eutrofización del agua dulce
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC – 11 eq	Potencial de agotamiento del ozono
Uso de energía fósil y nuclear	MJ eq	Potencial de combustibles fósiles
Escasez de agua	m ³ agua	Potencial de consumo de agua
Formación de partículas	kg PM _{2.5} eq	Potencial de formación de material particulado

Tabla 6. Categorías IMPACT World+ de impacto elegidas para el ACV-O (Bulle et al., 2019)

A continuación, se detallan las categorías de impacto consideradas, haciendo uso de la información proporcionada por “ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at *midpoint* and endpoint level”, “IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method” (Huijbregts et al., 2017) y “Comparison of ReCiPe 2016, ILCD 2011, CML-IA baseline and IMPACT 2002+ LCIA methods: a case study based on the electricity consumption mix in Europe” (Rybczewska-Błażejowska & Jeziński, 2024).

3.1.1 Cambio Climático (*Climate Change*)

Según el glosario del Informe sobre el Medio Ambiente (ROE), el cambio climático se define como cualquier cambio sustancial en las mediciones del clima (como la temperatura o la precipitación) que perdure durante un período prolongado (décadas o más). El cambio climático puede ser el resultado de factores y procesos naturales o de actividades humanas (ROE Glossary 2025).

En ReCiPe, la categoría de impacto de cambio climático evalúa cómo las emisiones de GEI afectan la temperatura y cuantifica el potencial de calentamiento global de cada GEI, expresado en kg de CO₂ eq, durante un tiempo específico (20, 100 o 1,000 años).

En IMPACT World+, se pueden evaluar los impactos al calentamiento global a corto plazo (short term) y largo plazo (long term), considerando la persistencia de los gases en la atmósfera y sus efectos acumulativos a lo largo del tiempo. En el nivel *midpoint*, el impacto se mide en términos de kg de CO₂ eq, a partir de factores de caracterización basados en el forzamiento radiactivo de los GEI, de manera coherente con el enfoque del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). El método también añade una mayor regionalización y diferenciación temporal, lo que ayuda a representar de forma más realista cómo los efectos del cambio climático pueden variar según el lugar y el periodo analizado.

3.1.2 Acidificación terrestre (*Terrestrial Acidification*)

Las emisiones de sustancias inorgánicas, como el dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x), y su posterior deposición en el suelo provocan un aumento en la acidez del suelo debido al aumento de iones H⁺. Este proceso disminuye la capacidad de neutralizar ácidos, lo que afecta la fertilidad de la tierra y su equilibrio químico.

En ReCiPe, la acidificación terrestre se expresa en kg SO₂ eq. Esta unidad evalúa los efectos acidificantes de distintas sustancias en SO₂, siendo la sustancia de referencia debido a que

reacciona fácilmente en la atmósfera y puede convertirse en ácido sulfúrico al reaccionar con el vapor de agua, contribuyendo a la formación de lluvia ácida.

En IMPACT World+, la acidificación terrestre se modela considerando las etapas de emisión, transporte atmosférico, deposición y respuesta del ecosistema, incorporando factores de caracterización que consideran la sensibilidad regional de los suelos y la capacidad de neutralización del suelo.

3.1.3 Eutrofización marina (*Marine eutrophication*)

Las descargas de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, promueven un crecimiento excesivo de fitoplancton y algas, consumiendo oxígeno disponible y afectando la biodiversidad marina y la productividad de los ecosistemas.

En ReCiPe, este impacto se expresa en kilogramos equivalentes de nitrógeno (kg N eq). Este indicador mide la contribución de las emisiones de nutrientes al enriquecimiento de los cuerpos de agua marinos, permitiendo comparar el efecto de diferentes sustancias nitrogenadas bajo una misma unidad de referencia.

En IMPACT World+, la eutrofización marina se modela considerando el destino de los nutrientes, su transporte desde las fuentes de emisión hasta los cuerpos marinos y cómo responde el ecosistema receptor. El impacto, en *midpoint*, se expresa en unidades de nitrógeno limitante equivalente (kg N_{lim} eq), lo que representa la cantidad efectiva de nutrientes que provoca o contribuye al crecimiento biológico. Este enfoque incorpora la diferenciación regional y las características de las cuencas.

3.1.4 Eutrofización de agua dulce (*Freshwater eutrophication*)

La eutrofización en cuerpos de agua dulce ocurre cuando aumentan las concentraciones de nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno, que llegan de descargas domésticas, agrícolas e

industriales. Este exceso de nutrientes hace que crezcan muchas algas y plantas acuáticas que consumen oxígeno durante la respiración y descomposición. Esto puede causar condiciones de hipoxia, afectando la supervivencia de peces y otros organismos acuáticos, disminuyendo la calidad del agua para usos ambientales y humanos (Pedrozo Acuña & Ramírez Salinas, 2020).

En ReCiPe, este impacto se expresa en kilogramos de fósforo equivalente (*kg P eq*), representando la cantidad de fósforo que contribuye realmente a la eutrofización en cuerpos de agua continentales.

En IMPACT World+, la eutrofización de agua dulce se mide en kilogramos de fosfato equivalente ($\text{kg PO}_4^{3-} \text{ eq}$), se usa el fosfato debido a que actúa como nutriente limitante en la mayoría de los cuerpos de agua, donde el aumento de este elemento favorece el crecimiento de algas.

3.1.5 Agotamiento de la capa de ozono (*Ozone depletion*)

La capa de ozono protege la Tierra de la radiación ultravioleta del Sol. En los últimos años, la liberación de sustancias como los clorofluorocarbonos (CFC), los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y los halones ha reducido el grosor de la capa de ozono. Esto aumenta la radiación incrementando los riesgos para la salud humana y en los ecosistemas (EPA, 2001).

En ReCiPe, el agotamiento de la capa de ozono se expresa en kilogramos equivalentes de CFC-11 (kg CFC-11 eq), para un horizonte temporal definido. Esta unidad de referencia permite normalizar y comparar el efecto de diferentes sustancias en función de su capacidad relativa para destruir ozono estratosférico.

En IMPACT World+, en esta categoría se utiliza el CFC-11 como sustancia de referencia y los resultados se expresan en kg CFC-11 eq . Para caracterizar cada sustancia, se toma en cuenta la capacidad para liberar radicales halogenados en la estratósfera y el tiempo que permanece en la atmósfera, ya que estas variables determinan su contribución efectiva a la degradación del ozono.

3.1.6 Recursos energéticos: no renovables, fósiles (*Fossil resource scarcity*)

La categoría de uso de recursos energéticos no renovables mide el agotamiento de fuentes fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón, principalmente durante su extracción y consumo

En el método ReCiPe, esta categoría mide la escasez de recursos fósiles a partir de la cantidad de recurso extraído. La unidad de potencial de agotamiento de recursos energéticos se mide en kilogramos de petróleo equivalente (*kg oil eq*), lo que permite comparar distintos combustibles en un solo combustible de referencia.

En IMPACT World+, el uso de recursos energéticos fósiles se expresa en megajulios de energía fósil equivalente (*MJ oil eq*). Este indicador considera el contenido energético de cada combustible, lo que permite agrupar en una sola unidad fuentes como petróleo, gas natural y carbón, sin importar el estado en el que se encuentren.

3.1.7 Uso de agua (*Water use*)

La categoría de uso de agua incluye cualquier fin del recurso hídrico, como su incorporación a productos, transferencia entre cuencas, evaporación, extracción directa y también considera cualquier forma de uso que provoque su reducción para otros usos humanos o ecológicos (ISO 14046, 2014).

En ReCiPe, se evalúa el uso del agua considerando únicamente la fracción del agua que no retorna a la cuenca de origen después de su uso. El modelado de impactos se realiza considerando que todos los efectos relacionados con el uso dan como origen la reducción de la disponibilidad del agua dulce. A nivel *midpoint*, el uso de agua se mide en m³ eq, el cual se calcula a partir de los flujos de agua reportados en el inventario.

En IMPACT World+, se consideran con mayor detalle los aspectos espaciales y la caracterización regional, tomando en cuenta la escasez hídrica local, la disponibilidad real del recurso y el tipo de

fuentes utilizadas (agua superficial, subterránea, renovable o no renovable). A nivel *midpoint*, el impacto se expresa generalmente en m^3 , e integra factores de caracterización regionales que representan la competencia entre los usos humanos y las necesidades ambientales, de manera que el daño potencial depende de la presión ejercida sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca y no únicamente del volumen de agua consumida.

3.1.8 Formación de partículas (*Fine particulate matter formation*)

La formación de partículas finas ($PM_{2.5}$), corresponde a la generación de aerosoles primarios y secundarios en la atmósfera, los cuales pueden tener efectos adversos significativos sobre la salud humana y los ecosistemas. Estas partículas, con un diámetro menor o igual a $2.5 \mu m$, pueden entrar en el sistema respiratorio e incluso alcanzar los alvéolos pulmonares, incrementando el riesgo de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y mortalidad prematura.

En ReCiPe, no se cuantifica directamente la masa emitida de $PM_{2.5}$, sino el impacto potencial en la salud humana, considerando la contribución de precursores atmosféricos como óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), amoníaco (NH_3) y compuestos orgánicos volátiles. El indicador se expresa generalmente en kilogramos equivalentes de $PM_{2.5}$ o en unidades relacionadas con daño a la salud, dependiendo del nivel de agregación seleccionado.

En IMPACT World+, a nivel *midpoint*, el método evalúa la contribución de las emisiones atmosféricas a la generación de material particulado fino, específicamente en material particulado $PM_{2.5}$: la unidad se expresa en kilogramos equivalentes de $PM_{2.5}$ formados. Esta categoría considera tanto las emisiones directas de partículas primarias como la formación de partículas secundarias, a partir de precursores como el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el amoníaco (NH_3) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), principalmente. El modelado se basa en factores de caracterización que expresan la capacidad de cada sustancia emitida para contribuir a la formación de $PM_{2.5}$, integrando procesos atmosféricos, transporte y la permanencia de las partículas en el aire.

3.2 Software utilizado

En el caso de este estudio, se hará uso de OpenLCA, un software de código abierto desarrollado por GreenDelta en Berlín, específicamente diseñado para realizar ACV. Esta herramienta permite hacer cálculos masivos de ACV y facilita la creación de modelos de cálculos compatibles con diversos estándares internacionales —como la norma europea EN15804 que establece cómo se deben desarrollar las Declaraciones Ambientales de Producto (EPD), las cuales informan sobre los impactos ambientales de un producto a lo largo de su ciclo de vida, siguiendo normas como ISO 14025— asimismo, es compatible con la huella ambiental y otros estándares. La empresa GreenDelta creó el software con el objetivo principal de poder diseñar un sistema modular, rápido y confiable para evaluar la sostenibilidad y modelar el ciclo de vida de productos o procesos. La idea era crear un sistema que fuera fácil de usar, visualmente claro y flexible; hecho en un lenguaje de programación común y usando únicamente software de código abierto, disponible para todos. Esto último fomentaría la creación de una comunidad que colaborara para mejorar el sistema (OpenLCA, marzo 2024).

3.3 Calidad de los datos

Los datos del ciclo de vida de los procesos, productos y servicios de la Unidad Académica fueron obtenidos de encuestas a personal administrativo, académicos, investigadores y estudiantes. Adicionalmente, se realizaron mediciones en sitio, y búsqueda de información a través de fuentes científicas. Se considera que los datos son de calidad ya que provienen de fuentes primarias.

3.4 Procedimiento de recopilación de datos

Para la elaboración del inventario del ciclo de vida organizacional de la UAS, se realizaron dos visitas durante el año 2025. La primera tuvo lugar en el mes de enero y la segunda en octubre. El objetivo de ambas visitas fue recabar información mediante entrevistas y cuestionarios aplicados directamente al personal administrativo y académico.

La recopilación de datos sobre los insumos, recursos, descargas de agua, manejo de residuos, uso de agua, uso de energía eléctrica y producción científica; engloban la información de la mayoría de los laboratorios existentes de la Unidad y el uso de recursos para el funcionamiento general. Para robustecer la información obtenida y completar la faltante, se realizó también una investigación adicional en fuentes secundarias, como documentos institucionales, informes, artículos científicos y bases de datos especializadas en ACV. De esta manera, se logró validar la información recabada durante las visitas, así como completar la comprensión de las actividades, procesos y recursos asociados a cada laboratorio.

3.5 Consideraciones del estudio

3.5.1 Consumo energético

Respecto al consumo de recursos energéticos, no se realizó una distribución de consumo energético por laboratorio, oficina, espacios compartidos, baños, etc. Se consideró un único consumo para toda la UAS, esto debido a la incertidumbre que se generaba al realizar la distribución, debido a la ausencia de mediciones individuales y de la variabilidad en los patrones de uso de energía en cada área.

El consumo de recursos energéticos se modeló de manera específica, ya que los datos de la base de Ecoinvent no representan adecuadamente el contexto energético de México. Por esto, se realizó un database de electricidad de alto voltaje más apegados a la realidad. En la Tabla 7, se detalla cómo está constituida la database del mix eléctrico.

Base de datos Ecoinvent	Descripción	kWh
electricity production, nuclear, boiling water reactor electricity, high voltage APOS, U – MX	Generación eléctrica nuclear mediante reactor de agua en ebullición	0.03420
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage APOS, U – MX	Generación eléctrica con gas natural en centrales de ciclo combinado	0.58460
electricity production, oil electricity, high voltage APOS, U – MX	Generación eléctrica a partir de derivados del petróleo	0.08630
electricity production, natural gas, conventional power plant electricity, high voltage APOS, U – MX	Generación eléctrica con gas natural en centrales convencionales	0.02730
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage APOS, U – M	Generación hidroeléctrica de pasada (sin embalse)	0.05860
electricity production, wind, <1MW turbine, onshore electricity, high voltage APOS, U – MX	Generación eólica terrestre con aerogeneradores menores a 1 MW	0.05860

Tabla 7. Composición del mix eléctrico utilizado en el estudio (SEMARNAT & CRE, 2024)

Base de datos Ecoinvent	Descripción	kWh
electricity production, deep geothermal electricity, high voltage APOS, U – MX	Generación eléctrica geotérmica profunda	0.01180
electricity production, hard coal electricity, high voltage APOS, U – MX	Generación eléctrica a partir de carbón mineral	0.03510

Tabla 7. (Continuación) Composición del mix eléctrico utilizado en el estudio (SEMARNAT & CRE, 2024)

3.5.2 Estructura de modelación

Dentro de la UAS se identificaron y modelaron de manera individual los laboratorios debido a la particularidad de sus actividades, insumos y procesos. Posteriormente, se modeló de forma independiente la movilidad de la totalidad de la unidad, considerando los desplazamientos del personal administrativo, académico y estudiantil, a través de diferentes medios de transporte como el uso de bicicleta, transporte público, auto propio, auto compartido y vuelos en avión. Finalmente, se modelaron los servicios generales, tales como el consumo de energía, el uso del agua y otros servicios compartidos. Esta estructura permitió representar con mayor detalle la organización.

Los resultados de impacto de cada subsistema fueron integrados a nivel organizacional, permitiendo evaluar el desempeño ambiental global de la UAS.

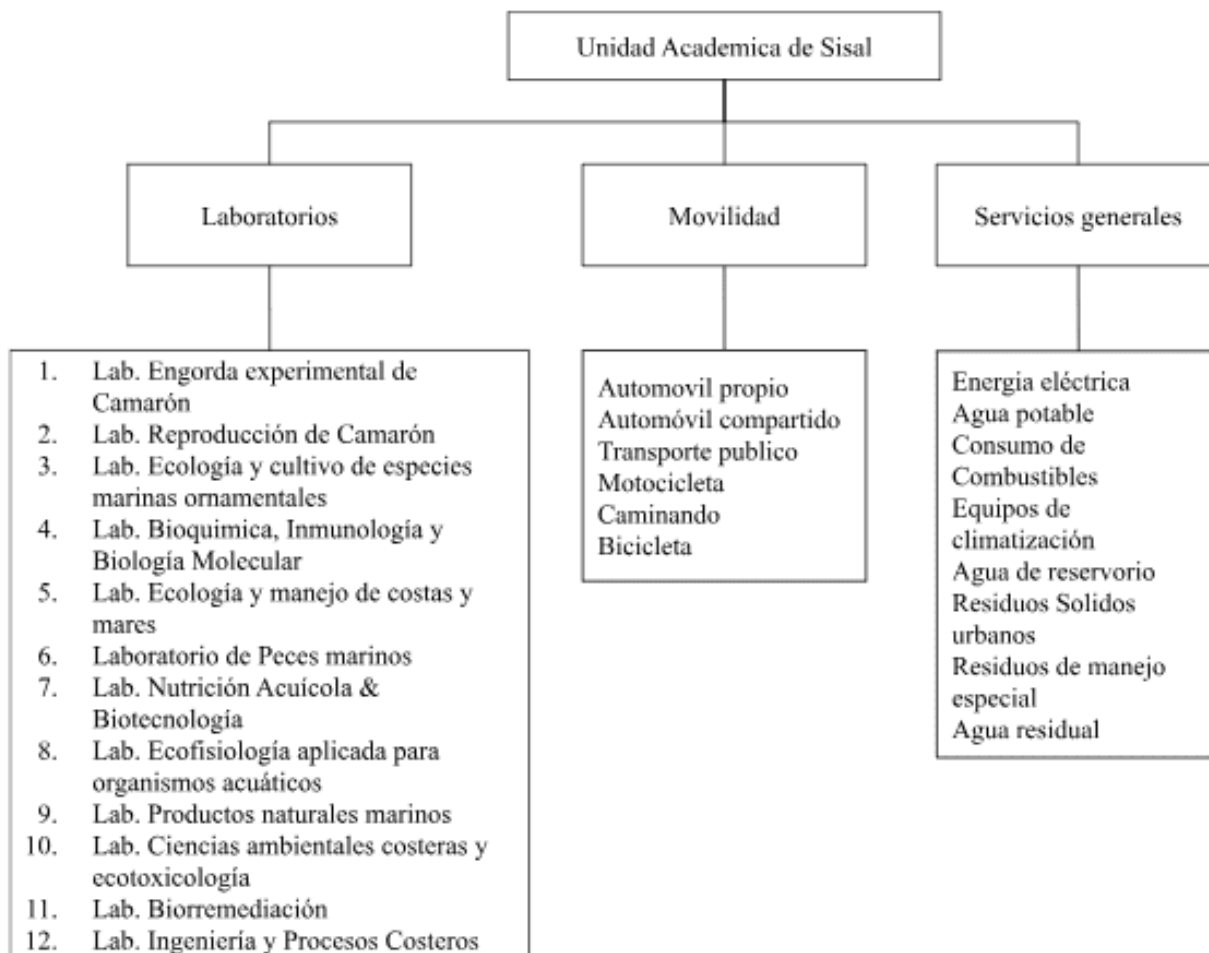


Figura 18. Estructura de modelación del Análisis de Ciclo de Vida Organizacional de la UAS

CAPÍTULO 4: INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

4.1 Análisis de inventario de Ciclo de Vida (ICV)

En el marco del ACV-O, el inventario se desarrolló a partir de la recopilación de datos primarios obtenidos directamente de los laboratorios y áreas operativas, complementados con datos secundarios provenientes de bases de datos reconocidas, como Ecoinvent. El inventario desarrollado integra los flujos de entradas y salidas de materiales, energía, agua, transporte y emisiones asociadas a los distintos procesos que conforman la UAS y sirve como base para la modelación de los impactos ambientales en el software OpenLCA. A continuación, se presentan las entradas y salidas de cada uno de los procesos considerados en este estudio.

4.2 Actividades directas

En esta fase, el inventario fue dividido en diez módulos, que representan los doce laboratorios, ya con la unificación de los laboratorios de química y los servicios generales de la unidad.

Las tablas que se muestran a continuación contienen las entradas y salidas de estos módulos en el año 2024 y forman parte del inventario del ciclo de vida organizacional. En esta fase se registraron los materiales en OpenLCA, considerando para cada tipo de insumo el tipo de material correspondiente a la base de datos Ecoinvent.

Entradas laboratorio de engorda de camarón			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Harina de pescado, 65-67 % de proteína	1.2	t	market for fishmeal, 65-67 % protein fishmeal, 65-67 % protein APOS, U - GLO
Melaza	50	kg	market for sugar, from sugarcane sugar, from sugarcane APOS, U
Agua salada	12,544	m ³	Flujo genérico definido dentro de openLCA
Trióxido de cromo	0.4375	kg	market for chromium trioxide, flakes chromium trioxide, flakes APOS, U - GLO
Composta	1	kg	treatment of biowaste, industrial composting compost APOS, U - RoW
Electricidad, media tensión	0.278803	kWh	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage APOS, U - MX
Aceite de pescado	2.45	kg	market for fish oil, from anchovy fish oil, from anchovy APOS, U - GLO
Harina de pescado, 63-65 % de proteína	38.5	kg	market for fishmeal, 63-65 % protein fishmeal, 63-65 % protein APOS, U - GLO
Grano de maíz	11.025	kg	market for maize grain maize grain APOS, U - RoW
Alimento proteico, 100% crudo	1.3125	kg	market for protein feed, 100% crude protein feed, 100% crude APOS, U - GLO
Cloruro de sodio, en polvo	0.4375	kg	market for sodium chloride, powder sodium chloride, powder APOS, U - GLO
Harina de soja	5.6	kg	market for soybean meal soybean meal APOS, U - RoW
Alimento para Postlarva	87.5	kg	Inventory Of Agribalyse V3.0.1, 2020

Tabla 8. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio del área de engorda experimental de camarón

Salidas laboratorio de engorda de camarón			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Amonio	9.93	kg	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Nitrito	22.16	kg	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Agua/m ³ , MX	12,559.75	m ³	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Residuos biológicos	0.18182	kg	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Las entradas y salidas presentadas constituyen el balance de materia y energía del sistema, referidas a una producción total de 25,000 postlarvas de camarón.			

Tabla 8. (Continuación) Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio del área de engorda experimental de camarón

Entradas laboratorio de reproducción de camarón			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Conservas de pescado, pescado pequeño	100	kg	market for fish canning, small fish fish canning, small fish APOS, U - GLO
Congelación de pescado, pescado pequeño	200	kg	market for fish freezing, small fish fish freezing, small fish APOS, U - GLO
Harina de pescado, 65-67 % de proteína	200	kg	market for fishmeal, 65-67 % protein fishmeal, 65-67 % protein APOS, U - GLO
Agua salada	5824	m ³	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Salidas laboratorio de reproducción de camarón			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
DBO ₅ , Demanda Biológica de Oxígeno	1	kg	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Nitrato	2.38	kg	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Fósforo	28.8	kg	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Agua/m ³ , MX	5824	m ³	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Las entradas y salidas presentadas constituyen el balance de materia y energía del sistema, referidas a una producción total de 100 camarón.			

Tabla 9. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de reproducción de camarón

Entradas laboratorio de peces marinos			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Ácido graso	10	kg	market for fatty acid fatty acid APOS, U - GLO
Yodo	140	kg	market for iodine iodine APOS, U - GLO
Gasolina sin plomo, quemada en maquinaria	6.68	MJ	market for petrol, unleaded, burned in machinery petrol, unleaded, burned in machinery APOS, U - GLO
Hipoclorito de sodio, sin agua, en solución al 15 %	365	kg	market for sodium hypochlorite, without water, in 15 % solution state sodium hypochlorite, without water, in 15 % solution state APOS, U - RoW
Agua salada	13505	m ³	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Salidas laboratorio de peces marinos			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Agua/ m ³ , MX	13505	m ³	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Las entradas y salidas presentadas constituyen el balance de materia y energía del sistema, referidas a una producción total de 400 <i>Trachinotus Carolinus</i> y 45 <i>Centropomus undecimalis</i> .			

Tabla 10. (Continuación) Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de reproducción de camarón

Entradas laboratorio de ecología y manejo de costas y mares			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Alcohol	315.6	kg	market for ethanol, without water, in 99.7 % solution state, from ethylene ethanol, without water, in 99.7 % solution state, from ethylene APOS, U - RoW
Formaldehído	109	kg	market for formaldehyde formaldehyde APOS, U - RoW

Tabla 11. Materiales e insumos de entrada del laboratorio de ecología y manejo de costas y mares

Salidas laboratorio de ecología y manejo de costas y mares			
Las entradas y salidas presentadas constituyen el balance de materia y energía del sistema, referidas a una producción total de 500 invertebrados, 1,000 vertebrados y 300 plantas, procesadas y preservadas.			

Tabla 11. (Continuación) Materiales e insumos de entrada del laboratorio de ecología y manejo de costas y mares

Entradas laboratorio de ecología y cultivo de especies ornamentales			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Alcohol	15.78	kg	market for ethanol, without water, in 99.7 % solution state, from ethylene ethanol, without water, in 99.7 % solution state, from ethylene APOS, U - RoW
Harina de pescado, 65-67 % de proteína	30	kg	market for fishmeal, 65-67 % protein fishmeal, 65-67 % protein APOS, U - GLO
Agua oxigenada	20	kg	market for hydrogen peroxide, without water, in 50 % solution state hydrogen peroxide, without water, in 50 % solution state APOS, U - RoW
Salvado de trigo	10	kg	market for wheat bran wheat bran APOS, U - RoW
Agua salada	254.554	m ³	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Salidas laboratorio de ecología y cultivo de especies ornamentales			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Agua/ m ³ , MX	254.554	m ³	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Las entradas y salidas presentadas constituyen el balance de materia y energía del sistema, referidas a una producción total de 150 <i>Hipocampus erectus</i> .			

Tabla 12. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de ecología y cultivo de especies ornamentales

Entradas laboratorio de ecofisiología aplicada para organismos acuáticos			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Pescado pequeño	700	kg	market for fish freezing, small fish fish freezing, small fish APOS, U - GLO
Gasolina sin plomo, quemada en maquinaria	6.63	MJ	market for petrol, unleaded, burned in machinery petrol, unleaded, burned in machinery APOS, U - GLO
Agua salada	12800	m ³	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Entradas laboratorio de ecofisiología aplicada para organismos acuáticos			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Amoníaco	7.68	kg	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Nitrato	294.4	kg	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Nitrito	2.55	kg	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Agua/ m ³ , MX	12800	m ³	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Las entradas y salidas presentadas constituyen el balance de materia y energía del sistema, referidas a una producción total de 700 <i>Octopus Maya</i> .			

Tabla 13. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de ecofisiología aplicada para organismos acuáticos

Entradas laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
1-propanol	100	mg	market for 1-propanol 1-propanol APOS, U - GLO
Cloroformo	100	mg	market for chloroform chloroform APOS, U - RoW
Alcohol	0.3156	g	market for ethanol, without water, in 99.7 % solution state, from ethylene ethanol, without water, in 99.7 % solution state, from ethylene APOS, U - RoW

Tabla 14. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular

Entradas laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Polipropileno, granulado	1.6	kg	market for polypropylene, granulate polypropylene, granulate APOS, U - GLO
Poliestireno de alto impacto	20.43	kg	market for polystyrene, high impact polystyrene, high impact APOS, U - GLO
Cloruro de potasio, grado industrial	85.09	g	market for potassium chloride, industrial grade potassium chloride, industrial grade APOS, U - GLO
Carbonato de sodio denso	78.802	g	market for soda ash, dense soda ash, dense APOS, U - GLO
Cloruro de sodio, polvo	25.78	g	sodium chloride production, powder sodium chloride, powder APOS, U - RoW
Nitrato de sodio	1.2	g	market for sodium nitrate sodium nitrate APOS, U - GLO
Sulfato de sodio, anhidrita	0.8	g	market for sodium sulfate, anhydrite sodium sulfate, anhydrite APOS, U - RoW
Tolueno	0.7008	kg	market for toluene, liquid toluene, liquid APOS, U - RoW
Agua desionizada	80	mg	market for water, deionised water, deionised APOS, U - RoW
Electricidad, alto voltaje	52.91	kWh	market for electricity, high voltage electricity, high voltage APOS, U (copy) - MX
Glucosa	20	kg	market for glucose glucose APOS, U - GLO
Patata	404.8	kg	market for potato potato APOS, U - RoW
Agua desionizada	2	kg	market for water, deionised water, deionised APOS, U - RoW

Tabla 14. (Continuación) Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular

Entradas laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Fosfato disódico	0.4	g	market for disodium phosphate disodium phosphate APOS, U - GLO
Glucosa	0.32	g	market for glucose glucose APOS, U - GLO
Cloruro de sodio en polvo	0.8	g	market for sodium chloride, powder sodium chloride, powder APOS, U - GLO
Infusión de cerebro de ternera	72	g	market for weaned calves, live weight weaned calves, live weight APOS, U - RoW
Salidas laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Polipropileno de desecho	1.6	kg	Flujo genérico definido dentro de openLCA
Poliestireno de desecho	20.43	kg	Flujo genérico definido dentro de openLCA

Tabla 14. (Continuación) Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de bioquímica, inmunología y biología molecular

Entradas laboratorio de nutrición acuícola y biotecnología			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Agua salada	54.45	m ³	Flujo genérico definido dentro de openLCA
Suero de leche de vaca	12	kg	market for buttermilk, from cow milk buttermilk, from cow milk APOS, U - GLO
Aceite de pescado	4	kg	market for fish oil, from anchovy fish oil, from anchovy APOS, U - GLO
Harina de pescado, 63-65 % de proteína	5	kg	market for fishmeal, 63-65 % protein fishmeal, 63-65 % protein APOS, U - GLO

Tabla 15. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de nutrición acuícola y biotecnología

Entradas laboratorio de nutrición acuícola y biotecnología			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Harina de pescado, 65-67 % de proteína	40	kg	market for fishmeal, 65-67 % protein fishmeal, 65-67 % protein APOS, U - GLO
Pienso proteico	5	kg	fodder yeast to generic market for protein feed protein feed, 100 % crude APOS, U - GLO
Cloruro de sodio	1000	mg	market for sodium chloride, powder sodium chloride, powder APOS, U - GLO
Harina de soja	10	kg	market for soybean meal soybean meal APOS, U - RoW
Aceite de soja	2	kg	market for soybean oil, crude soybean oil, crude APOS, U - RoW
Harina de trigo	15.6	kg	market for wheat flour mix wheat flour mix APOS, U - GLO
Salidas laboratorio de nutrición acuícola y biotecnología			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Agua/ m ³ , MX	54.45	m ³	Flujo genérico definido dentro de OpenLCA
Las entradas y salidas presentadas constituyen el balance de materia y energía del sistema, referidas a una producción total de 700 kg de alimento para camarón.			

Tabla 15. Tabla 15. (Continuación) Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de nutrición acuícola y biotecnología

Entradas laboratorio de productos marinos, ciencias ambientales costeras, ecotoxicología y biorremediación.			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Ácido acético	500	mg	market for acetic acid acetic acid APOS, U - GLO
Alcohol	15.78	kg	market for ethanol, without water, in 99.7 % solution state, from ethylene ethanol, without water, in 99.7 % solution state, from ethylene APOS, U - RoW
Ácido clorhídrico, sin agua, en solución al 30 %	500	mg	market for hydrochloric acid, without water, in 30 % solution state hydrochloric acid, without water, in 30 % solution state APOS, U - RoW
Ácido nítrico, sin agua, en solución al 50 %	500	mg	market for nitric acid, without water, in 50 % solution state nitric acid, without water, in 50 % solution state APOS, U - RoW
Polipropileno, granulado	1.6	g	market for polypropylene, granulate polypropylene, granulate APOS, U - GLO
Poliestireno de alto impacto	61.29	kg	market for polystyrene, high impact polystyrene, high impact APOS, U - GLO
Ácido sulfúrico	500	mg	market for sulfuric acid sulfuric acid APOS, U - RoW
Salidas laboratorio de productos marinos, ciencias ambientales costeras, ecotoxicología y biorremediación.			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Polipropileno de desecho	1.6	g	Flujo genérico definido dentro de openLCA
Poliestireno de desecho	61.29	kg	Flujo genérico definido dentro de openLCA
Las entradas y salidas presentadas constituyen el balance de materia y energía del sistema, referidas a una producción total de 1,600 muestras, 1800 análisis, 21 publicaciones científicas			

indizadas, 2 publicaciones no indizadas, 32 conferencias, 25 proyectos de investigación, 1 egresados de doctorado, 2 egresados de maestría, 3 de licenciatura y 15 tesis.

Tabla 16. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de productos marinos, ciencias ambientales costeras, ecotoxicología y biorremediación

Entradas laboratorio de ingeniería y procesos costeros			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Agua, origen natural no especificado, MX	700	m ³	Flujo genérico definido dentro de openLCA
Salidas laboratorio de ingeniería y procesos costeros			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Agua, origen natural no especificado, MX	700	m ³	Flujo genérico definido dentro de openLCA

Tabla 17. Materiales e insumos de entrada y salida del laboratorio de ingeniería y procesos costeros

4.3 Actividades indirectas corriente arriba

Para estas actividades se tomó en cuenta la movilidad de la comunidad de la UAS, en diferentes tipos de transporte.

Entradas movilidad			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Transporte en avión, larga distancia	8960	p·km	market for transport, passenger, aircraft, long haul transport, passenger, aircraft, long haul APOS, U - GLO
Transporte en bicicleta	16560	p·km	market for transport, passenger, bicycle transport, passenger, bicycle APOS, U - GLO

Transporte en autobús	156600	p·km	market for transport, passenger, bus, diesel, regular transport, passenger, bus, diesel, regular APOS, U - GLO
Transporte en coche	1472130	km	market for transport, passenger, car, fleet average transport, passenger, car, fleet average APOS, U - RoW
Transporte en moto	144000	p·km	market for transport, passenger, motor scooter, fleet average transport, passenger, motor scooter, fleet average APOS, U - GLO

Tabla 18. Materiales e insumos de entrada de la Movilidad

Nota: p·km (pasajero-kilómetro) es una unidad de transporte que representa el traslado de un pasajero a lo largo de un kilómetro.

Entradas suministros oficina			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Diésel	4300	kg	market for diesel diesel APOS, U - RoW
Equipos de aire acondicionado	66	items	market for heat pump, 30kW heat pump, 30kW APOS, U - GLO
Papel	70.5	kg	market for paper, woodfree, coated paper, woodfree, coated APOS, U - RoW
Toner	37	items	market for toner module, laser printer, colour toner module, laser printer, colour APOS, U - GLO
Agua, pozo, enterrado, MX	15.8176	m ³	Flujo genérico definido dentro de openLCA

Tabla 19. Materiales e insumos de entrada y salida de los Servicios Generales

4.4 Actividades indirectas corriente abajo

Para las actividades indirectas corriente abajo, se considera el tratamiento de las aguas residuales de la UAS y la energía eléctrica.

Salidas servicios generales			
Flujo	Cantidad	Unidad	Fuente de información
Aguas residuales, promedio	20706.4	kg	treatment of municipal solid waste, sanitary landfill municipal solid waste APOS, U - PT
Electricidad, alto voltaje	1,115,760	kWh	market for electricity, high voltage electricity, high voltage APOS, U (copy) - MX

Tabla 20. Materiales e insumos de salida de los Servicios Generales corriente abajo

CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA (EICV)

5.1 Huella ambiental, aplicando el método ReCiPe

La Figura 19 muestra los impactos ambientales normalizados y en términos porcentuales, que se generan en las actividades indirectas corriente arriba, actividades directas y actividades indirectas corriente abajo. Estas actividades incluyen todos los procesos, aunque estén fuera del control de la UAS. La mayor parte de las emisiones al medio ambiente se generan por actividades indirectas, mientras que las actividades controladas directamente por la UAS contribuyen con un menor porcentaje.

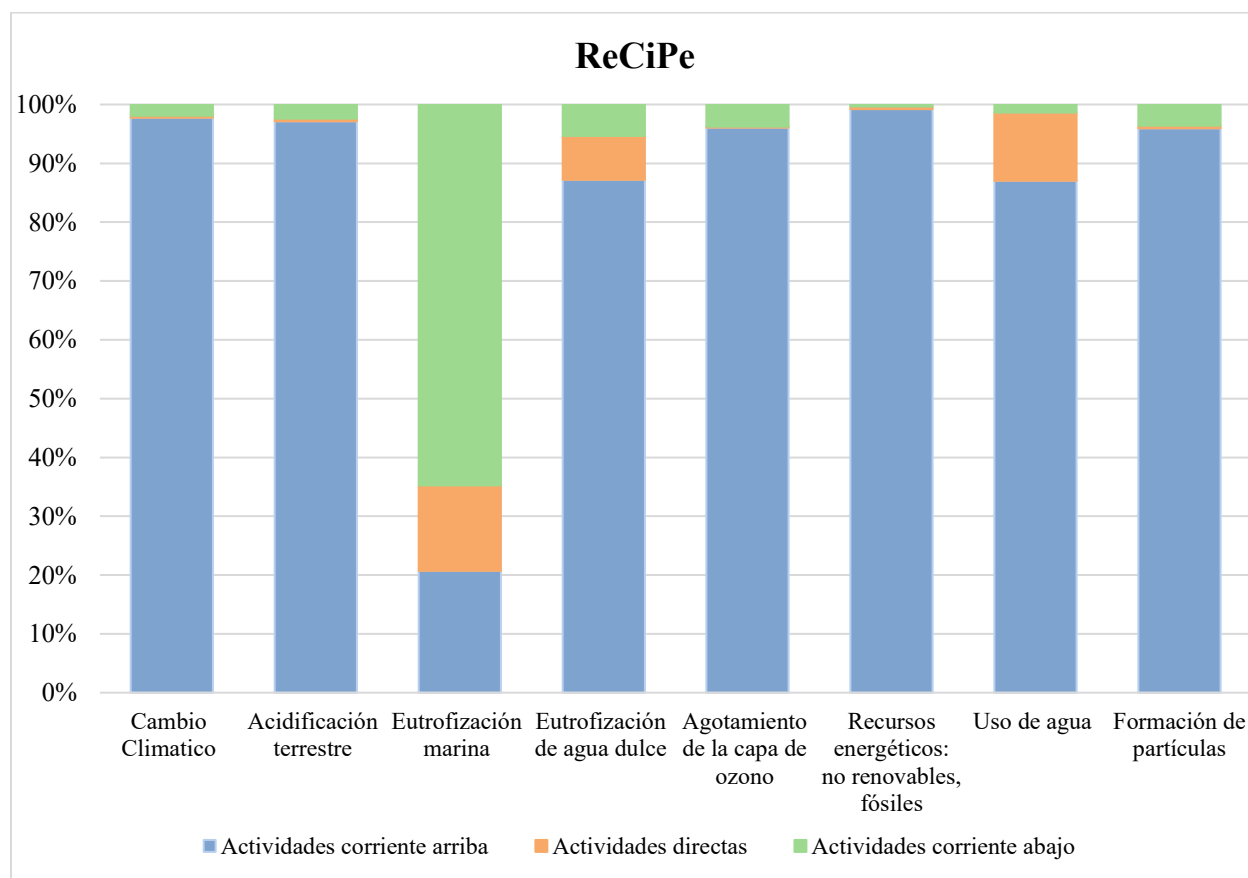


Figura 19. Contribuciones de impactos ambientales por toda la UAS con el método ReCiPe

Las actividades corriente arriba, fueron las que generan los mayores impactos en 7 de 8 categorías de impacto:

1. Recursos energéticos (99.21 %)
2. Cambio Climático (97.77 %)
3. Acidificación Terrestre (97.18 %)
4. Agotamiento de la capa de ozono (96.07 %)
5. Formación de partículas (95.94 %)
6. Uso de agua (87.01 %)
7. Eutrofización de agua dulce (86.38 %)

Para las actividades directas, las tres categorías de mayor impacto fueron:

1. Eutrofización marina (14.52 %)
2. Uso de agua (11.59 %)
3. Eutrofización de agua dulce (7.44 %)

Para las actividades indirectas corriente abajo, las dos categorías con mayor impacto fueron:

1. Eutrofización marina (64.79 %)
2. Eutrofización de agua dulce (5.36 %)

Del total de los impactos, el 87.15 % correspondió a las actividades corriente arriba, el 4.42 % a las actividades directas y el 10.45 % a las actividades corriente abajo.

ReCiPe					
Categoría de Impacto	Unidades	Actividades corriente arriba	Actividades directas	Actividades corriente abajo	TOTAL
Cambio Climático	ton CO ₂ eq	1,455.21	4.91	28.28	1,488.396
Acidificación terrestre	ton SO ₂ eq	4.39	0.02	0.11	4.514
Eutrofización	kg N eq	32.59	22.85	101.96	157.37

marina					
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	360.52	30.76	22.20	413.48
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC – 11 eq	1.39×10^{-3}	2.03×10^{-6}	5.45×10^{-5}	1.14×10^{-3}
Recursos energéticos: no renovables, fósiles	ton oil eq	373.24	1.69	1.24	376.21
Uso de agua	m ³ agua	3,867.49	515.16	60.45	4,444.87
Formación de partículas	kg PM _{2.5} eq	1,664.54	7.98	62.29	1,734.81

Tabla 21. Impactos ambientales de actividades directas e indirectas por categoría de impacto ambiental, aplicando el método ReCiPe

5.2 Huella ambiental, aplicando el método IMPACT World+

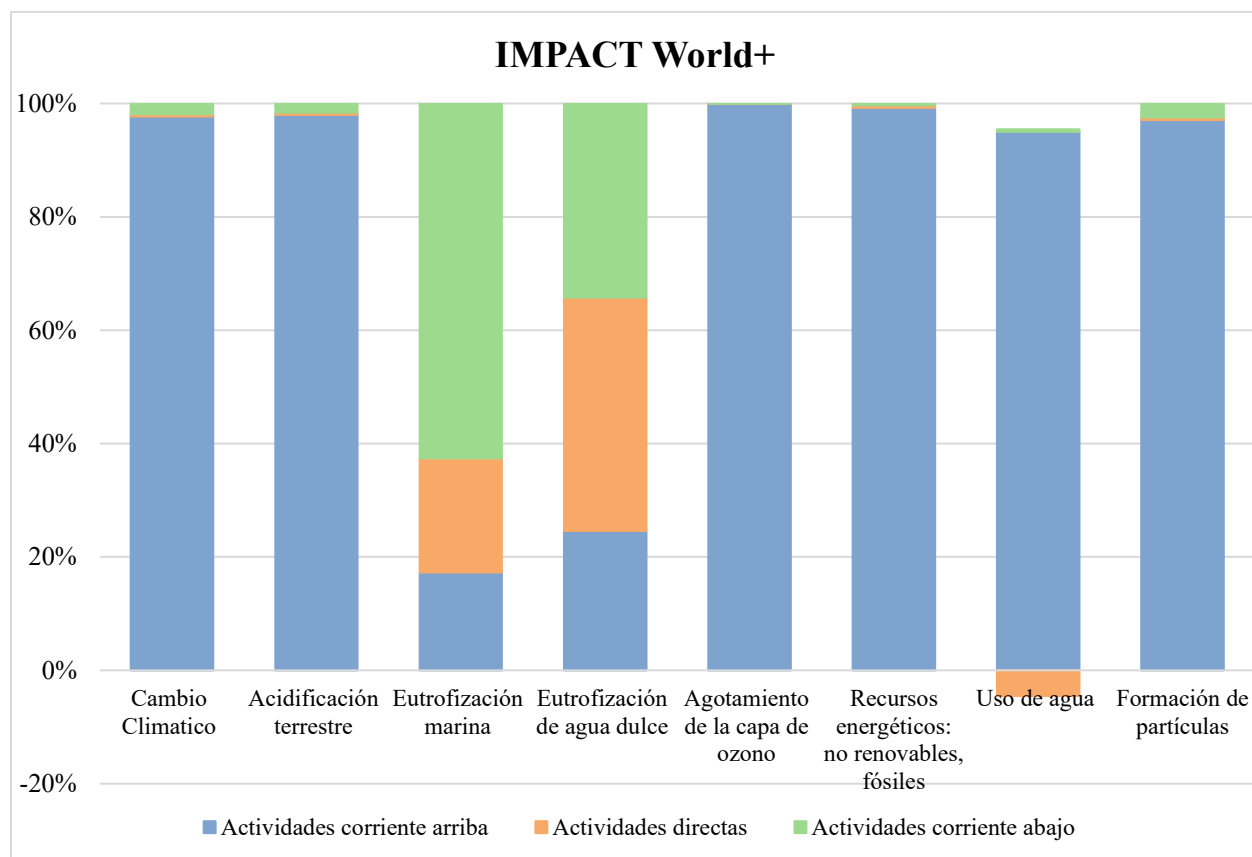


Figura 20. Contribuciones de impactos ambientales por toda la UAS con el método IMPACT World+

Las actividades corriente arriba, fueron las que generan los mayores impactos en 5 de 8 categorías de impacto:

1. Uso de agua (104.44 %)
2. Agotamiento de la capa de ozono (99.96 %)
3. Recursos energéticos (99.241 %)
4. Acidificación Terrestre (98 %)
5. Cambio Climático (97.77 %)

Para las actividades directas, la categoría de mayor impacto fue:

1. Eutrofización de agua dulce (41.14 %)

Para las actividades indirectas corriente abajo, las dos categorías con mayor impacto fueron:

1. Eutrofización marina (62.61 %)
2. Eutrofización de agua dulce (34.28 %)

Del total de los impactos, el 79.79 % correspondió a las actividades corriente arriba, el 7.24 % a las actividades directas y el 12.96 % a las actividades corriente abajo.

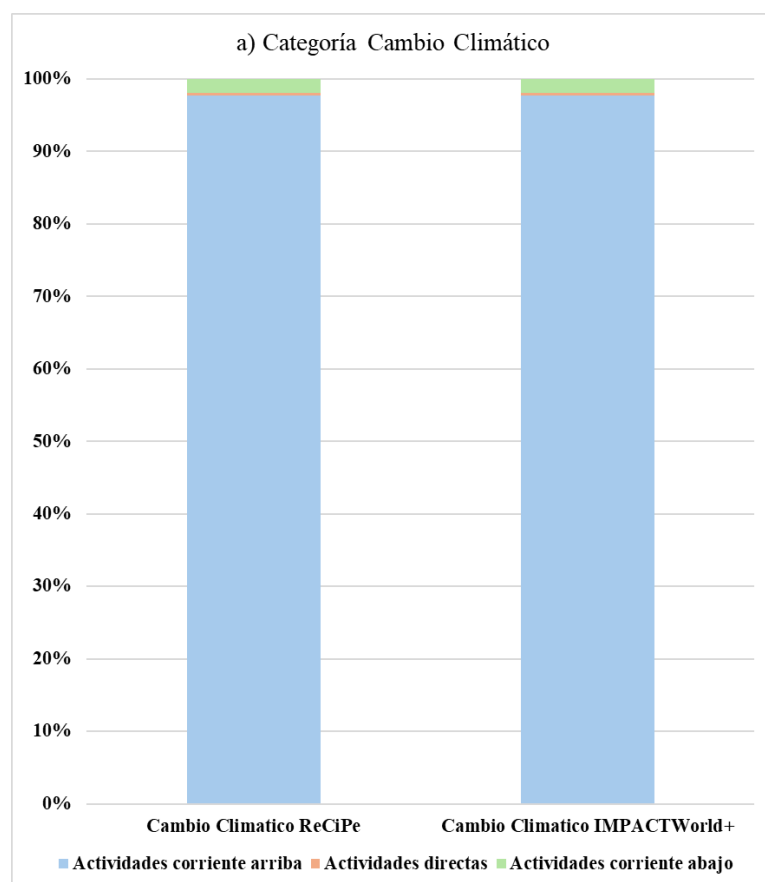
IMPACT World+					
Categoría de Impacto	Unidades	Actividades corriente arriba	Actividades directas	Actividades corriente abajo	TOTAL
Cambio Climático	ton CO ₂ eq	1,454.48	5.65	28.26	1,488.40
Acidificación terrestre	ton SO ₂ eq	2.44×10^{-5}	9.49×10^{-8}	4.09×10^{-7}	2.50×10^{-5}
Eutrofización marina	kg N _{lim} eq	37.54	43.69	136.03	217.27
Eutrofización de agua dulce	kg PO ₄ P _{lim} eq	1.93	3.23	2.69	7.87
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC – 11 eq	0.52	1.06×10^{-4}	5.3×10^{-5}	0.53
Recursos energéticos: no renovables	MJ eq	18,657,105.6	80,839.93	63,919.95	18,799,985.45
Uso de agua	m ³ agua	30,258,259.4	-1,442,800.95	147,756.724	28,963,215.13
Formación de partículas	kg PM _{2.5} eq	0.47724697	0.00231077	0.01209465	0.49165239

Tabla 22. Impactos ambientales de actividades directas e indirectas por categoría de impacto ambiental, aplicando el método IMPACT World+

5.3 Huella ambiental por categorías de impacto

5.3.1 Cambio Climático

En la categoría de Cambio Climático, al comparar los métodos ReCiPe e IMPACT World+, se observaron variaciones mínimas en los porcentajes de contribución de las distintas actividades y procesos. Estas variaciones se dieron únicamente en las actividades directas que corresponden a los laboratorios, representando variaciones de ± 0.01 entre ambos métodos. Asimismo, el total de emisiones para ReCiPe corresponde a 1,488.396 ton CO₂ eq y para IMPACT World+ corresponde a 1,488.395 ton CO₂ eq, teniendo una variación real de 0.00066 entre métodos. Ambos métodos utilizan el factor GWP100, que mide el impacto de un GEI en relación con el dióxido de carbono durante un horizonte temporal de 100 años. Con esta información se puede asumir que, en la categoría Cambio Climático, los resultados son comparables, a pesar de las diferencias metodológicas entre ellos.



En la Figura 21a, se observa la similitud de las graficas de ambos métodos, donde el mayor contribuyente son las actividades corriente arriba con un porcentaje del 97.77%, seguidas por las actividades corriente abajo con 1.9%, por ultimo las actividades participan con un 0.33%. Estos resultados evidencian que las emisiones de GEI se concentran principalmente en las etapas previas del ciclo de vida, por lo que las estrategias de mitigación deben enfocarse en la reducción de emisiones corriente arriba.

Figura 21a. Impactos generales en Cambio Climático

Actividades corriente arriba

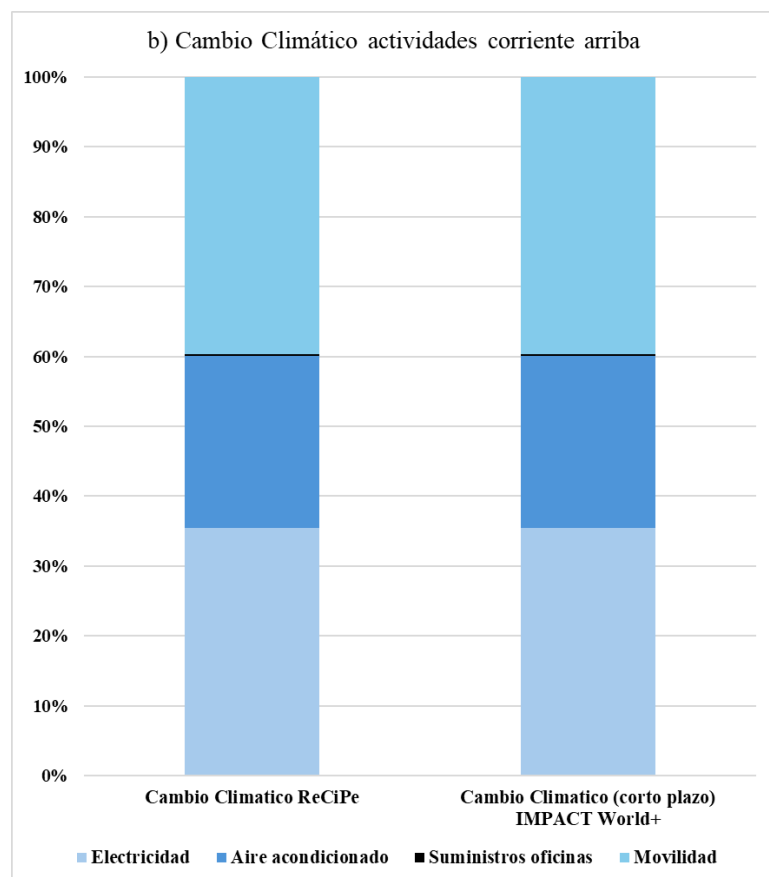


Figura 21b. Impactos en Cambio Climático actividades corriente arriba

Se detallan las actividades corriente arriba en la Figura 21b, donde el principal contribuyente para ambos métodos es la movilidad con una participación del 38.75 % (576.75 ton CO₂ eq), donde la mayor contribución le corresponde al uso de automóvil particular representando un 36.01 % (535.97 ton CO₂ eq). Se estima que la comunidad universitaria (alumnos, investigadores, académicos y personal administrativo) recorrió aproximadamente 17,982.50 km en el año 2024; esta elevada distancia recorrida se asocia al alto porcentaje de los integrantes de la comunidad que no viven a menos de 30 km de

distancia de la UAS.

La segunda actividad corriente arriba con mayor participación en la categoría es el consumo de electricidad con una contribución del 34.66 % (515.87 ton CO₂ eq). Este impacto considera la generación, transformación y transmisión de la electricidad a la UAS. La generación de electricidad se da principalmente a partir de combustibles fósiles, los cuales emiten CO₂ y otros gases. La UAS tiene un consumo eléctrico de 1,115,760 kWh, lo que representa el consumo promedio de más de 366 hogares en Mérida (Ayuntamiento de Mérida,2021).

Actividades directas

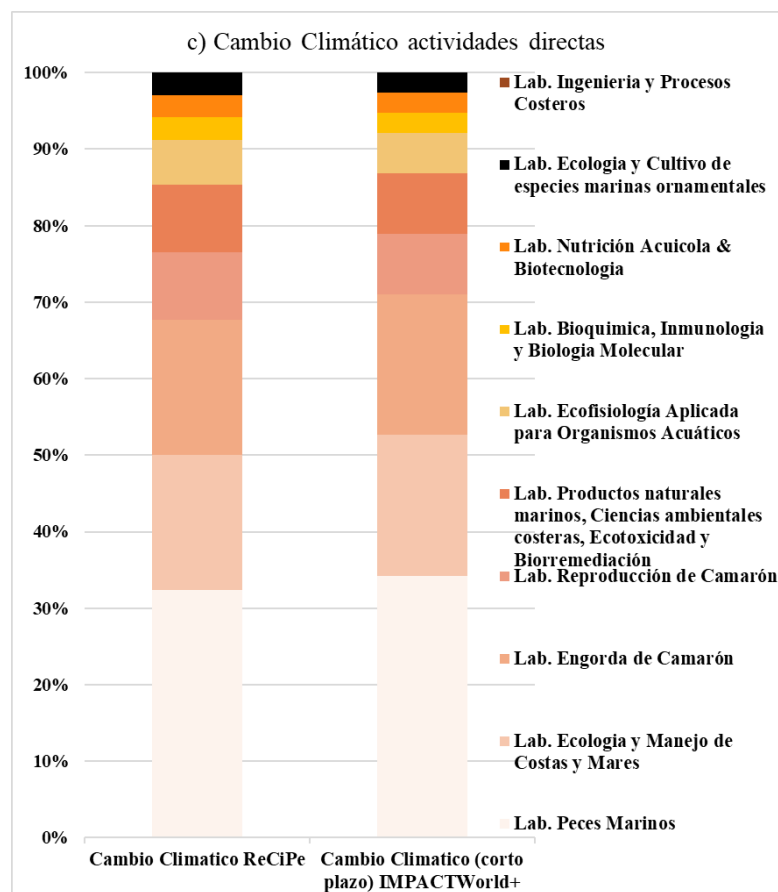


Figura 21c. Impactos en Cambio Climático actividades directas

En la Figura 21c, se observa que las actividades directas son las que menos contribuyen en esta categoría, a diferencia de las actividades corriente arriba, ReCiPe e IMPACT World+ tienen una variación mínima en los porcentajes de contribución, donde el laboratorio de peces marinos participa con un 0.11 % (1.63 ton CO₂ eq) para ReCiPe y con un 0.13% (1.93 ton CO₂ eq) para IMPACT World+. Este impacto se debe principalmente al uso de NaClO (hipoclorito de sodio), compuesto químico conocido como cloro comercial, utilizado como

desinfectante. Se consideraron los impactos de su producción y transporte.

El segundo contribuyente para son: el laboratorio de ecología, manejo de costas y mares y el laboratorio de engorda de camarón con una participación del 0.06 % (0.89 ton CO₂ eq), para ReCiPe, para IMPACT World+ cada laboratorio representa un 0.07 % (1.04 ton CO₂ eq). Esta contribución se debe a la producción y transporte del alcohol que se utiliza para preservar las especies estudiadas y a la producción y transporte del alimento de los camarones.

Actividades corriente abajo

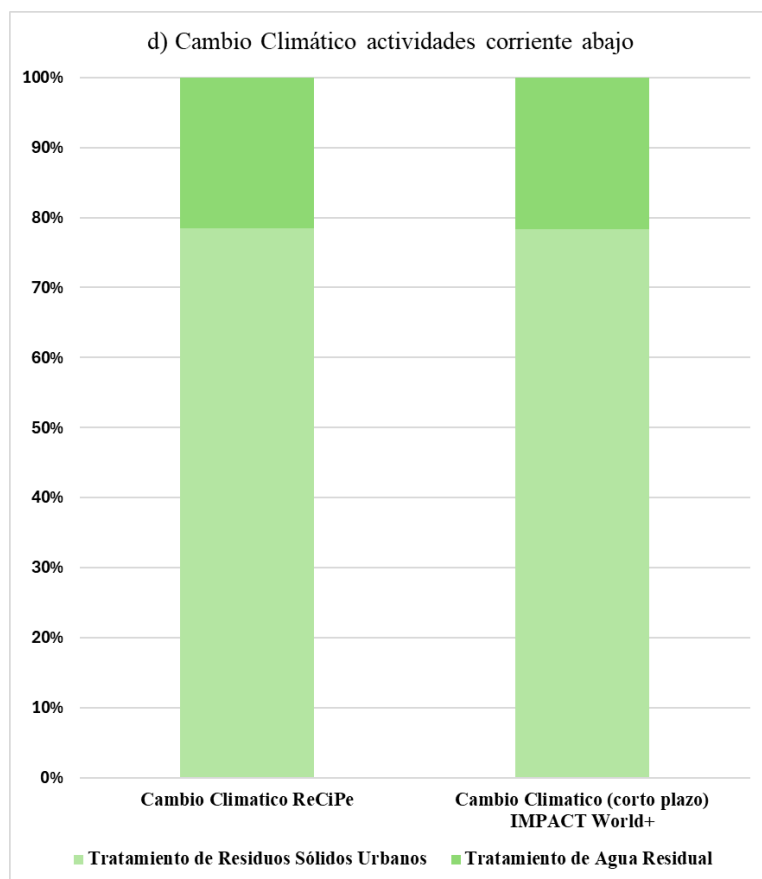


Figura 21d. Impactos en Cambio Climático actividades corriente abajo

Las actividades corriente abajo contribuyen con una participación de 1.9 % (28.27 ton CO₂ eq) para ambos métodos. En la Figura 21d, se observa con mayor detalle la participación del tratamiento de residuos sólidos y aguas residuales en la categoría de impacto, donde el tratamiento de residuos sólidos contribuye con 1.49 % (22.16 ton CO₂ eq). Esta actividad considera el transporte de 20,726.40 kilos de residuos sólidos urbanos hacia un vertedero municipal. El tratamiento de agua residual tiene una participación de 0.41 % (6.10 ton CO₂ eq).

	ReCiPe	IMPACT World+
ACTIVIDAD CORRIENTE ARRIBA		
Equipos de Aire Acondicionado	24.03 %	24.03 %
Movilidad	38.75 %	38.75 %
Electricidad	34.66 %	34.66 %
Suministros de oficina	0.33 %	0.33 %
TOTAL	97.77 %	97.77 %
ACTIVIDADES DIRECTAS		
Lab. Engorda de Camarón	0.06 %	0.07 %
Lab. Peces Marinos	0.11 %	0.13 %
Lab. Ecología y Manejo de Costas y Mares	0.06 %	0.07 %
Lab. Reproducción de Camarón	0.03 %	0.03 %
Lab. Productos naturales marinos, Ciencias ambientales costeras, Ecotoxicidad y Biorremediación	0.03 %	0.03 %
Lab. Ecofisiología Aplicada para Organismos Acuáticos	0.02 %	0.02 %
Lab. Nutrición Acuícola & Biotecnología	0.01 %	0.01 %
Lab. Bioquímica, Inmunología y Biología Molecular	0.01 %	0.01 %
Lab. Ecología y Cultivo de especies marinas ornamentales	0.01 %	0.01 %
Lab. Ingeniería y Procesos Costeros	0.0 %	0.0 %
TOTAL	0.34 %	0.38 %
ACTIVIDADES CORRIENTE ABAJO		
Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos	1.49 %	1.48 %
Tratamiento de Agua Residual	0.41 %	0.41 %
TOTAL	1.9 %	1.89 %

Tabla 23. Contribución porcentual a la categoría de Cambio Climático por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+

5.3.2 Acidificación Terrestre

Para ReCiPe e IMPACT World+ la categoría de Acidificación Terrestre muestra una variación mínima en la distribución porcentual de las actividades y procesos entre métodos, en la Figura 22a se observa la similitud en ambas graficas. Sin embargo, en la carga real de emisiones en ton SO₂ se observan diferencias significativas: para el método ReCiPe, la contribución es de 4.514 ton SO₂, mientras que para IMPACT World+ la contribución es de 2.5×10^{-5} ton SO₂, 180,000 veces menos que ReCiPe. Esta diferencia se debe principalmente al origen geográfico y al grado de regionalización de sus modelos de caracterización.

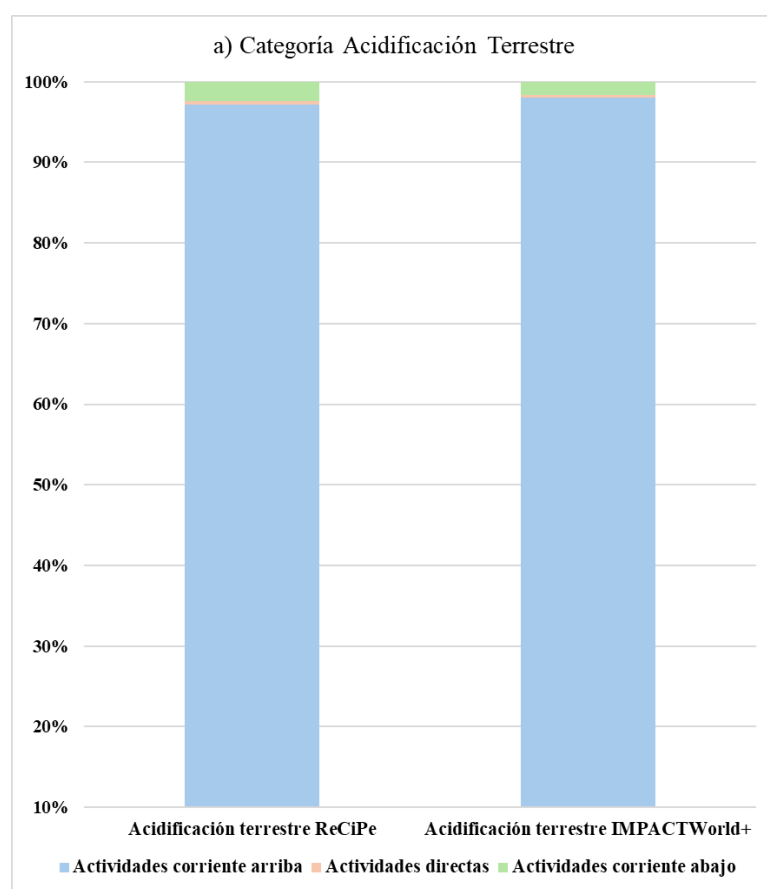


Figura 22a. Impactos generales en Acidificación Terrestre

El método ReCiPe fue modelado bajo condiciones ambientales de Europa Occidental, donde los suelos neutralizan menos y los ecosistemas son más sensibles a la deposición ácida (Rodríguez Lado et al., 2007). Por eso, este método suele asignar factores de caracterización más altos, lo que aumenta el impacto estimado. En cambio, IMPACT World+ usa como región a Latinoamérica considerando sus características climáticas y ecológicas. En esta región, los suelos tienen mayor capacidad tampón, mayor dispersión atmosférica y menor acumulación histórica de deposición ácida solo

una fracción reducida del potencial acidificante se traduce en impacto efectivo.

Actividades corriente arriba

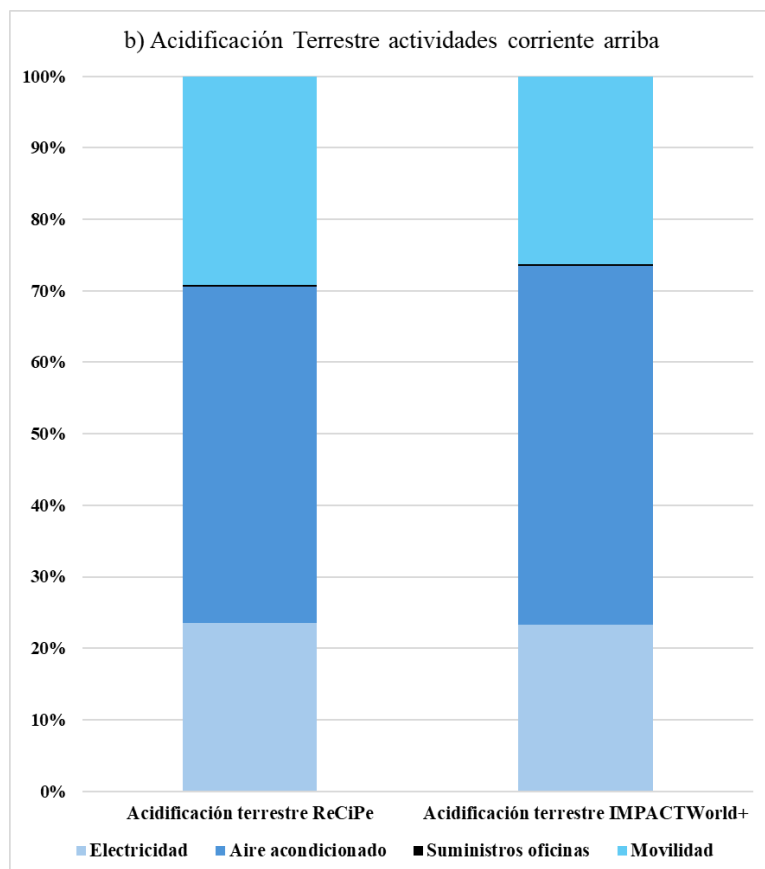


Figura 22b. Impactos en Acidificación Terrestre actividades corriente arriba

Las actividades corriente arriba contribuyen con un 97.18 % de los impactos totales, donde los equipos de aire acondicionado representan una mayor contribución con un porcentaje del 45.69 % (2.06 ton SO₂) para ReCiPe, y para IMPACT World+ representan una contribución del 49.15 % (1.22×10⁻⁵ ton SO₂). La movilidad se postula como la segunda actividad con mayor relevancia ambiental en la categoría de Acidificación Terrestre, contribuyendo con un 28.32 % (1.27 ton SO₂) para el método ReCiPe, y con un 25.7 % (6.42 × 10⁻⁶ ton SO₂) según IMPACT World+.

Aunque la categoría de Acidificación Terrestre está asociada con las emisiones de SO₂, el impacto asociado a la movilidad se debe principalmente a las emisiones de NO_x, que son convertidas a equivalentes de SO₂. La tercera actividad con mayor impacto es la generación de electricidad, con una participación de 22.88 % (1.03 ton SO₂) para ReCiPe y con un 22.85 % (5.71 × 10⁻⁶ ton SO₂) para IMPACT World+. Esto se debe a que la electricidad se genera mediante combustión de combustibles fósiles o centrales termoeléctricas, las cuales emiten SO₂ y NO_x. Aunque estas emisiones no actúan directamente en el suelo, ambas liberan H⁺ (protones) que después se depositarán en el suelo por acción de la lluvia ácida.

Actividades directas

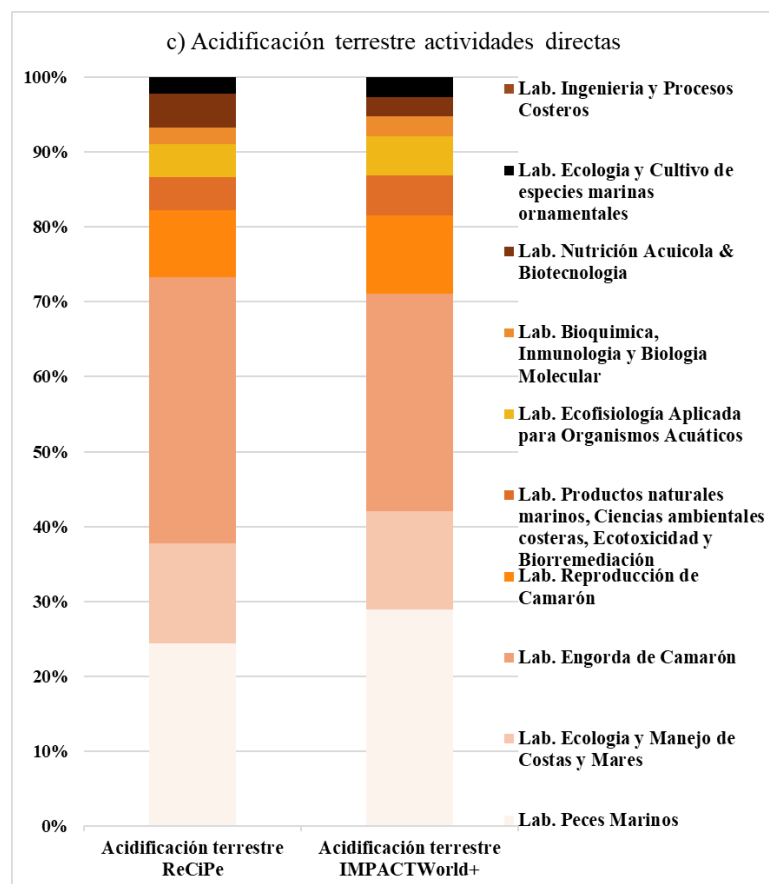


Figura 22c. Impactos en Acidificación Terrestre actividades directas

En la Figura 22c, normalizada, se representan los porcentajes de contribución únicamente de las actividades directas que contribuyen con un 0.45 % (0.020 ton SO₂) para ReCiPe y un 0.38 % (9.5×10⁻⁸ ton SO₂) para IMPACT World+. En esta categoría el mayor contribuyente para el método ReCiPe, es el laboratorio de engorda de camarón con un 0.16 % (0.0072 ton SO₂). Este impacto se le atribuye a la producción de harina de pescado, la cual implica un procesamiento industrial, transporte, energía y combustión de combustibles fósiles. Todos estos están asociados a emisiones de SO₂

y NO_x, que contribuyen a la acidificación terrestre. Y para el método IMPACT World+, los laboratorios con mayor contribución son el laboratorio de engorda de camarón y el laboratorio de peces marinos, que contribuyen con el mismo porcentaje de 0.11 % (2.75 × 10⁻⁸ ton SO₂). Los demás laboratorios tienen contribuciones menores al 0.06 %.

Actividades corriente abajo

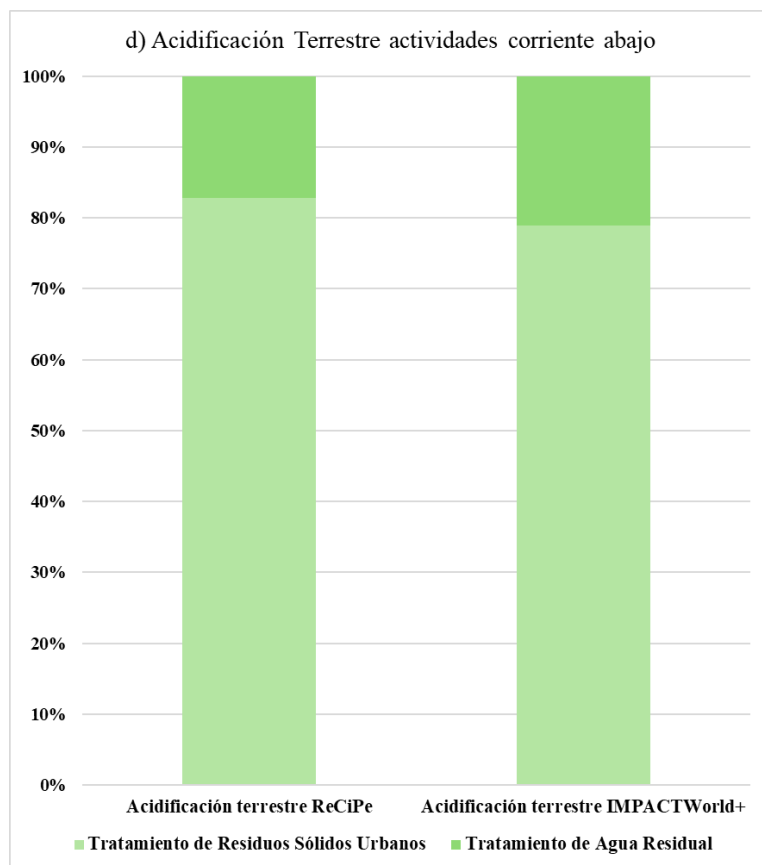


Figura 22d. Impactos en Acidificación Terrestre actividades corriente abajo

En la Figura 22d, se detallan las actividades corriente abajo. Ambos métodos tienen similitudes en la distribución porcentual del potencial de acidificación terrestre. ReCiPe reporta que el tratamiento de residuos sólidos urbanos contribuye con un 1.98 %, e IMPACT World+ contribuye con un 1.27 %. Este impacto se atribuye principalmente a las emisiones asociadas al transporte de los residuos hacia su disposición final en rellenos sanitarios, donde la combustión de combustibles fósiles en los vehículos genera contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2) y amoníaco (NH_3). Estos

compuestos, al ser liberados a la atmósfera, pueden transformarse y depositarse en los suelos, provocando procesos de acidificación que alteran sus propiedades químicas y afectan la disponibilidad de nutrientes. Por otro lado, el tratamiento de aguas residuales presenta una participación menor, con 0.41 % para ReCiPe y 0.34 % para IMPACT World+, este proceso puede generar emisiones de compuestos acidificantes, principalmente derivados del nitrógeno, durante las etapas de tratamiento biológico y manejo de lodos.

	ReCiPe	IMPACT World+
ACTIVIDAD CORRIENTE ARRIBA		
Equipos de Aire Acondicionado	45.69 %	49.15 %
Movilidad	28.32 %	25.7 %
Electricidad	22.88 %	22.85 %
Suministros de oficina	0.29 %	0.3 %
TOTAL	97.18 %	98 %
ACTIVIDADES DIRECTAS		
Lab. Engorda de Camarón	0.16 %	0.11 %
Lab. Peces Marinos	0.11 %	0.11 %
Lab. Ecología y Manejo de Costas y Mares	0.06 %	0.05 %
Lab. Reproducción de Camarón	0.04 %	0.04 %
Lab. Productos naturales marinos, Ciencias ambientales costeras, Ecotoxicidad y Biorremediación	0.02 %	0.02 %
Lab. Ecofisiología Aplicada para Organismos Acuáticos	0.02 %	0.02 %
Lab. Nutrición Acuícola & Biotecnología	0.02 %	0.01 %
Lab. Bioquímica, Inmunología y Biología Molecular	0.01 %	0.01 %
Lab. Ecología y Cultivo de especies marinas ornamentales	0.01 %	0.01 %
Lab. Ingeniería y Procesos Costeros	0.0 %	0.0 %
TOTAL	0.45 %	0.38 %
ACTIVIDADES CORRIENTE ABAJO		
Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos	1.98 %	1.27 %
Tratamiento de Agua Residual	0.41 %	0.34 %
TOTAL	2.39 %	1.61 %

Tabla 23. Contribución porcentual a la categoría de Acidificación Terrestre por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+

5.3.3 Eutrofización Marina

La categoría de Eutrofización Marina fue evaluada por dos métodos. Si bien ambos métodos analizan el mismo fenómeno ambiental, presentan diferencias conceptuales y metodológicas. Estas se reflejan en el uso de diferentes unidades de evaluación y en la magnitud de los resultados de las emisiones de nitrógeno. ReCiPe expresa la eutrofización en kg N eq; esto asume que el nitrógeno es el principal nutriente responsable del aumento de nutrientes en el medio marino. Por otro lado, IMPACT World+ utiliza la unidad kg N_{lim} eq. Esta unidad representa el potencial de eutrofización en función del nutriente limitante efectivo; esto no es nitrógeno emitido, sino, nitrógeno expresado según su capacidad real de provocar eutrofización. Estas diferencias hacen que no sean directamente comparables, no obstante, las gráficas presentan patrones similares en las contribuciones porcentuales para cada actividad.

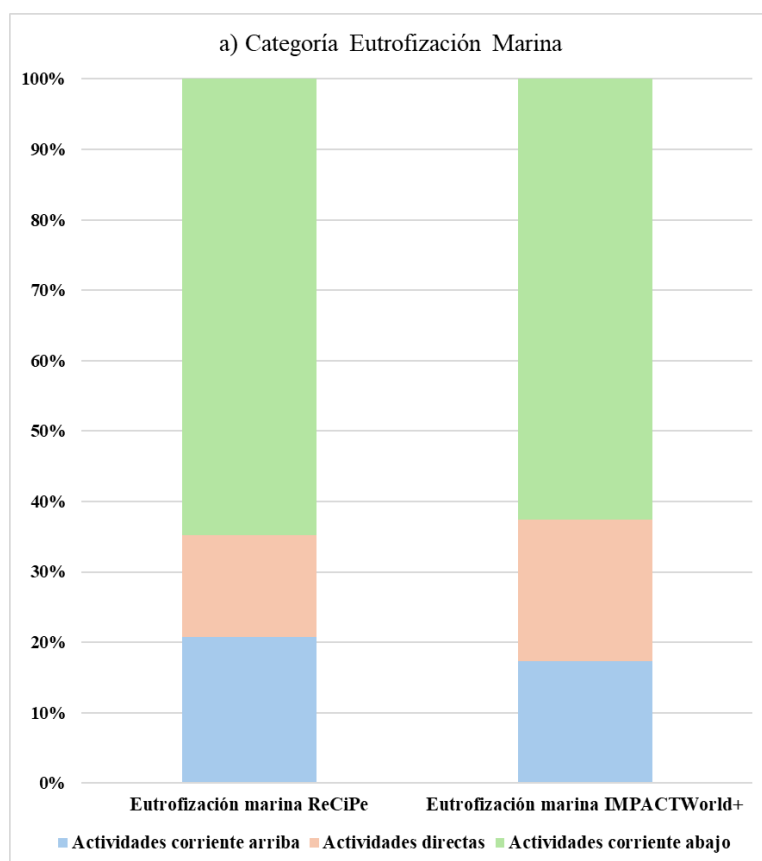


Figura 23a. Impactos generales en Eutrofización Marina

El valor numérico del potencial de eutrofización de ReCiPe es de 157.33 kg N eq, mientras que para IMPACT World+ representa un valor de 217.27 kg N_{lim} eq. Esta diferencia se debe a que ReCiPe cuantifica un potencial promedio de eutrofización basado en equivalentes de nitrógeno, sin considerar explícitamente la limitación por nutrientes ni la sensibilidad del ecosistema receptor. En contraste, IMPACT World+ evalúa la fracción de nitrógeno que actúa como nutriente limitante en ecosistemas marinos, incorporando condiciones regionales y la

respuesta ecológica efectiva. Dado que en los ecosistemas marinos costeros el nitrógeno constituye

el nutriente limitante, una mayor proporción de las emisiones contribuye directamente al proceso de eutrofización, lo que explica el mayor valor obtenido con este método.

Actividades corriente arriba

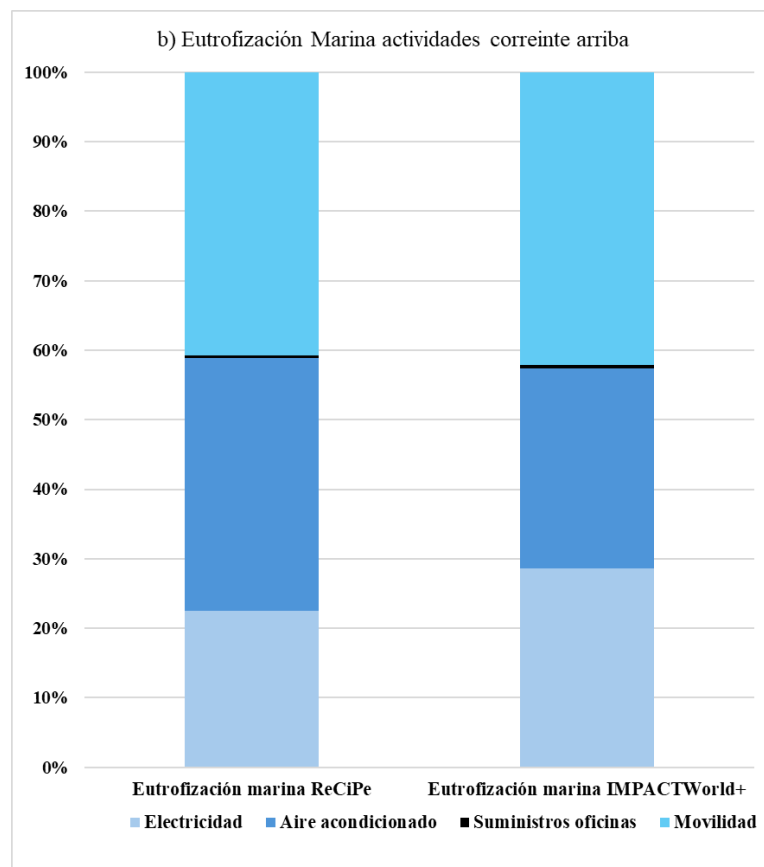


Figura 23b. Impactos en Eutrofización Marina actividades corriente arriba

Las actividades corriente arriba representan el segundo mayor contribuyentes con un 20.71 % (32.58 kg N eq) para ReCiPe y un 17.28 % (37.54 kg N_{lim} eq), la movilidad participa con una contribución del 8.43 % (13.26 kg N eq) para ReCiPe y un 7.29 % (15.83 kg N_{lim} eq) para IMPACT World+. Seguido por los equipos de aire acondicionado con un 7.53 % (11.84 kg N eq) para ReCiPe y un 4.98 % (10.82 kg N_{lim} eq) para IMPACT World+.

Las actividades corriente arriba contribuyen de manera indirecta a la eutrofización marina a través de emisiones atmosféricas de

nitrógeno reactivo, principalmente óxidos de nitrógeno (NO_x), generados por la movilidad y el uso de equipos de aire acondicionado. Estas emisiones se transforman en nitratos en la atmósfera y se depositan posteriormente mediante deposición húmeda o seca sobre cuerpos de agua y zonas costeras. Dado que en los ecosistemas marinos costeros el nitrógeno suele ser el nutriente limitante, estos aportes atmosféricos incrementan la disponibilidad de nutrientes y favorecen procesos de eutrofización. Las diferencias observadas entre los métodos ReCiPe e IMPACT World+ se explican por el enfoque promedio del primero y el carácter regionalizado del segundo, que considera únicamente la fracción del nitrógeno que actúa efectivamente como nutriente limitante.

Actividades directas

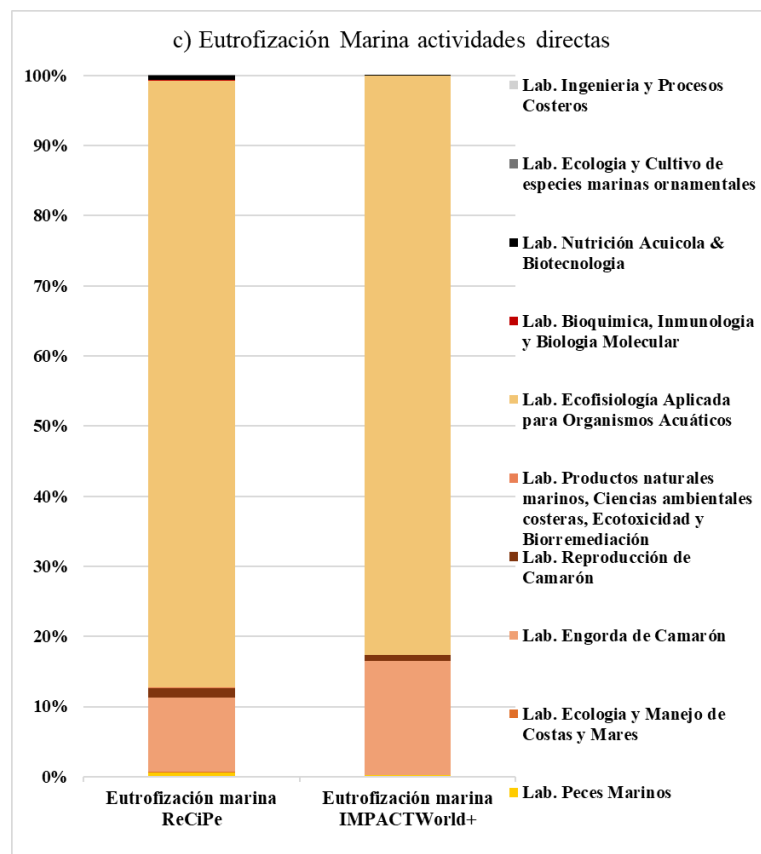


Figura 23c. Impactos en Eutrofización Marina actividades directas

En la Figura 23c, se observa que el principal contribuyente, es el laboratorio de ecofisiología para organismos acuáticos, el cual participa con un 12.57 % (19.77 kg N eq) para ReCiPe y con un porcentaje de 16.61 % (36.08 kg N_{lim} eq) para IMPACT World+. Este impacto se atribuye a la producción de pescado fresco.

Esta contribución no se debe como tal al funcionamiento del laboratorio, sino al insumo que se produce externamente, ya que la producción de pescado fresco genera nitrógeno en el agua, debido a lo que comen y sus desechos. Aunque el productor

trate el agua, no todos los nutrientes se eliminan. En segundo lugar, está el laboratorio de engorda de camarón con un porcentaje de contribución del 1.53 % (2.40 kg N eq) para ReCiPe, y una contribución de 3.28 % (7.12 kg N_{lim} eq) para IMPACT World+. Los demás laboratorios contribuyen en porcentajes menores al 0.21 %.

Actividades corriente abajo

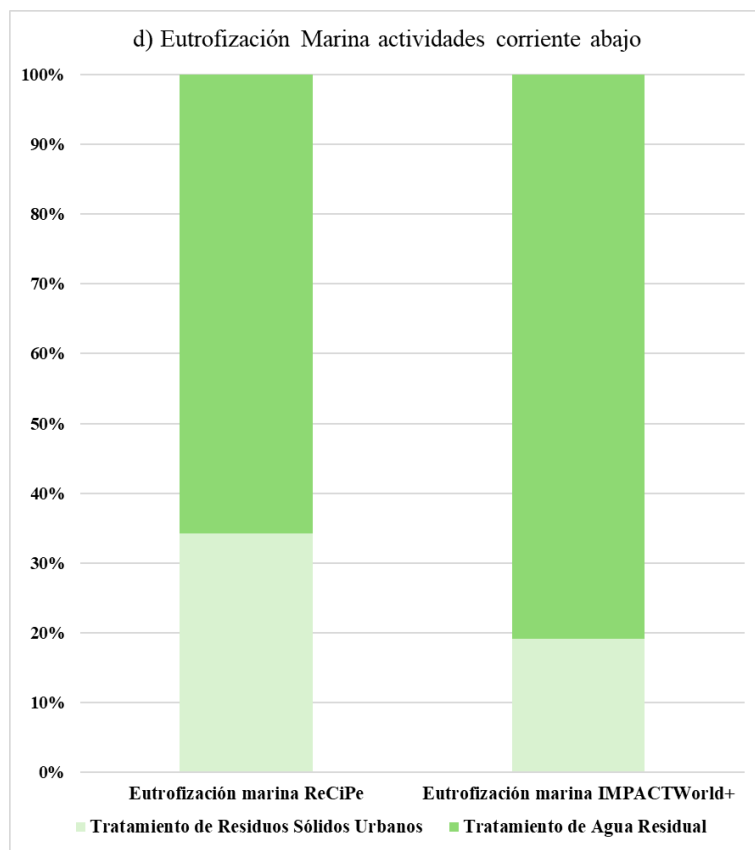


Figura 23d. Impactos en Eutrofización Marina actividades corriente abajo

Los resultados obtenidos en la Figura 23a, muestran que las actividades corriente abajo representan la mayor contribución para la categoría, y en la Figura 23d se detalla la distribución porcentual entre métodos y actividades corriente abajo, donde el tratamiento de los residuos sólidos urbanos y el tratamiento de las aguas residuales participan con el mayor porcentaje de impacto, con el 64.79 % (101.93 kg N eq) para el método ReCiPe, y un porcentaje de 62.61 % (136.03 kg N_{lim} eq) para IMPACT World+.

Esta alta contribución se explica por la elevada carga de compuestos nitrogenados presentes en los

residuos sólidos urbanos y en las aguas residuales, tales como nitrógeno orgánico, amonio (NH₄⁺) y nitratos (NO₃⁻). Durante los procesos de tratamiento, especialmente en sistemas convencionales, la remoción de nitrógeno no es completa, por lo que una fracción de estos compuestos permanece en los efluentes o lixiviados.

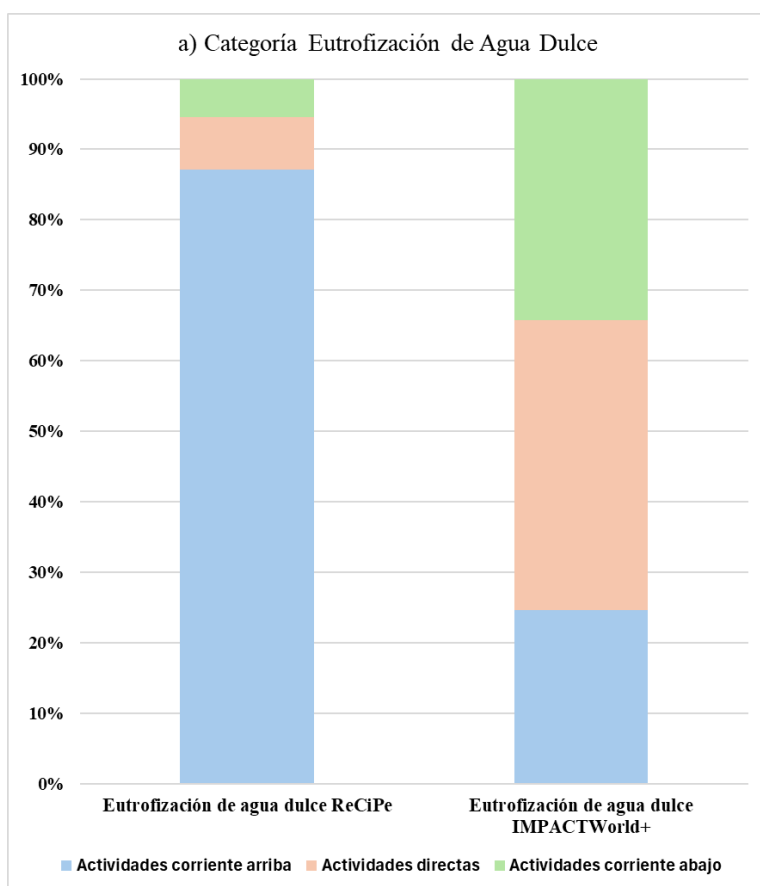
	ReCiPe	IMPACT World+
ACTIVIDAD CORRIENTE ARRIBA		
Equipos de Aire Acondicionado	7.53 %	4.98 %
Movilidad	8.43 %	7.29 %
Electricidad	4.66 %	4.94 %
Suministros de oficina	0.09 %	0.07 %
TOTAL	20.71 %	17.28 %
ACTIVIDADES DIRECTAS		
Lab. Engorda de Camarón	1.53 %	3.28 %
Lab. Peces Marinos	0.08 %	0.04 %
Lab. Ecología y Manejo de Costas y Mares	0.02 %	0.01 %
Lab. Reproducción de Camarón	0.21 %	0.16 %
Lab. Productos naturales marinos, Ciencias ambientales costeras, Ecotoxicidad y Biorremediación	0.01 %	0.0 %
Lab. Ecofisiología Aplicada para Organismos Acuáticos	12.57 %	16.61 %
Lab. Nutrición Acuícola & Biotecnología	0.08 %	0.01 %
Lab. Bioquímica, Inmunología y Biología Molecular	0.01 %	0.0 %
Lab. Ecología y Cultivo de especies marinas ornamentales	0.01 %	0.0 %
Lab. Ingeniería y Procesos Costeros	0.0 %	0.0 %
TOTAL	14.52 %	20.11 %
ACTIVIDADES CORRIENTE ABAJO		
Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos	22.17 %	11.95 %
Tratamiento de Agua Residual	42.62 %	50.66 %
TOTAL	64.79 %	62.61 %

Tabla 24. Contribución porcentual a la categoría de Eutrofización Marina por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+

5.3.4 Eutrofización de Agua Dulce

Para la categoría de Eutrofización de Agua Dulce, sucede algo similar que en la categoría anterior: ambos métodos buscan analizar el mismo efecto, pero tienen variaciones significativas entre ellos. Para ReCiPe la unidad de caracterización de los impactos ambientales es kg P eq, mientras que para IMPACT World+ los resultados se expresan en kg PO₄ P_{lim} eq, unidad que representa el potencial de impacto equivalente al efecto de una determinada cantidad de fosfato biodisponible. Considerando al fósforo como nutriente limitante del ecosistema de agua dulce, el fosfato biodisponible, se refiere a la fracción utilizada por los organismos acuáticos, como algas y plantas para crecer, en ambientes como cuerpos de agua. El fósforo suele ser el nutriente que restringe el crecimiento de organismos primarios; por lo tanto, un aumento de este puede provocar un crecimiento excesivo de algas. En consecuencia, como resultado de las diferencias entre métodos, se tiene una variación en los valores numéricos. La contribución a la eutrofización de agua dulce según ReCiPe es de 413.48 kg P eq, mientras que para IMPACT World+ se reportan 7.87 kg PO₄

P_{lim} eq.



En la Figura 24a, se muestran los porcentajes de contribuciones por tipo de actividad, entre los métodos ReCiPe e IMPACT World+ evidenciando diferencias en la asignación de los porcentajes de contribuciones por tipo de actividad. De acuerdo con ReCiPe, el 86.64 % del impacto se genera en las actividades corriente arriba, en contraste con el método IMPACT World+ que asigna únicamente el 24.6 %, las actividades directas contribuyen con el 41.14% para IMPACT World+ y 7.44% para

Figura 24a. Impactos generales en Eutrofización de Agua Dulce

ReCiPe, para las actividades corriente abajo el 34.28 % corresponde a IMPACT World+ y el 6.17 % para ReCiPe,

Actividades corriente arriba

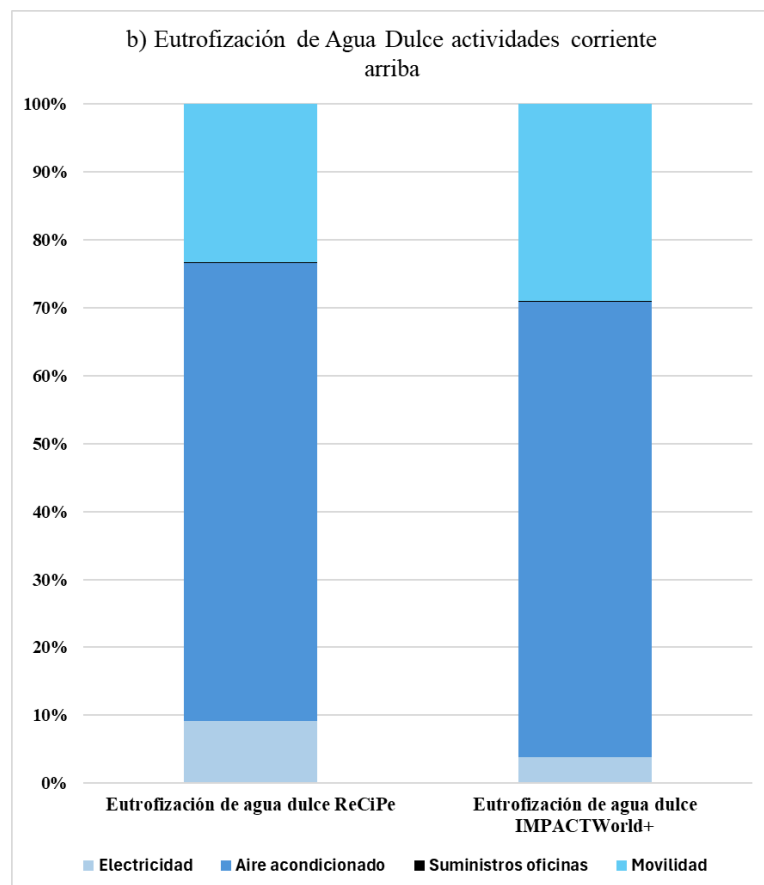


Figura 24b. Impactos en Eutrofización de Agua Dulce actividades corriente arriba

En el método ReCiPe, las actividades corriente arriba contribuyen a la mayor parte de los impactos por eutrofización, destacándose los equipos de aire acondicionado con un 58.4 % (241.47 kg P eq), la movilidad con un 20.12 % (83.19 kg P eq), y la electricidad con 7.99 % (33.03 kg P eq). Estas actividades representan más del 86 % del impacto total, lo que demuestra la alta sensibilidad del método a las emisiones indirectas generadas en la producción de energía, combustibles y materiales. A diferencia del método IMPACT World+ que participa únicamente con el 24.6 % en estas mismas

actividades, donde el mayor contribuyente son los equipos de aire acondicionado con una participación del 16.48 % (1.29 kg PO₄ P_{lim} eq), seguido por la movilidad con un 7.12 % (0.56 kg PO₄ P_{lim} eq).

Actividades directas

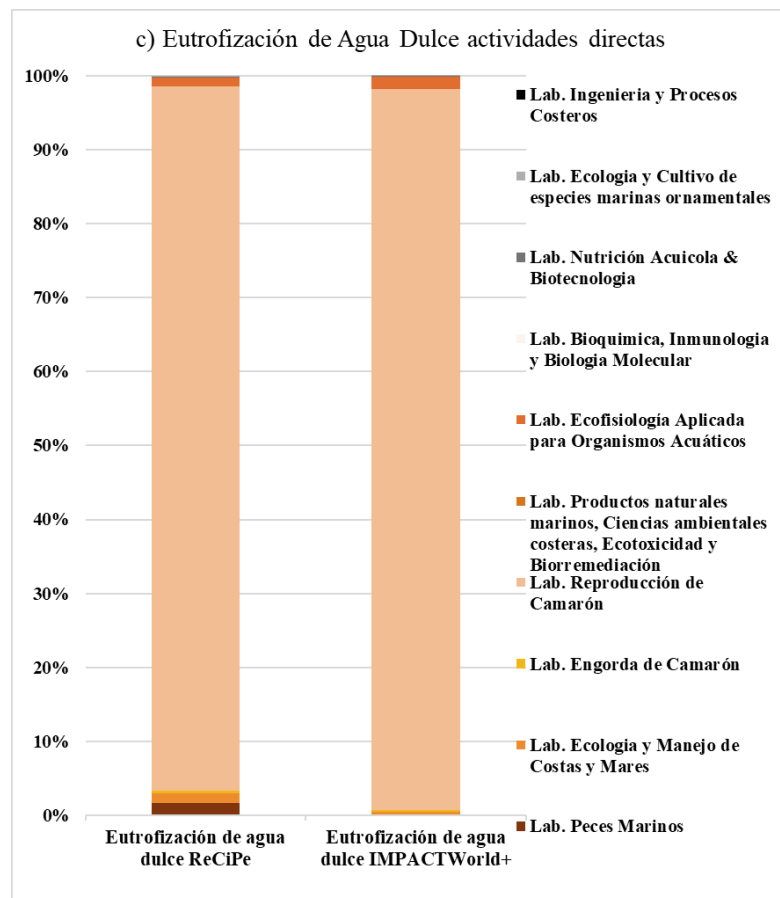


Figura 24c. Impactos en Eutrofización de Agua Dulce actividades directas

Para IMPACT World+, las actividades directas representan el 41.14 % del impacto total, donde el laboratorio de reproducción de camarón es el principal contribuyente con un 40.14 % (3.16 kg PO₄ P_{lim} eq). Este impacto se atribuye mayoritariamente al alimento húmedo, que considera la captura, transporte, procesamiento, enlatado y transporte: todos estos procesos generan emisiones de fósforo, que llegan a cuerpos de agua y pueden provocar eutrofización.

En ReCiPe, las actividades directas apenas alcanzan el 7.44 % lo que indica que el método no tiene la misma sensibilidad que IMPACT World+ para emisiones directas de nutrientes, donde el mayor contribuyente es el laboratorio de reproducción de camarón con un 7.08 % (29.27 kg P eq).

Actividades corriente abajo

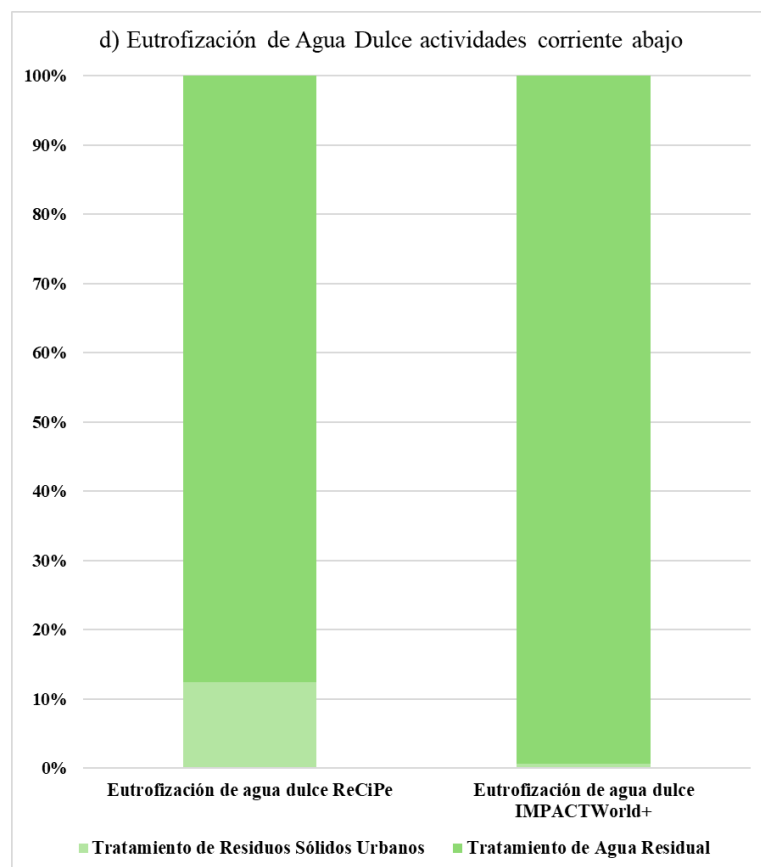


Figura 24d. Impactos en Eutrofización de Agua Dulce actividades corriente abajo

Con respecto a las actividades corriente abajo, el tratamiento de residuos sólidos y el agua residual muestra un comportamiento opuesto entre métodos. ReCiPe tiene una participación del 6.17 % (25.51 kg P eq), a diferencia de IMPACT World+ que tiene una contribución del 34.28 % (2.69 kg PO₄ P_{lim} eq), para IMPACT World+ esta actividad es la segunda de mayor aportación. Cabe recalcar que la contribución real no representa la cantidad exacta de fósforo emitido en un cuerpo de agua, sino una medida del potencial de este fósforo para afectar a los cuerpos de agua. Esto se debe al alcance del método que, al ser

midpoint evalúa los posibles efectos intermedios y no los efectos finales.

IMPACT World+ incorpora una mayor sensibilidad a condiciones específicas del entorno, lo que puede aumentar la contribución de actividades como el tratamiento de residuos y aguas residuales cuando existe un mayor riesgo de liberación de nutrientes hacia cuerpos de agua. Por el contrario, ReCiPe suele presentar una distribución más homogénea de los impactos, lo que explica su menor contribución en esta etapa.

	ReCiPe	IMPACT World+
ACTIVIDAD CORRIENTE ARRIBA		
Equipos de Aire Acondicionado	58.4 %	16.48 %
Movilidad	20.12 %	7.12 %
Electricidad	7.99 %	0.95 %
Suministros de oficina	0.13 %	0.05 %
TOTAL	86.64 %	24.6 %
ACTIVIDADES DIRECTAS		
Lab. Engorda de Camarón	0.03 %	0.09 %
Lab. Peces Marinos	0.12 %	0.04 %
Lab. Ecología y Manejo de Costas y Mares	0.1 %	0.14 %
Lab. Reproducción de Camarón	7.08 %	40.14 %
Lab. Productos naturales marinos, Ciencias ambientales costeras, Ecotoxicidad y Biorremediación	0 %	0 %
Lab. Ecofisiología Aplicada para Organismos Acuáticos	0.09 %	0.68 %
Lab. Nutrición Acuícola & Biotecnología	0.01 %	0.03 %
Lab. Bioquímica, Inmunología y Biología Molecular	0 %	0 %
Lab. Ecología y Cultivo de especies marinas ornamentales	0.01 %	0.01 %
Lab. Ingeniería y Procesos Costeros	0 %	0 %
TOTAL	7.44 %	41.14 %
ACTIVIDADES CORRIENTE ABAJO		
Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos	0.77 %	0.25 %
Tratamiento de Agua Residual	5.4 %	34.03 %
TOTAL	6.17 %	34.28 %

Tabla 25. Contribución porcentual a la categoría de Eutrofización de Agua Dulce por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+

5.3.5 Agotamiento de la Capa de Ozono

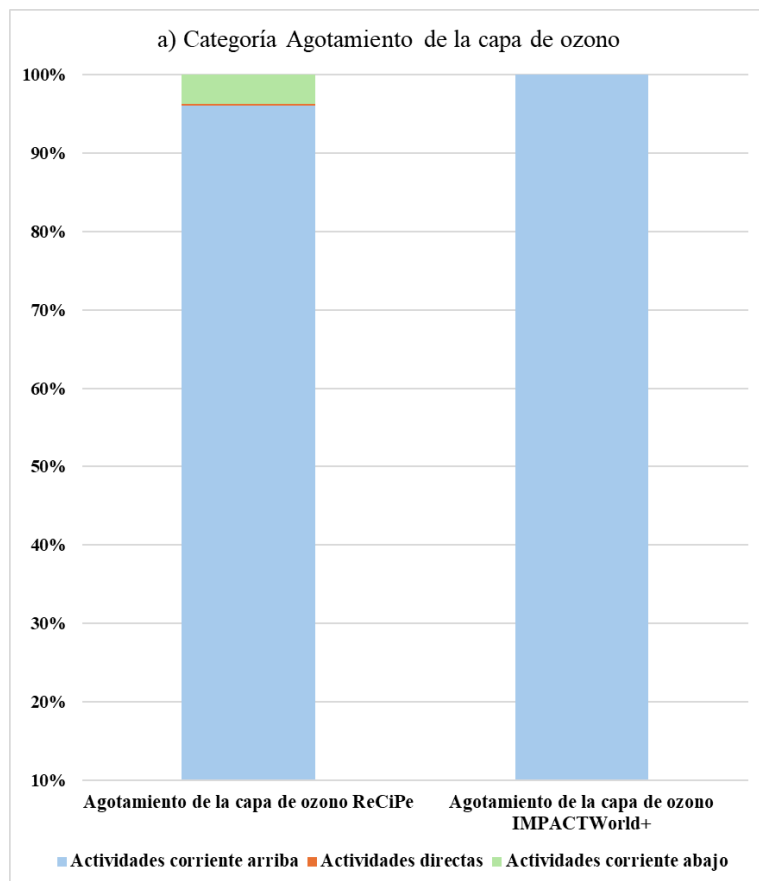


Figura 25a. Impactos generales en Agotamiento de la Capa de Ozono

Para la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono, ambos métodos se expresan con la misma unidad de impacto CFC -11 (Triclorofluorometano), un GEI con un alto potencial de calentamiento global que destruye la capa de ozono en la estratosfera.

El valor del potencial de agotamiento de la capa de ozono para ReCiPe es de 1.44 kg CFC - 11 eq, mientras que para IMPACT World+ es de 0.53 CFC - 11 eq. La diferencia observada entre los métodos ReCiPe e IMPACT World+ se debe principalmente a variaciones

en los factores de caracterización, el nivel de regionalización y el modelado atmosférico de las sustancias. Mientras ReCiPe utiliza un enfoque global con factores agregados, IMPACT World+ incorpora mayor diferenciación espacial y condiciones ambientales específicas, lo que puede reducir significativamente los valores caracterizados.

En la Figura 25a, se observa la distribución porcentual de los tipos de actividades por métodos, donde el mayor contribuyente se atribuye a las actividades corriente arriba, con una participación del 96.07 % para ReCiPe y con el 99.96% para IMPACT World+, para ReCiPe el segundo contribuyente son las actividades corriente abajo con un 3.77 % y para IMPACT World+ son las actividades directas con un 0.02%.

Actividades corriente arriba

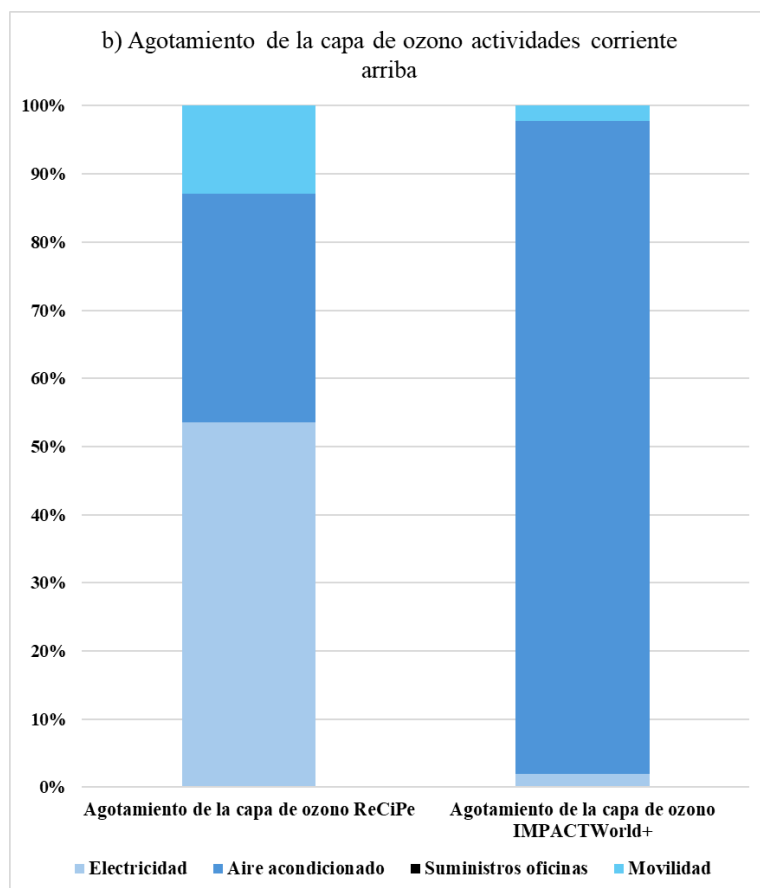


Figura 25b. Impactos en Agotamiento de la Capa de Ozono actividades corriente arriba

Las actividades corriente arriba para ReCiPe, representan casi la totalidad del impacto total, donde la electricidad participa con un 51.44 % (0.74 kg CFC – 11 eq), los equipos de aire acondicionado con un 32.2 % (0.46 kg CFC – 11 eq), y la movilidad con un 12.35 % (0.17 kg CFC – 11 eq).

Esto indica que los impactos provienen de la generación de electricidad, la producción de refrigerantes y equipos, y la combustión de los combustibles fósiles en el transporte. En IMPACT World+ el 95.75 % (0.50 kg CFC - 11 eq), se atribuye exclusivamente a los equipos de aire acondicionado,

mientras que la electricidad participa con un 1.95 % (1.03×10^{-2} kg CFC -11 eq) y la movilidad con un 2.22 % (1.17×10^{-2} kg CFC -11 eq), los cuales representan porcentajes pequeños.

Esta diferencia entre métodos puede explicarse por la forma en que cada uno modela las emisiones asociadas a sustancias agotadoras de ozono, IMPACT World+ asigna un mayor peso a las emisiones vinculadas al ciclo de vida de equipos de aire acondicionado, mientras que ReCiPe distribuye el impacto de manera más amplia entre distintas fuentes energéticas y de transporte.

Actividades directas

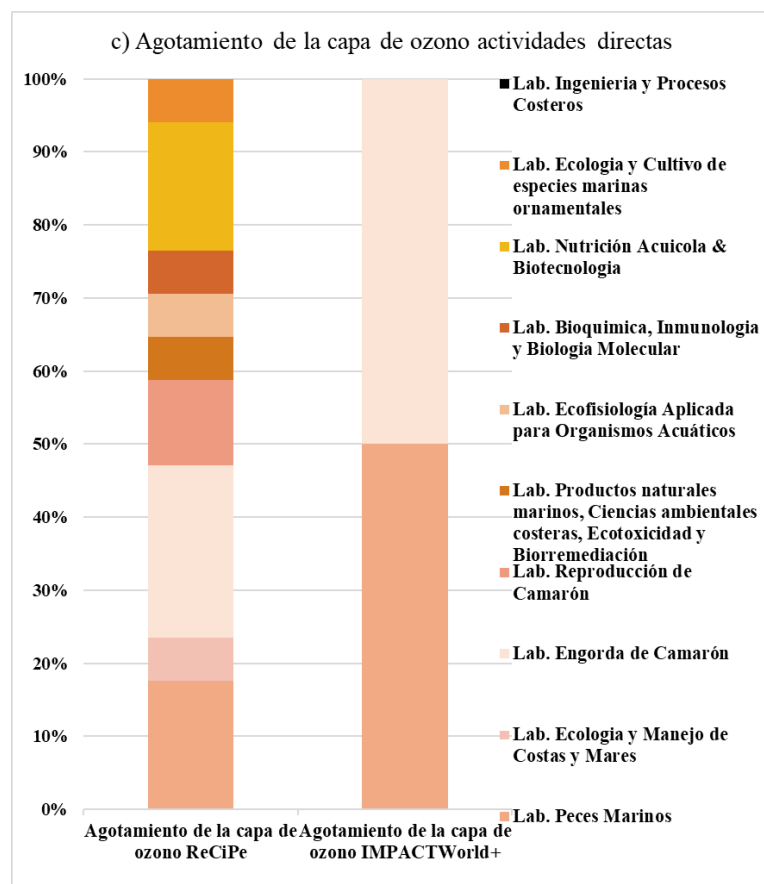


Figura 25c. Impactos en Agotamiento de la Capa de Ozono actividades directas

Las actividades directas tienen contribuciones casi nulas en ambos métodos. En ReCiPe todos los laboratorios se encuentran entre el 0.01 % y el 0.04 %, y en IMPACT World+ la mayoría participa con porcentajes de 0 % o valores de 0.01 %, estos valores pueden deberse a que las actividades no involucran el uso directo ni indirecto de sustancias que promuevan el agotamiento de la capa de ozono. Ni los insumos (como alimentos, agua o insumos), ni los procesos operativos (cultivo, recambio de agua, mantenimiento) están asociados a emisiones relevantes de compuestos con potencial de agotamiento de ozono.

Actividades corriente abajo

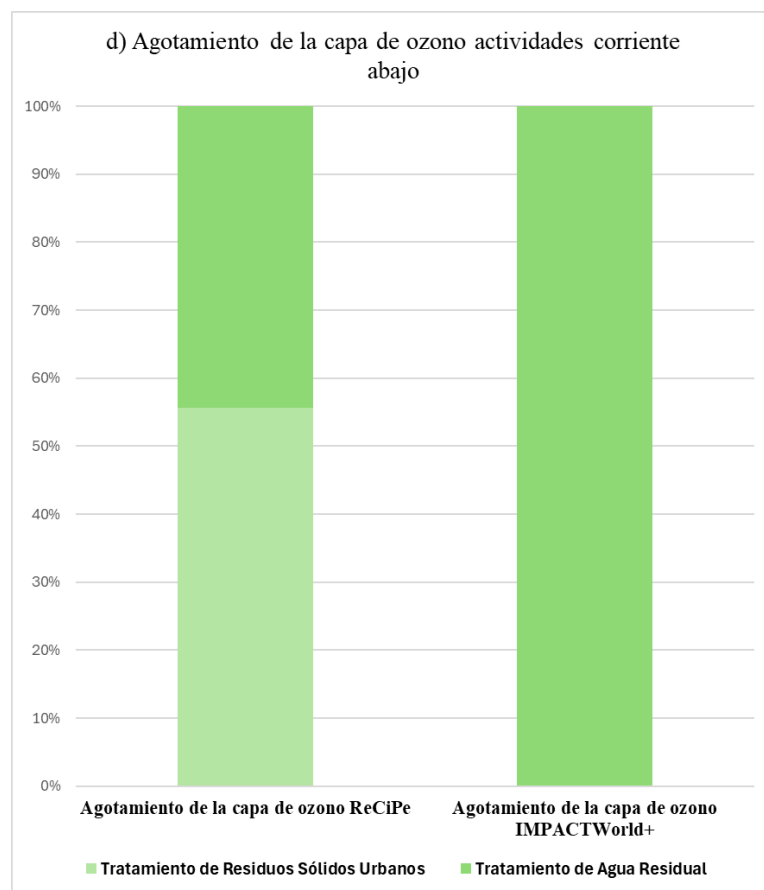


Figura 25d. Impactos en Agotamiento de la Capa de Ozono actividades corriente abajo

El tratamiento de residuos sólidos urbanos y agua residual presenta el 3.77 % (0.05 kg CFC – 11 eq) para ReCiPe y el 0.01 % (5.3×10^{-5} kg CFC -11 eq) para IMPACT World+. Estas cifras indican que el manejo de residuos no es relevante en la contribución al agotamiento de la capa de ozono. Esta baja contribución se debe a que los procesos de tratamiento de residuos no están asociados a la emisión de sustancias agotadoras del ozono, como los CFC y otros compuestos halogenados regulados por el Protocolo de Montreal. En general, estas emisiones están más relacionadas con procesos

industriales específicos, sistemas de refrigeración antiguos o la producción de ciertos químicos. La diferencia observada entre ReCiPe e IMPACT World+ puede atribuirse a que ReCiPe asigna contribuciones pequeñas como resultado de procesos indirectos dentro de la cadena de tratamiento, mientras que IMPACT World+ tiende a ser más restrictivo y solo considera emisiones explícitas de sustancias con potencial de agotamiento de ozono.

	ReCiPe	IMPACT World+
ACTIVIDAD CORRIENTE ARRIBA		
Equipos de Aire Acondicionado	32.2 %	95.75 %
Movilidad	12.35 %	2.22 %
Electricidad	51.44 %	1.95 %
Suministros de oficina	0.08 %	0.04 %
TOTAL	96.07 %	99.96 %
ACTIVIDADES DIRECTAS		
Lab. Engorda de Camarón	0.04 %	0.01 %
Lab. Peces Marinos	0.03 %	0.01 %
Lab. Ecología y Manejo de Costas y Mares	0.01 %	0 %
Lab. Reproducción de Camarón	0.02 %	0 %
Lab. Productos naturales marinos, Ciencias ambientales costeras, Ecotoxicidad y Biorremediación	0.01 %	0 %
Lab. Ecofisiología Aplicada para Organismos Acuáticos	0.01 %	0 %
Lab. Nutrición Acuícola & Biotecnología	0.03 %	0 %
Lab. Bioquímica, Inmunología y Biología Molecular	0.01 %	0 %
Lab. Ecología y Cultivo de especies marinas ornamentales	0.01 %	0 %
Lab. Ingeniería y Procesos Costeros	0 %	0 %
TOTAL	0.17 %	0.02 %
ACTIVIDADES CORRIENTE ABAJO		
Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos	2.08 %	0 %
Tratamiento de Agua Residual	1.66 %	0.01 %
TOTAL	3.77 %	0.01 %

Tabla 26. Contribución porcentual a la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+

5.3.6 Recursos energéticos: no renovables, fósiles

En la categoría de Recursos Energéticos, encontramos en las dos gráficas similitudes en los porcentajes de cargas ambientales para ambos métodos; sin embargo, en los valores numéricos existe una gran discrepancia entre ellos. Para ReCiPe se reporta una contribución de 414.69 ton oil eq, mientras que para IMPACT World+ se reportan 18,799,985.45 MJ eq de recurso extraído o consumido. Para establecer una comparación coherente entre ambos resultados, es necesario homologar las unidades. Convirtiendo MJ a ton oil eq, esta conversión de energía a masa/energía equivalente da como resultados 448.94 ton oil eq, esto al saber que 1MJ es igual a aproximadamente 0.00002388 ton oil eq. Esta conversión muestra que los resultados de ambos métodos son similares con una diferencia del 8%.

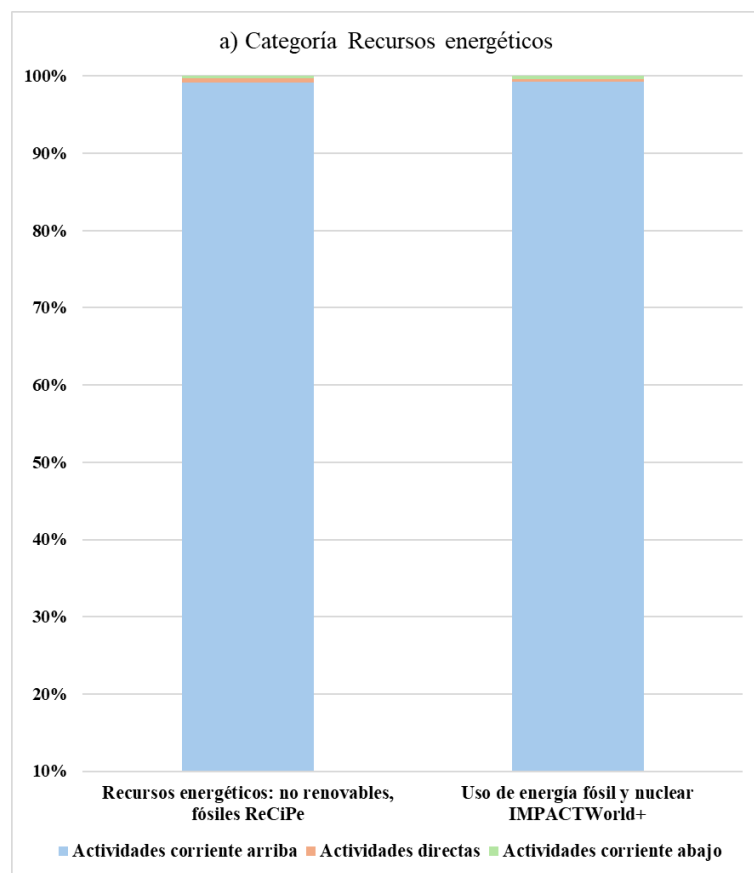


Figura 26a. Impactos generales en Recursos energéticos

En la Figura 26a, se detalla la distribución porcentual por tipo de actividad. En ambos métodos se pueden observar similitudes: en ReCiPe las actividades corriente arriba contribuyen con un 99.21 %, mientras que en IMPACT World+ la contribución es de 99.24 %. Las actividades directas participan con un 0.45 % en ReCiPe y con un 0.43 % en IMPACT World+. Finalmente, en las actividades corriente abajo contribuyen con un 0.33 % en ReCiPe y con un 34% en IMPACT World+. La variación entre los porcentajes de ambos métodos es del 0.01 % al 0.03 %.

Actividades corriente arriba

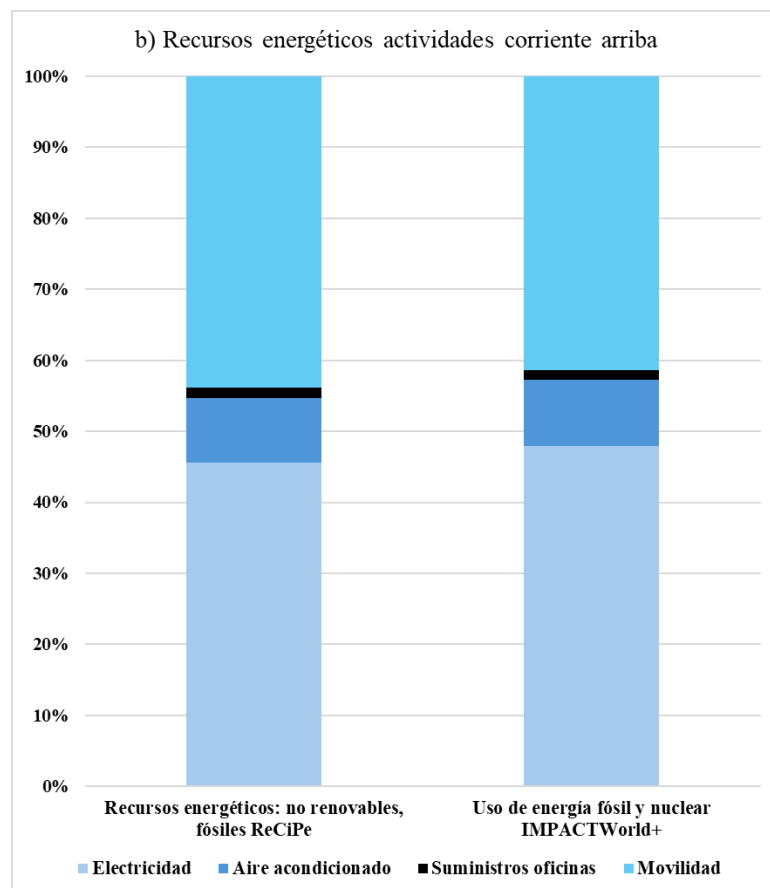


Figura 26b. Impactos en Recursos Energéticos actividades corriente arriba

En la categoría de Recursos Energéticos no Renovables, las actividades corriente arriba concentran prácticamente en la totalidad del impacto, con una contribución del 99.21 % para ReCiPe y del 99.24 % para IMPACT World+, lo que demuestra que la demanda de energía fósil se genera principalmente en las etapas previas del ciclo de vida, asociadas a la producción de insumos y suministro energético.

Las actividades con mayor impacto son las de corriente arriba, donde el consumo de electricidad participa con un 45.22 % (187.52 ton oil eq) para el método ReCiPe, mientras

que para IMPACT World+ representa el 47.59 % (213.65 ton oil eq), este resultado se explica por la alta dependencia de la generación eléctrica en fuentes fósiles, lo que implica una extracción significativa de recursos como gas natural, petróleo y carbón.

La segunda actividad con mayor impacto se tiene la movilidad con el 43.53 % (180.51 ton oil eq) para ReCiPe y con un 41.13 % (184.65 ton oil eq) para IMPACT World+, esto se debe con el consumo de combustibles en el transporte de personas, materiales e insumos. En tercer lugar, se encuentran los equipos de aire acondicionado con una participación de 9.03 % (37.44 ton oil eq) para ReCiPe y con un 9.18 % (41.21 ton oil eq) para IMPACT World+.

Actividades directas

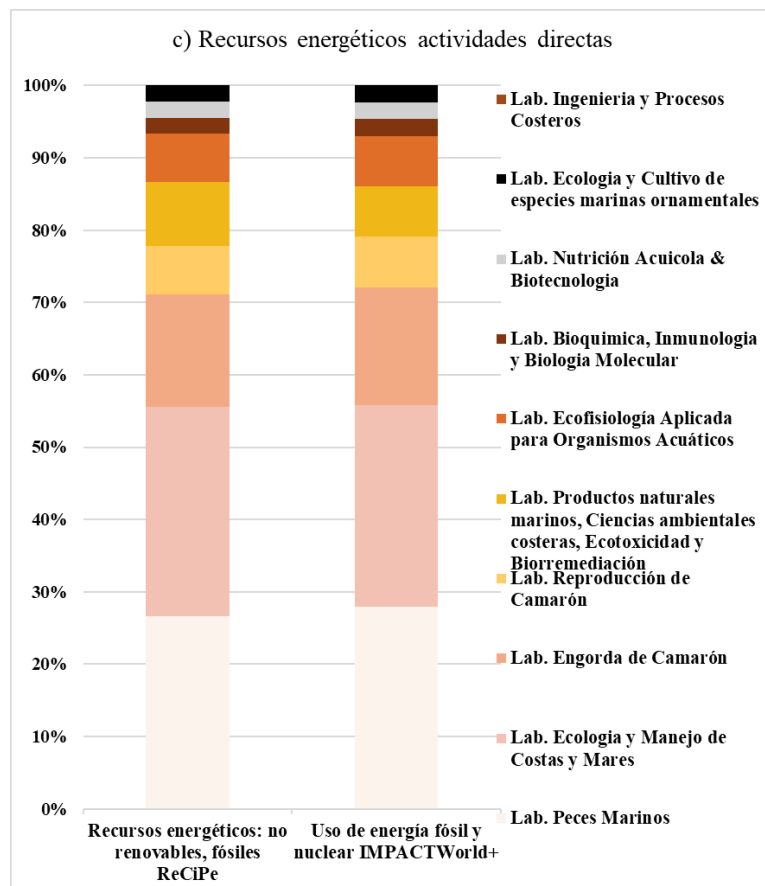


Figura 26c. Impactos en Recursos Energéticos actividades directas

En la Figura 26c, se observan las cargas ambientales de los laboratorios de la UAS. En primer lugar, se encuentra el laboratorio de ecología, manejo de costas y mares con un 0.13 % (0.53 ton oil eq) para ReCiPe y como segundo contribuyente, se tiene el laboratorio de peces marinos con un 0.12 % (0.49 ton oil eq). Para el método IMPACT World+ los principales contribuyentes son el laboratorio de ecología, manejo de costas y mares y el laboratorio de peces marinos cada uno con una participación del 0.12 % (0.53 ton oil eq) ambos impactos se atribuyen a la producción de los

desinfectantes utilizados en ambos laboratorios, como segundo contribuyente se tiene al laboratorio de engorda de camarón con un 0.07 % (0.13 ton oil eq) impacto atribuido a la producción del alimento de los camarones.

Actividades corriente abajo

El tratamiento de residuos muestra que para ReCiPe se contribuye con un 0.33 % (1.36 ton oil eq) y para IMPACT World+ con un 0.34 % (1.52 ton oil eq). Esta actividad no compone un punto crítico en esta categoría. Esta baja contribución se explica porque los procesos de tratamiento de residuos no implican, en general, un uso intensivo de recursos fósiles o minerales vírgenes. A diferencia de etapas como la producción de materiales, el uso de combustibles o la generación de energía, el tratamiento de residuos se enfoca principalmente en la gestión y disposición de materiales ya existentes dentro del sistema.

	ReCiPe	IMPACT World+
ACTIVIDAD CORRIENTE ARRIBA		
Equipos de Aire Acondicionado	9.03 %	9.18 %
Movilidad	43.53 %	41.13 %
Electricidad	45.22 %	47.59 %
Suministros de oficina	1.43 %	1.34 %
TOTAL	99.21 %	99.24 %
ACTIVIDADES DIRECTAS		
Lab. Engorda de Camarón	0.07 %	0.07 %
Lab. Peces Marinos	0.12 %	0.12 %
Lab. Ecología y Manejo de Costas y Mares	0.13 %	0.12 %
Lab. Reproducción de Camarón	0.03 %	0.03 %
Lab. Productos naturales marinos, Ciencias ambientales costeras, Ecotoxicidad y Biorremediación	0.04 %	0.03 %
Lab. Ecofisiología Aplicada para Organismos Acuáticos	0.03 %	0.03 %
Lab. Nutrición Acuícola & Biotecnología	0.01 %	0.01 %
Lab. Bioquímica, Inmunología y Biología Molecular	0.01 %	0.01 %
Lab. Ecología y Cultivo de especies marinas ornamentales	0.01 %	0.01 %
Lab. Ingeniería y Procesos Costeros	0 %	0 %
TOTAL	0.45 %	0.43 %
ACTIVIDADES CORRIENTE ABAJO		
Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos	0.04 %	0.04 %
Tratamiento de Agua Residual	0.29 %	0.03 %
TOTAL	0.33 %	0.34 %

Tabla 27. Contribución porcentual a la categoría de Recursos Energéticos por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+

5.3.7 Uso de Agua

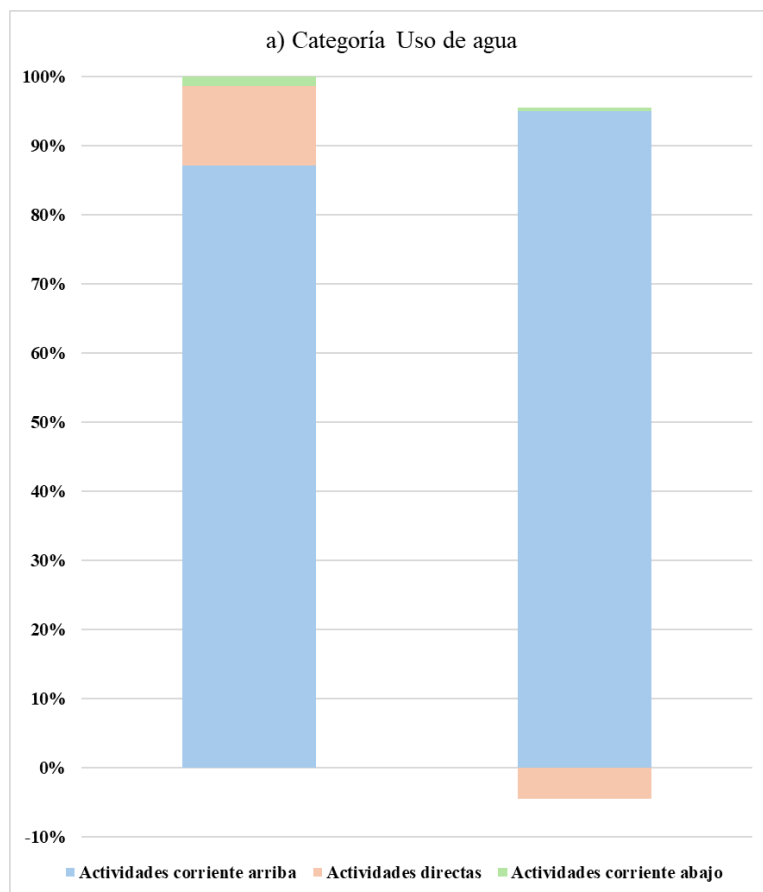


Figura 27a. Impactos generales en Uso de agua

En la categoría de impacto Uso de Agua, ambos métodos emplean como unidad de caracterización el m^3 , sin embargo, los valores numéricos obtenidos difieren de manera significativa: $4,444.87 m^3$ para ReCiPe y $28,963,215.1 m^3$ para IMPACT World+. Esta diferencia no implica una inconsistencia en el inventario, sino una diferencia en la modelación en cada método.

ReCiPe cuantifica el uso del agua considerando principalmente el volumen consumido; en cambio IMPACT World+ incorpora una regionalización más detallada del uso del agua donde el impacto del

consumo de agua depende no solo del volumen utilizado, sino también de factores como la disponibilidad local, la escasez hídrica y las condiciones específicas de la región donde ocurre la extracción.

Como resultado, los valores obtenidos mediante IMPACT World+ tienden a ser considerablemente mayores, ya que integran factores de caracterización que incrementan el impacto en zonas con mayor estrés hídrico. Por ello, la diferencia observada entre ambos métodos no debe interpretarse como una discrepancia en los datos, sino como una distinción entre los niveles de sensibilidad y detalle en la evaluación del impacto.

Actividades corriente arriba

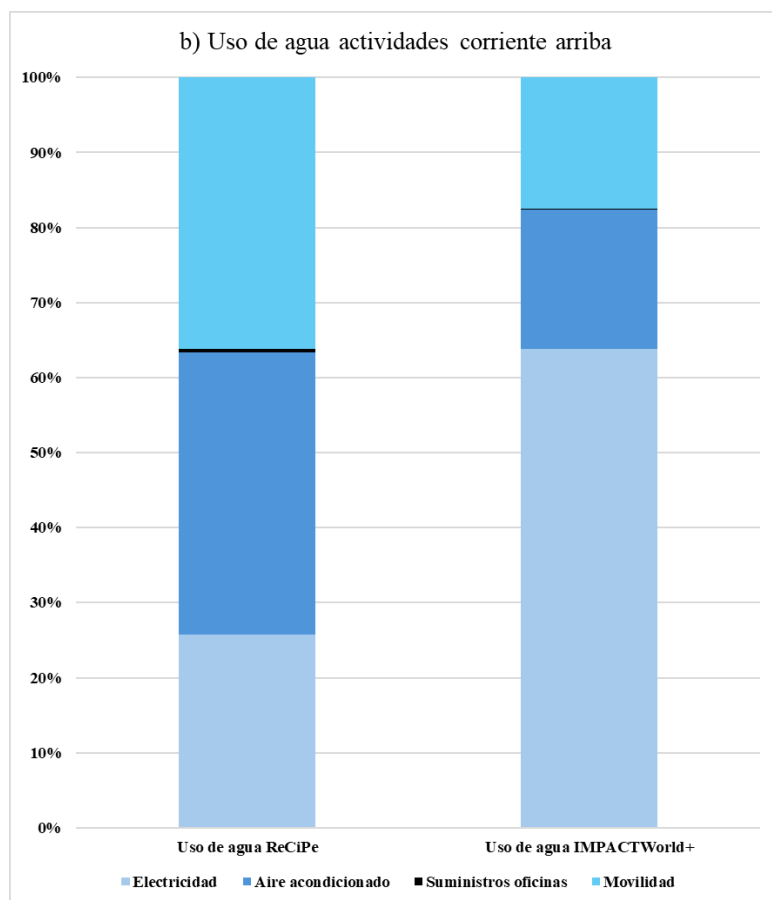


Figura 27b. Impactos en Uso de Agua actividades corriente arriba

Para IMPACT World+ el principal contribuyente es la electricidad con un 66 % (19,298,190 m³), los equipos de aire acondicionado participan con un 19.36 % (5,607,278.4 m³), finalmente el tercer mayor contribuyente es la movilidad con un 18.29 % (5,297,372 m³), la suma de las participaciones de estas actividades contribuyentes supera el 100 %, alcanzando el 103.65 %. La suma de las contribuciones supera el 100 % porque algunas actividades incluyen impactos de otras, como el uso de electricidad en diferentes procesos, lo que provoca que ciertos impactos se cuenten más de

una vez. Para ReCiPe el principal contribuyente son los equipos de aire acondicionado con un 32.73 % (1,454.80 m³), seguido por la movilidad con un 31.49 % (1,399.69 m³), finalmente el tercer mayor contribuyente es la electricidad con un 22.4 % (995.65 m³),

Actividades directas

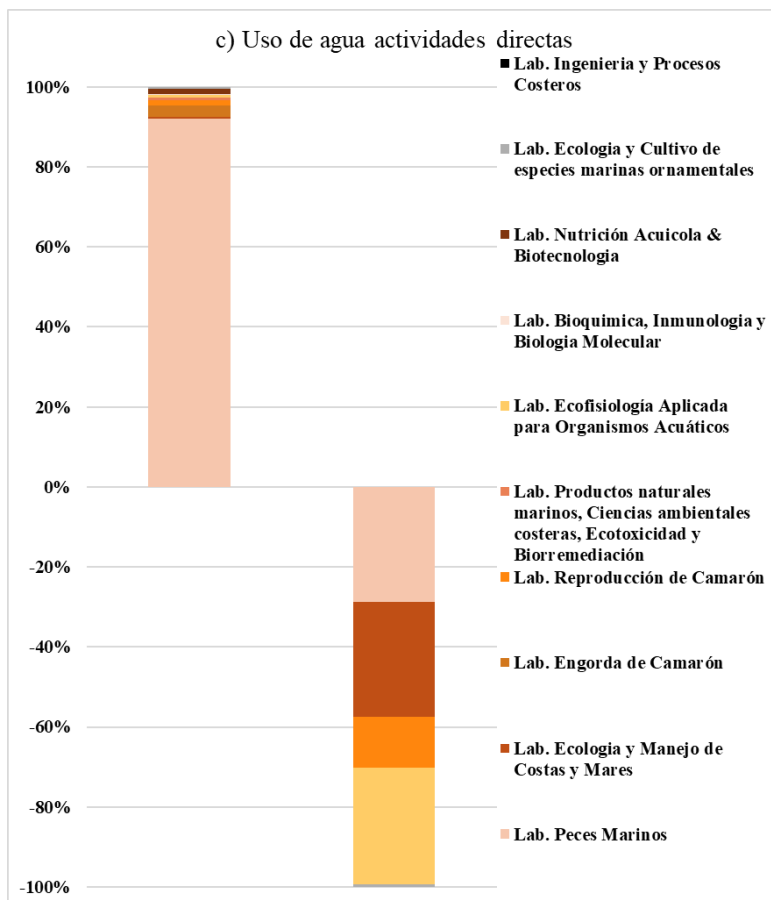


Figura 27c. Impactos en Uso de Agua actividades directas

En la Figura 27c, para el método IMPACT World+, observamos que aunque varios laboratorios presentan una participación del 0 %, también se observa que algunos muestran valores negativos en esta categoría: el laboratorio de peces marinos y el laboratorio de ecología, manejo de costas y mares contribuyen con un -1.43 % (-414,173.97 m³) cada uno, el laboratorio de ecofisiología aplicada para organismos acuáticos contribuye con un -1.46 % (-422,862.94 m³) y el laboratorio de reproducción de camarón participa con un -0.63 % (-182,468.25 m³).

Esto ocurre debido a que algunos

laboratorios presentan contribuciones negativas, esto se debe a que el método modela el uso del agua como un balance neto, lo que permite identificar situaciones en las que el agua se devuelve al sistema, sistemas de recirculación o que el volumen consumido es menor que el volumen retornado. Los valores negativos no representan impactos ambientales adversos, sino contribuciones que compensan y reducen la presión sobre el recurso hídrico.

En cambio, para el método ReCiPe el mayor contribuyente es el laboratorio de peces marinos con un 10.66 % (473.82 m³), seguido por el laboratorio de engorda de camarón con un 0.33 % (14.66 m³), como tercer mayor contribuyente se posiciona el laboratorio de nutrición acuícola con un 0.15 % (6.66 m³). La mayor contribución de estos laboratorios en esta categoría se asocia principalmente al uso intensivo de agua en los sistemas de cultivo acuícola, donde se requiere mantener condiciones controladas de calidad, recambio y oxigenación del agua para garantizar la

supervivencia y crecimiento de los organismos. Asimismo, el uso de alimentos balanceados como la harina de pescado, influye de manera indirecta en el consumo de agua, ya que su cadena de producción incorpora demandas hídricas significativas, especialmente en las etapas de procesamiento industrial.

Actividades corriente abajo

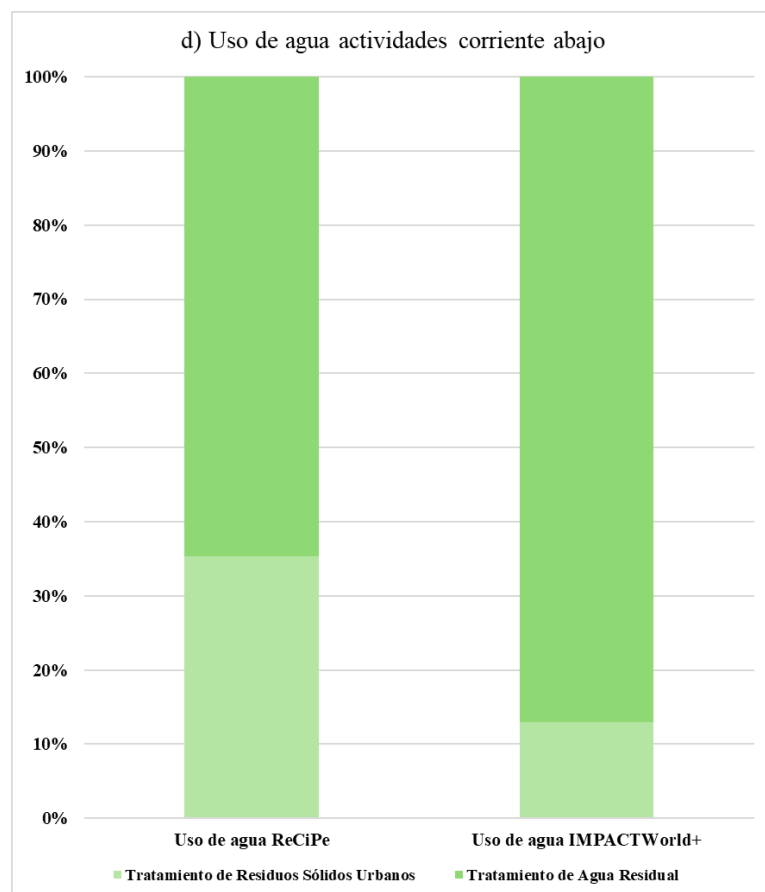


Figura 27d. Impactos en Uso de Agua actividades corriente abajo

El tratamiento de residuos sólidos urbanos y el tratamiento de agua residual, no compone un punto crítico en esta categoría, esto se debe al bajo porcentaje de contribución en ambos métodos, para ReCiPe participa con un 1.36 % (60.45 m³), y para IMPACT World+ con un 0.54 % (147,712.4 m³). El tratamiento de aguas residuales, aunque implica el manejo de grandes volúmenes de agua, no necesariamente se traduce en un consumo neto significativo, ya que gran parte del recurso es devuelto al ambiente tras su tratamiento, lo que reduce su contribución. De manera similar, el tratamiento de residuos sólidos

urbanos presenta una demanda hídrica baja, ya que sus principales impactos ambientales están más asociados al consumo de energía, emisiones atmosféricas y generación de lixiviados, en lugar del uso directo de agua.

	ReCiPe	IMPACT World+
ACTIVIDAD CORRIENTE ARRIBA		
Equipos de Aire Acondicionado	32.73 %	19.36 %
Movilidad	31.49 %	18.29 %
Electricidad	22.4 %	66.63 %
Suministros de oficina	0.39 %	0.16 %
TOTAL	87.01 %	104.44 %
ACTIVIDADES DIRECTAS		
Lab. Engorda de Camarón	0.33 %	0 %
Lab. Peces Marinos	10.66 %	-1.43 %
Lab. Ecología y Manejo de Costas y Mares	0.06 %	-1.43 %
Lab. Reproducción de Camarón	0.14 %	-0.63 %
Lab. Productos naturales marinos, Ciencias ambientales costeras, Ecotoxicidad y Biorremediación	0.08 %	0 %
Lab. Ecofisiología Aplicada para Organismos Acuáticos	0.08 %	-1.46 %
Lab. Nutrición Acuícola & Biotecnología	0.15 %	0 %
Lab. Bioquímica, Inmunología y Biología Molecular	0.03 %	0 %
Lab. Ecología y Cultivo de especies marinas ornamentales	0.06 %	-0.03 %
Lab. Ingeniería y Procesos Costeros	0 %	0 %
TOTAL	11.59 %	-4.98 %
ACTIVIDADES CORRIENTE ABAJO		
Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos	0.48 %	0.07 %
Tratamiento de Agua Residual	0.88 %	0.47 %
TOTAL	1.36 %	0.54 %

Tabla 28. Contribución porcentual a la categoría de Uso de Agua por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+

5.3.8 Formación de partículas

Para la categoría de Formación de Partículas tenemos la misma unidad para ambos métodos; sin embargo, se tiene una alta discrepancia entre los valores reales de contribución total. ReCiPe reporta una contribución de 1,734.98 kg $PM_{2.5}$, a diferencia de IMPACT World+, que reporta una contribución de 0.49 kg $PM_{2.5}$, este valor es aproximadamente 3,540.78 veces menor que los valores de la modelación en ReCiPe. La diferencia se puede deber a que ReCiPe aplica factores de caracterización más conservadores, mientras que IMPACT World+ es más representativo y realista espacialmente, por ello, los resultados no son directamente comparables en magnitud absoluta.

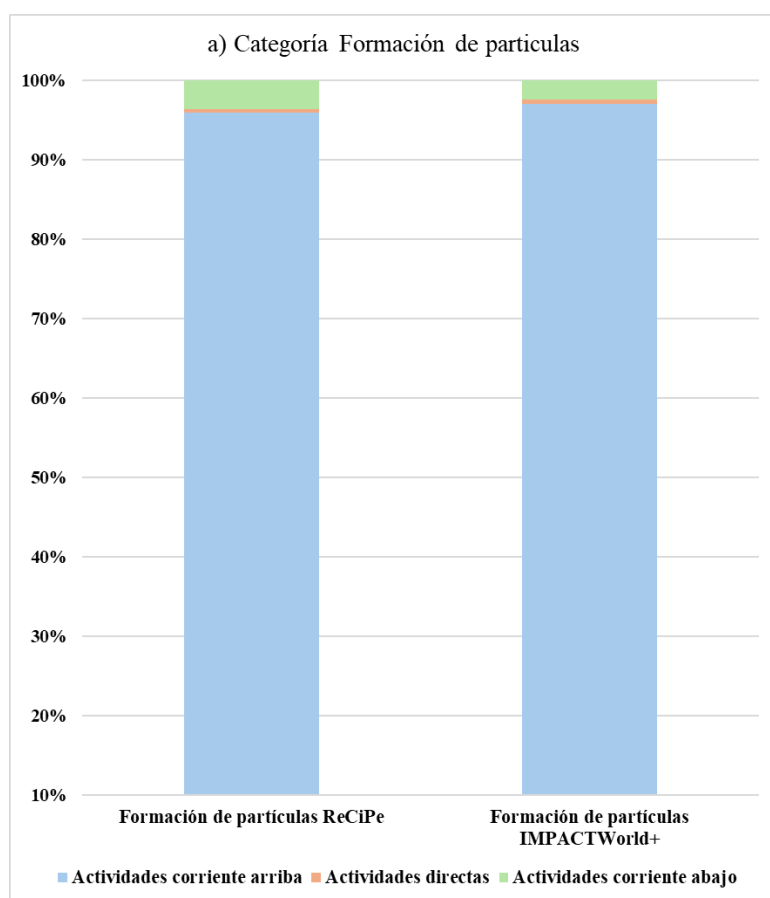


Figura 28a. Impactos generales en Formación de Partículas

En la Figura 28a, se muestra la distribución porcentual del impacto en la categoría de formación de partículas $PM_{2.5}$ diferenciada por tipo de actividad. Los resultados muestran similitud entre la distribución porcentual entre métodos, donde las actividades con mayor contribución son de corriente arriba, con una participación del 95.94 % para ReCiPe y un 97.11 % para IMPACT World+. Como segundo contribuyente se tienen las actividades corriente abajo con una contribución del 3.59 % para ReCiPe y 2.46 % para IMPACT World+, por último, para ReCiPe las actividades directas contribuyen

con un 0.46 % y con un 0.47 % para IMPACT World+.

Actividades corriente arriba

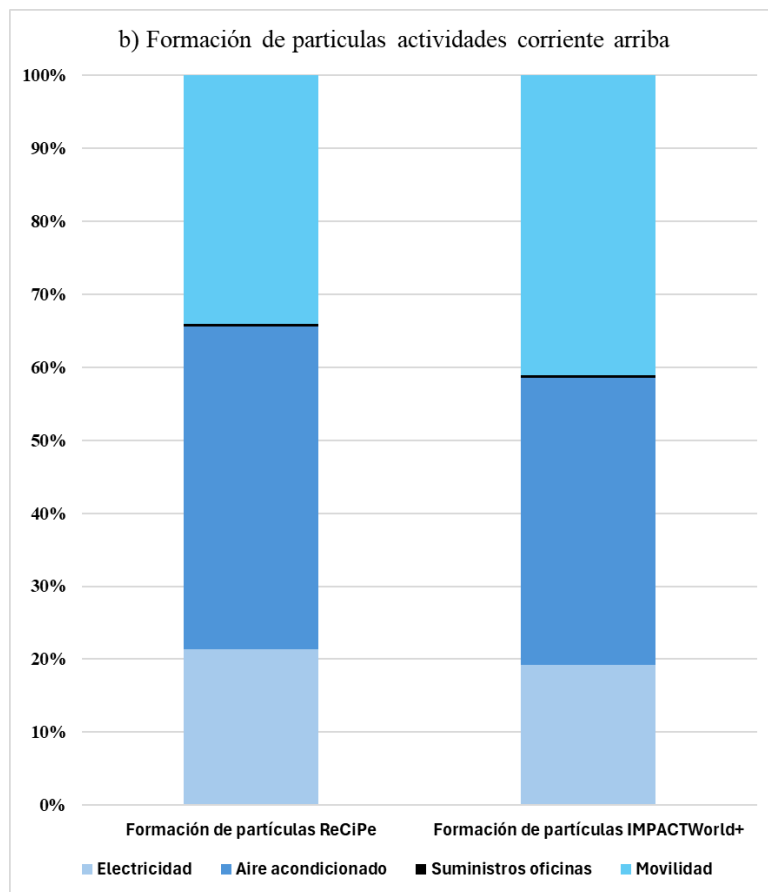


Figura 28b. Impactos en Formación de Partículas actividades corriente arriba

En las actividades corriente arriba el mayor contribuyente para ReCiPe proviene de los equipos de aire acondicionado con un 42.44 % (736.32 kg PM_{2.5}), este resultado se asocia principalmente a los procesos involucrados en su fabricación. Seguido por la movilidad con un 32.69 % (567.16 kg PM_{2.5}), lo cual se explica generación de partículas finas por el uso de vehículos motorizados. Como ultimo mayor contribuyente se encuentra la electricidad, con un 20.49 % (355.49 kg PM_{2.5}).

IMPACT World+ tiene un patrón similar, aunque hay diferencias en

el orden de contribución por actividad, donde el 39.89 % (0.19 kg PM_{2.5}) se asigna a la movilidad, el 38.15 % (0.18 kg PM_{2.5}) a los equipos de aire acondicionado y el 18.69 % (0.09 kg PM_{2.5}) a la electricidad. Esto indica que la formación de material particulado se produce durante los procesos de combustión y consumo energético asociado a estas tres actividades.

Actividades directas

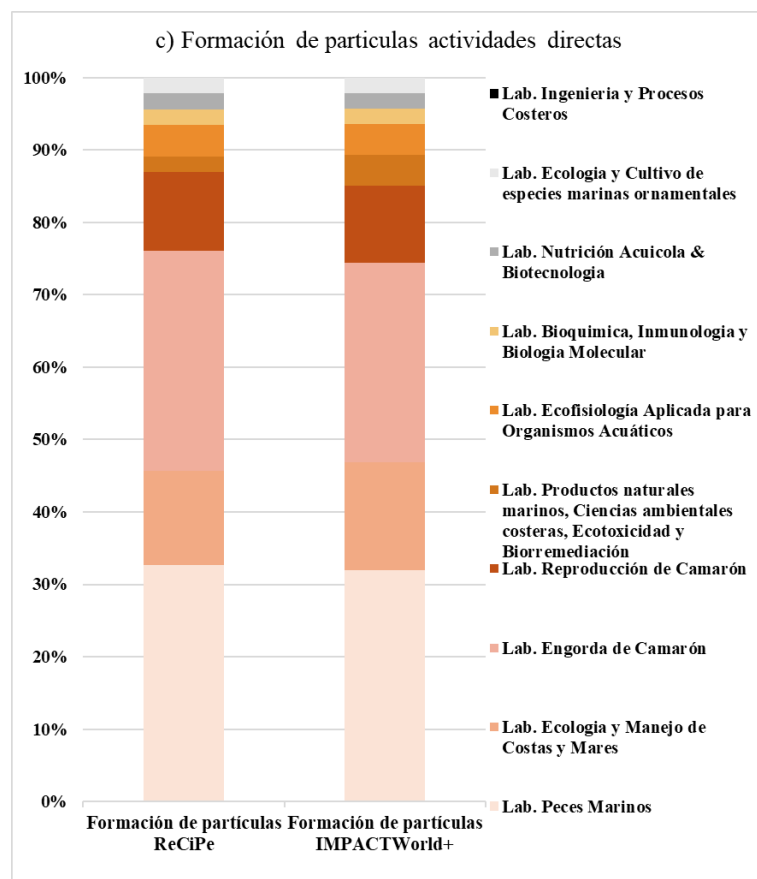


Figura 28c. Impactos en Formación de Partículas actividades directas

En la Figura 28c, se representan los impactos generados por las actividades directas correspondientes a los laboratorios, donde estos laboratorios tienen una participación muy reducida y prácticamente igual entre métodos. El laboratorio de peces marinos se identifica con el mayor contribuyente en ambos métodos, con una participación para ReCiPe del 0.15 % (2.60 kg PM_{2.5}) y para IMPACT World+ del 0.15 % (7.3⁻⁴ kg PM_{2.5}), en segundo mayor contribuyente es el laboratorio de engorda de camarón que registra una participación del 0.14 % (2.42 kg PM_{2.5}) en ReCiPe y un 0.13 % (6.39⁻⁴ kg PM_{2.5}) para

IMPACT World+, el resto de los laboratorios presentan valores menores al 0.05%.

Los suministros de oficina muestran un porcentaje mínimo en la contribución de impacto, de 0.32 % (5.55 kg PM_{2.5}) para ReCiPe y 0.384 % (1.8⁻³ kg PM_{2.5}) para IMPACT World+. Este impacto está asociado principalmente a procesos indirectos incluidos en su ciclo de vida, como la producción de papel, manufactura de insumos y transporte.

Actividades corriente abajo

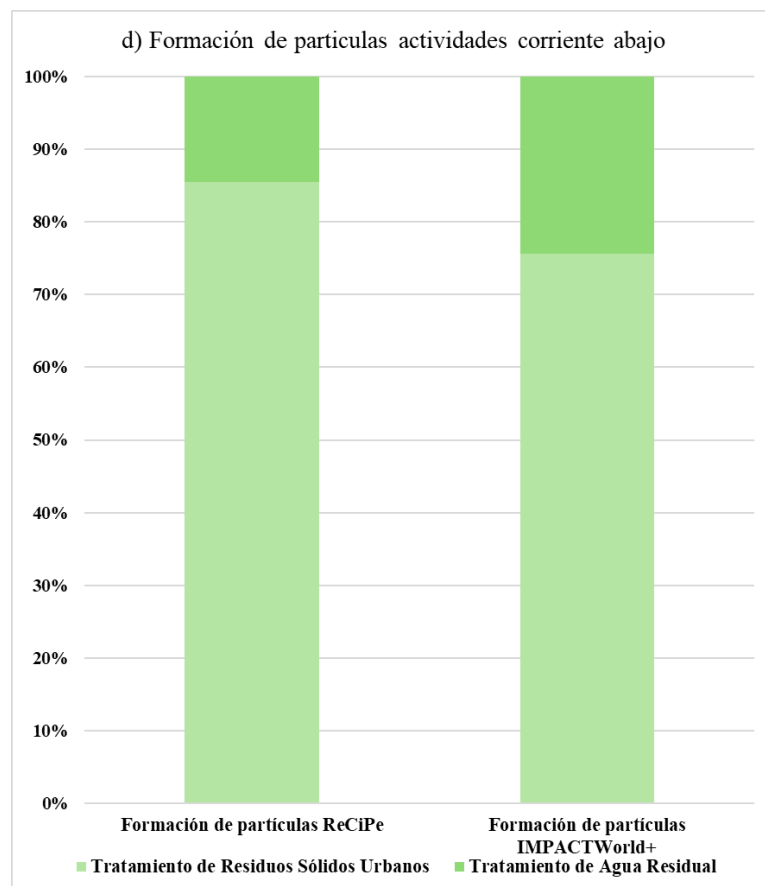


Figura 28d. Impactos en Formación de Partículas actividades corriente abajo

El tratamiento de residuos sólidos y agua residual presenta contribuciones moderadas en ambos métodos, con 3.59 % (62.28 kg $PM_{2.5}$) para ReCiPe y 2.46 % (1.2⁻² kg $PM_{2.5}$) para IMPACT World+, valores que se relacionan con el consumo eléctrico del sistema de tratamiento y con las emisiones derivadas del manejo de lodos.

En general, ambos métodos muestran que más del 95 % del impacto proviene de actividades previas a las actividades desarrolladas en la Unidad, pero como resultado de las necesidades indispensables para operar con las

mejores condiciones. Estos impactos están relacionado a la generación de energía a partir de fuentes termoeléctricas. La similitud entre métodos indica que la categoría de formación de partículas no depende del método de evaluación, ya que ambos usan mecanismos similares para identificar los principales contribuyentes. Si bien difiere el valor numérico del total de la contribución total, la diferencia de aproximadamente 3,540 veces entre ReCiPe e IMPACT World+ no significa un problema de unidades, sino de enfoques conceptuales distintos en la modelación de la categoría. ReCiPe usa un enfoque de “potencial de formación”, donde las emisiones de SO_2 y NO_x son los principales precursores y se convierten directamente en material particulado mediante factores globales. IMPACT World+, a diferencia de ReCiPe, utiliza un modelo de regionalización donde se considera la fracción real de precursores que se transforman en partículas.

	ReCiPe	IMPACT World+
ACTIVIDAD CORRIENTE ARRIBA		
Equipos de Aire Acondicionado	42.44 %	38.15 %
Movilidad	32.69 %	39.89 %
Electricidad	20.49 %	18.69 %
Suministros de oficina	0.32 %	0.384 %
TOTAL	95.94 %	97.11 %
ACTIVIDADES DIRECTAS		
Lab. Engorda de Camarón	0.14 %	0.13 %
Lab. Peces Marinos	0.15 %	0.15 %
Lab. Ecología y Manejo de Costas y Mares	0.06 %	0.07 %
Lab. Reproducción de Camarón	0.05 %	0.05 %
Lab. Productos naturales marinos, Ciencias ambientales costeras, Ecotoxicidad y Biorremediación	0.01 %	0.02 %
Lab. Ecofisiología Aplicada para Organismos Acuáticos	0.02 %	0.02 %
Lab. Nutrición Acuícola & Biotecnología	0.01 %	0.01 %
Lab. Bioquímica, Inmunología y Biología Molecular	0.01 %	0.01 %
Lab. Ecología y Cultivo de especies marinas ornamentales	0.01 %	0.01 %
Lab. Ingeniería y Procesos Costeros	0 %	0 %
TOTAL	0.46 %	0.47 %
ACTIVIDADES CORRIENTE ABAJO		
Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos	3.07 %	1.86 %
Tratamiento de Agua Residual	0.52 %	0.6 %
TOTAL	3.59 %	2.46 %

Tabla 29. Contribución porcentual a la categoría de Formación de Partículas por grupos de actividades según ReCiPe e IMPACT World+

5.3.9 Impactos ambientales derivados de la movilidad

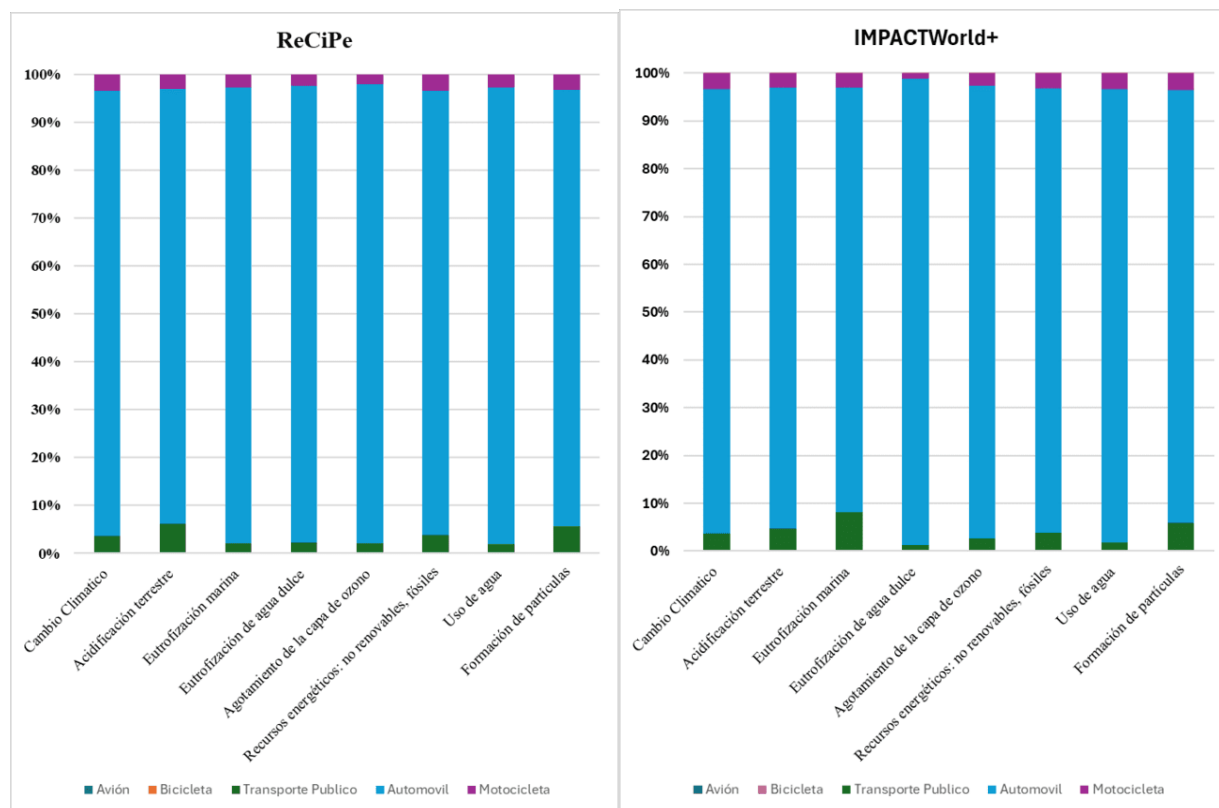


Figura 29. Resultados de impactos ambientales en la Movilidad

La Figura 29, muestra la distribución porcentual de las contribuciones que cada medio de transporte (avión, bicicleta, transporte público, automóvil y motocicleta) tiene en las diferentes categorías de impacto tanto para ReCiPe como para IMPACT World+.

A partir de la información recopilada, se determinó que la comunidad recorre aproximadamente 1,798,250 km anuales considerando todos los medios de transporte para desplazarse hacia la UAS, de los cuales 1,472,130 km anuales le corresponden a la movilidad en automóviles particulares. Por lo que los resultados muestran que el automóvil es el principal contribuyente en prácticamente todas las categorías de impacto, tanto en ReCiPe como en IMPACT World+, con valores superiores al 90 % en todas ellas.

5.3.10 Comparación de los resultados del ACV-O en la Unidad Académica Sisal con los resultados del ACV-O en la Facultad de Ciencias y Tecnología (FaST)

Con el fin de evaluar la congruencia y representatividad de este estudio, los resultados obtenidos se compararon con los del ACV-O realizado en la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universitas Pelita Harapan (UPH), en Indonesia. Aunque los estudios se hicieron en contextos geográficos, climáticos y socioeconómicos diferentes, comparten metodologías similares. Esto permite comparar jerarquía de contribuciones y patrones de impacto.

Comparación metodológica general

Ambos estudios adoptan un enfoque de ACV-O, siguiendo lo establecido por la norma ISO 14072. En los dos casos, el análisis se aplica a una universidad. Asimismo, los inventarios de ciclo de vida se constituyen utilizando datos institucionales disponibles, asignaciones internas y bases de datos secundarias, reconociendo explícitamente las limitaciones asociadas a la disponibilidad de información primaria. En cuanto a la evaluación de impactos, el estudio de la UPH emplea el método ReCiPe *midpoint* (H) y la Demanda Energética Acumulada (CED), mientras que en este estudio se utilizaron los métodos ReCiPe e IMPACT World+.

Tanto en el estudio de la UAS como en el de la UPH, los resultados muestran que, en la mayoría de las categorías de impacto, el mayor porcentaje de contribuciones se da en las actividades indirectas corriente arriba, superando a las actividades directas realizadas dentro de las instalaciones universitarias. En el caso de la UPH, la electricidad adquirida y el transporte de la comunidad fueron los que se identificaron como principales contribuyentes en casi todas las categorías. De manera similar, en el estudio de la UAS también se identifica a la electricidad, y al transporte como los mayores contribuyentes, agregando únicamente como contribuyente adicional los equipos de aire acondicionado. Esto confirma un patrón común en instituciones universitarias donde los impactos están determinados principalmente por la infraestructura energética y no por las actividades directas.

En el caso de la UAS, el consumo de electricidad representa el 34.66 % del impacto total en la categoría de cambio climático, equivalente a 568.64 ton CO₂ eq. Este valor elevado se debe a la alta dependencia de fuentes fósiles, lo que coincide con los resultados en el estudio de la UPH, donde la electricidad es uno de los principales contribuyentes a los impactos ambientales, con una contribución de 1616.78 ton CO₂ eq. La similitud entre ambos estudios confirma que, independientemente de la diferente ubicación geográfica, las instituciones de educación superior presentan una alta huella de carbono, debido a que gran parte de sus servicios como la iluminación y la climatización, y los equipos de laboratorio dependen de un suministro continuo de energía.

Los resultados obtenidos en la UAS muestran una alta coherencia con los patrones identificados en el estudio de la UPH, particularmente en el patrón de actividades con mayor contribución.

5.4 Propuestas para mejorar la sostenibilidad de la Unidad Académica

El ACV-O realizado en este estudio evidenció la necesidad de proponer mejoras que ayuden a reducir los impactos ambientales. Entre los resultados más relevantes se encontró que el consumo de energía, el uso de aire acondicionado y la movilidad contribuyen de manera significativa a la huella ambiental de la organización. Tomando en cuenta estos resultados se plantean las siguientes propuestas:

5.4.1 PROPUESTA PARA LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO

El National Renewable Energy Laboratory (NREL) con datos del Centro Nacional de Control de Energía, menciona que en la península de Yucatán la generación de energía se compone de un 78 % de fuentes fósiles y un 12 % de fuentes renovables, lo que evidencia una dependencia de combustibles convencionales no renovables. En Yucatán, la generación de energía a partir de combustibles fósiles se realiza mediante centrales con turbinas de gas de ciclo combinado, donde el gas es la materia prima para el funcionamiento de estas. Asimismo, a partir del 2018 se ha visto un aumento en la escasez de gas natural en la región, lo que resulta en un incremento en el precio de la energía eléctrica (Bracho et al., 2021). Por esta escasez se debe migrar a fuentes de energía renovables, como la energía solar, sumado al excelente potencial solar, aprovechando en excelente potencial solar de la península de Yucatán.

En este estudio el consumo de energía eléctrica causó una parte significativa de los impactos ambientales. Para el método de ReCiPe, representó el mayor impacto en dos categorías: agotamiento de la capa de ozono y recursos energéticos. Por otro lado, para el método IMPACT World+, también representó el mayor impacto en dos categorías: recursos energéticos y uso de agua. Estos resultados se explican principalmente porque la generación de electricidad a partir de fuentes fósiles produce emisiones de GEI y otros impactos asociados a la extracción de recursos.

En la UAS se registró un consumo de 1,115,760 kWh de energía eléctrica durante el año 2024. El consumo de electricidad es elevado; sin embargo, este se asocia directamente a los procesos intensivos desarrollados en los laboratorios, los cuales necesitan operar bajo condiciones controladas de aireación, iluminación y temperatura, para garantizar que los organismos cuenten con las mejores condiciones. No se identifica un uso desmedido de electricidad, sino que el consumo resulta indispensable para asegurar el bienestar de los organismos y la validez de los resultados experimentales.

La UAS tiene una superficie disponible de aproximadamente $5,189.62 \text{ m}^2$. Actualmente se registra una radiación promedio de entre 5 a 7 kWh/m²/día en Sisal (Weather Spark), lo que indica un alto potencial para generación de energía solar.

Se propone la instalación de paneles solares de la empresa IUSA. Se selecciona este proveedor debido a que es una empresa mexicana, que cuentan con una sólida experiencia fabricando paneles desde 2014, y que ofrece una garantía de 25 años. El modelo considerado es el IUSASOL-PV-04 (bifacial), que tiene las siguientes características:

Potencia nominal (Pmax): 290 W – 300 W

Eficiencia del panel: 17.6 % – 18.2 %

Dimensiones: $1.658 \times 992 \times 5.8 \text{ mm}$ (~1.64 m² por panel)

Peso: 23 kg por panel

Tecnología: Monocristalino bifacial PERC (permite captar luz reflejada y frontal, aumentando generación hasta 20 %)

Rango de temperatura de operación: -40°C a 85 °C

Cálculo de la capacidad instalada

Si tenemos una superficie aproximada de $5,189.62 \text{ m}^2$, le restamos un 20 % de la superficie para contar con pasillos que puedan ayudar a dar mantenimiento a los paneles, quedando una superficie de $4,152.62 \text{ m}^2$. El número de paneles que se pueden instalar se calcula dividiendo la superficie por el tamaño del panel:

$$\text{Número de paneles} = \frac{4,151.70}{1.64} \approx 2,531.52 \text{ paneles}$$

La potencia total instalada se determina multiplicando el número de paneles por la potencia nominal promedio (295W):

$$\text{Potencia} = 2,531.52 \times 295W = 746,798.4 \text{ kW}$$

La energía eléctrica generada depende de la radiación solar promedio. Estimando la energía diaria tenemos:

$$\text{Energía diaria} = \text{Potencia} \times \text{Radiación} \times \text{Eficiencia}$$

$$\text{Energía diaria} = 746.79 \text{ kW} \times (6 \text{ kWh/m}^2/\text{día}) \times 0.8 = 3,579.07 \text{ kWh/día}$$

$$\text{Energía anual} = 3,579.07 \text{ kWh/día} \times 365 \text{ días} = 1,306,361.28 \text{ kW/año}$$

Con la instalación de paneles solares se estaría cubriendo la demanda total de electricidad de la UAS.

5.4.2 PROPUESTA PARA LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO POR EL USO DE AIRE ACONDICIONADO

El uso de aire acondicionado con el método ReCiPe representó el mayor impacto en cuatro categorías: formación de partículas, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce y uso de agua. Sin embargo, con el método IMPACT World+ representó el mayor impacto en tres categorías: agotamiento de la capa de ozono, acidificación terrestre y eutrofización de agua dulce.

La UAS cuenta con 197 equipos de aire acondicionado que operan de manera continua las 24 horas del día los 7 días de la semana. Si bien algunos equipos se apagan durante la noche, un gran porcentaje permanece en funcionamiento todo el día. Esta condición se debe a que la Unidad se localiza en la península de Yucatán, donde las temperaturas logran superar los 35°C, lo que hace indispensable el uso de estos equipos para proveer confort en las áreas de trabajo. Adicionalmente, es necesario mantener temperaturas controladas en los laboratorios para evitar alteraciones en los insumos y asegurar que los organismos cultivados se desarrollen en óptimas condiciones. Por ello, resulta inviable la eliminación de estos equipos.

Con el objetivo de reducir estos impactos, considerando las limitaciones económicas y operativas para la UAS, se propone como alternativa la implementación de un protocolo de vigilancia, mantenimiento preventivo y control de fugas de refrigerante. Este protocolo se adaptó al protocolo de FONATUR BMO (Fonatur Constructora, s.f).

Objetivo del protocolo

Reducir los impactos ambientales asociados a las emisiones directas a la atmósfera por fugas de refrigerantes y el incremento del consumo energético por falta de mantenimiento.

Componentes del protocolo propuesto

1. Inventario y caracterización de equipos

- Registro de todos los equipos de aire acondicionado.
- Identificación del tipo y cantidad de refrigerante utilizado.

2. Inspección periódica de fugas

- Revisión visual de conexiones, válvulas y tuberías.
- Uso de detectores de fugas.

3. Mantenimiento preventivo programado

- Limpieza de filtros y serpentines.
- Revisión de aislamiento térmico en líneas de refrigerante.
- Ajuste de cargas de refrigerante conforme a especificaciones del fabricante.

4. Registro y trazabilidad del refrigerante

- Bitácora de recargas.
- Control de cantidades añadidas o recuperadas.
- Identificación temprana de pérdidas recurrentes.

5. Capacitación del personal

- Sensibilización sobre impactos ambientales y climáticos.

Reporte de mantenimiento de equipos de aire acondicionado			
Fecha	Número de identificación:		
	Responsable:		
	Ubicación:		
	Modelo/Tipo de unidad:		
	Sí	No	Observaciones
Limpieza de filtros	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Revisión de conexiones y válvulas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ajuste de carga de refrigerante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Inspección de fugas con detector	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Inspección de fugas con detector	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Técnico: _____			
Responsable de mantenimiento: _____			
Supervisor: _____			

Figura 30. Propuesta de reporte de mantenimiento de equipos de aire acondicionado

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

La metodología de ACV-O permitió evaluar el desempeño ambiental de la UAS, identificando que aproximadamente entre el 79 % y el 85 % de los impactos se generan corriente arriba, es decir, fuera de la unidad, pero como consecuencia directa de las actividades de la UAS. El estudio evidenció que el consumo energético, el uso de equipos de aire acondicionado y la movilidad de la comunidad, son los factores que mayor contribución generan en las categorías de impacto evaluadas. La aplicación complementaria de dos métodos de evaluación de impactos ambientales (ReCiPe y IMPACT World+) permitió comparar impactos y reconocer diferencias en la caracterización de categorías de impacto como el consumo de agua, eutrofización marina, eutrofización de agua dulce y la formación de partículas, reforzando la importancia de elegir conscientemente el método a aplicar.

Se concluye que el método más acorde para el tipo de estudio fue IMPACT World+, ya que está diseñado para Latinoamérica, a diferencia de ReCiPe que suele tener factores de caracterización europeos, por lo que es posible que algunos datos locales no encajen bien. A pesar de que para IMPACT World+ la contribución total fue menor en 6 de 8 categorías en comparación con ReCiPe, sigue siendo el método más adecuado, ya que refleja de manera más realista las condiciones regionales. Cabe resaltar que ambos métodos coincidieron en identificar en la misma categoría las actividades con mayor carga ambiental, lo que demuestra la confiabilidad del análisis y permite una visión consistente sobre los procesos críticos dentro de la UAS.

IMPACT World+ reporta que las actividades corriente arriba son las que más impactos generaron en 6 de 8 categorías: cambio climáticos, acidificación terrestre, agotamiento de la capa de ozono, recursos energéticos, uso de agua y formación de partículas, las actividades corriente abajo tuvieron los mayores impactos en la categoría eutrofización marina y las actividades directas también representaron el mayor impacto en la categoría eutrofización de agua dulce. Si bien las actividades directas representan los laboratorios de la UAS, la forma en la que se estructuró el estudio contabilizando el consumo de la energía y los equipos de aire acondicionado como un total de la unidad, en lugar de asignarlo a cada laboratorio de manera individual, limita la identificación precisa de los impactos asociados a cada espacio.

La UAS se encuentra en un ecosistema costero sensible, debido a su cercanía a la reserva estatal “El Palmar”, con presencia de dunas, manglares, ojos de agua, playas y una variedad de flora y fauna. La protección de este entorno es necesaria para asegurar la conservación de la flora y fauna, por ello la UAS debe adoptar prácticas sostenibles que minimicen los impactos ambientales. En este contexto, se detectan oportunidades de mejoras, como la implementación de paneles solares, para disminuir el consumo de energía proveniente de fuentes fósiles y la implementación de protocolos de mantenimiento de los equipos de aire acondicionado para evitar fugas de refrigerantes y pérdidas de energía.

Estas acciones contribuyen a la conservación del ecosistema, principalmente al disminuir los impactos ambientales asociados con el funcionamiento de la Unidad académica. Aunque la UAS es un espacio dedicado a la creación de conocimiento científico y humano, esto no justifica que se tengan impactos ambientales innecesarios. Por lo tanto, la implementación de prácticas sostenibles es esencial para proteger la biodiversidad y los recursos naturales de Sisal.

REFERENCIAS

Acuerdo para la Creación de la Unidad Académica de Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México en Yucatán. (2015, agosto). *Gaceta UNAM*. Oficina de la Abogacía General, UNAM. https://www.abogadogeneral.unam.mx/sites/default/files/archivos/LegUniv/340-AcuerdoCreacionUnidadAcademicaCienciasTecnologias_140815.pdf

Aguado Puig, A. (2018). *Desarrollo sostenible: 30 años de evolución desde el informe Brundtland* (Tesis doctoral, Universidad de Sevilla). https://www.academia.edu/105568567/Desarrollo_sostenible_30_a%C3%B1os_de_evoluci%C3%B3n_desde_el_informe_Brundtland

Andrews, E. S. (2009). *Guidelines for social life cycle assessment of products: Social and socio-economic LCA guidelines complementing environmental LCA and life cycle costing*. <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2009%20-%20Guidelines%20for%20sLCA%20-%20EN.pdf>

Ayuntamiento de Mérida. (2021). *Actualización del Plan de Acción Climática Municipal 2021–2024*. <https://www.adaptationcommunity.net/wp-content/uploads/2025/01/Publications-PACMUN-Merida.pdf>

Bracho, R., Flores-Espino, F., Morgenstein, J., Aznar, A., Castillo, R., & Settle, E. (2021). *Evaluación energética de la península de Yucatán: Vías para un sistema energético limpio y sustentable*. National Renewable Energy Laboratory. <https://docs.nrel.gov/docs/fy21osti/81142.pdf>

Bulle, C., Jolliet, O., Humbert, S., Rosenbaum, R. K., & Margni, M. (2013). IMPACT World+: Una nueva metodología global y regionalizada de Análisis del Impacto del Ciclo de Vida. *SETAC Argentina*. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/impact-world-una-nueva-metodolog%C3%ADa-global-y-regionalizada-de-an%C3%A1lisis-del-impacto-del-ciclo-de-vida>

Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A. M., Bourgault, G., De Bruille, V., et al. (2019). IMPACT World+: A globally regionalized life cycle impact assessment method. *International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-019-01583-0>

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2004). *Ley General de Bienes Nacionales*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGBN.pdf>

Canul-Macario, C. (2024). Simulaciones de intrusión salina en acuíferos cársticos costeros. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11899-2>

Convención de Ramsar. (1971). *Convención relativa a los humedales de importancia internacional*. Ramsar, Irán. <https://www.ordenjuridico.gob.mx/TratInt/2022ml/PROTOCOLO-HUMEDALES.pdf>

Curran, M. A. (2006). *Life cycle assessment: Principles and practice*. United States Environmental Protection Agency.

CMMAD. (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo Nota del Secretario General. https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf

INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/app/cpv/2020/resultadosrapidos/default.html?texto=Sisal>

PROFEPA. (2025). *Juez vincula a proceso a dos personas...* <https://www.gob.mx/profepa/prensa/juez-vincula-a-proceso-a-dos-personas-por-la-presunta-venta-y-lotificacion-de-terrenos-en-el-puerto-de-sisal>

EeBGuide. (2012). *Operational guidance for life cycle assessment studies*. European Commission. <https://eebguide.eu/>

EPA. (2001). *La disminución de la capa de ozono* (EPA430-F-01-033). U.S. EPA. <https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/ozono.pdf>

RAMSAR. (2003). Reserva Estatal El Palmar. <https://rsis.ramsar.org/es/ris/1328?language=en>

Finkbeiner, M., Schau, E. M., Lehmann, A., & Traverso, M. (2010). Toward life cycle sustainability assessment. *Sustainability*.

Fonatur Constructora. (s. f.). *Procedimiento de mantenimiento de equipos*. <http://www.fonaturconstructora.gob.mx/>

García, V. B. (2023). Importancia del ACV. *Knauf Industries*. <https://knauf-industries.es/>

Google Earth. (2025). *Coordenadas geográficas de Sisal*. Google.

Gómez Sánchez, M. D. (2016). *Evaluación de la gestión ambiental del Banco de México*. UNAM. <https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/3e79430c-5922-4eda-8289-2b7047d2ca0d/content>

González Márquez, E. del P. (2025). *La magia del despojo* (Tesis doctoral). CINVESTAV. <https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/5922>

Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (Eds.). (2018). *Life cycle assessment: Theory and practice*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-56475-3>

Huijbregts, M. A. J., et al. (2017). ReCiPe2016. *International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1246-y>

Hunt, R. G., Sellers, J. D., & Franklin, W. E. (1992). Análisis del perfil de recursos y medio ambiente: una evaluación ambiental del ciclo de vida para productos y procedimientos. <https://www.semanticscholar.org/paper/Resource-and-environmental-profile-analysis%3A-A-life-Hunt-Sellers/371ae7558cb9da1a26ba3a8f2dfe3c052768e527>

ISO 14044:2006. (2006). *ISO 14040:2006*. Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>

ISO 14046:2014. (2014). *ISO 14046:2014*. Gestión ambiental — Huella de agua — Principios, requisitos y directrices. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14046:ed-1:v1:es>

ISO 14072:2024. (2024) *ISO 14072:2024 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidance for organizational life cycle assessment*. <https://www.iso.org/standard/86265.html>

ISO 14064-1:2018. (2018). *ISO 14064-1:2018*. Parte 1: Especificación con directrices a nivel organizativo para la cuantificación y el reporte de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero. <https://www.iso.org/standard/66453.html>

Informe de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible. (2002). Naciones Unidas. https://biblioteca.hegoa.ehu.eus/downloads/12627/%2Fsystem%2Fpdf%2F1366%2FInforme_de_la_Cumbre_Mundial_sobre_Development_Sostenible_Johannesburgo_2002.pdf

Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros. (s. f.). *Unidad Académica Sisal*. UNAM. <https://lipc.unam.mx/>

Lave, L. B., et al. (1995). Input–output LCA. *Environmental Science & Technology*. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es00009a748>

Martínez Blanco, J., et al. (2015). *Guidance on organizational LCA*. https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2015/04/o-lca_24.4.15-web.pdf

Martínez-Blanco, Forin, Inaba, & Finkbeiner. (2017). *Road testing organizational life cycle assessment around the world: Applications, experiences and lessons learned*. United Nations Environment Programme. <https://www.lifecycleinitiative.org/library/road-testing-organizational-life-cycle-assessment-around-the-world-applications-experiences-and-lessons-learned/>

Misni, A., et al. (2024). Carbon footprint review. *Sustainability*. <https://aje-bs.e-iph.co.uk/index.php/ajE-Bs/article/view/457>

Novelo, I., & Soto, E. (2024). Nivel del mar y acuíferos. <https://www.albasud.org/>

Observatorio Turístico de Yucatán. (2023). *Estudio de satisfacción local en Sisal*. Gobierno de Yucatán. <https://observatoryucatan.org.mx/public/publicaciones/2023/ReporteResultadosSisal.pdf>

Pandey, D., et al. (2010). Carbon footprint methods. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-010-1678-y>

Paredes-Canencio, K. N., et al. (2024). Carbon footprint HEIs. *Environment, Development and Sustainability*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-024-04596-4>

Pedrozo, A., & Ramírez, N. (2020). Eutrofización. Gobierno de México. <https://www.imta.gob.mx/gobmx/DOI/perspectivas/2020/b-imta-perspectivas-2020-08.pdf>

Reserva Estatal El Palmar. (s. f.). <https://rsis.ramsar.org/>

Rodríguez Lado, L., et al. (2007). Sensibilidad de suelos. JRC. https://www.academia.edu/587356/Evaluation_of_the_sensitivity_of_European_soils_to_the_deposition_of_acid_compounds_different_approaches_provide_different_results

Rubik, F., & Scholl, G. (2002). IPP. *Journal of Cleaner Production*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652602000161>

Schumacher, L. (2025). ReCiPe. PRé Sustainability. <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/>

SEDUMA. (2017). *Localidad de Sisal*. LANRESC. <https://lanresc.mx/observatorios/sisal/>

SEMARNAT. (2025). *Situación en Sisal*. <https://www.gob.mx/semarnat/>

SETAC. (1993). *Guidelines for life cycle assessment*. <https://www.setac.org/resource/guidelines-lca-code-practice-1993.html>

SECTUR (2020). *Sisal, Yucatán*. <https://www.gob.mx/sectur/articulos/sisal-yucatan>

SECTUR. (2020). *Anuncia la Secretaría de Turismo once nuevos Pueblos Mágicos*. <https://www.gob.mx/sectur/prensa/anuncia-la-secretaria-de-turismo-once-nuevos-pueblos-magicos>

SECIHTI. (s.f.). UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. <https://ciencia.yucatan.gob.mx/unam-yucatan/>

Universidad Nacional Autónoma de México. (s. f.). *Operación, construcción y ampliación de la infraestructura de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI), campus Sisal: Manifiesto de impacto ambiental*. <https://drive.google.com/drive/folders/1YbFNIpFrQMqynEKT0i8Z7rrwtK8XLjSA>

Universitat Carlemany. (2024). ACV. <https://www.universitatcarlemany.com/>

Wiedmann, T. (2009). Carbon footprint IO. *Economic Systems Research*.

Anexo 1. Registro fotográfico de fauna en la Reserva Estatal El Palmar y alrededores de la Unidad Académica de Sisal

Este anexo documenta con fotografías, la fauna observada en la reserva estatal “El Palmar” y cerca de la Unidad Académica de Sisal. Las imágenes se tomaron durante recorridos de observación realizados en el área de estudio y sirven como apoyo visual para la caracterización ambiental del área de estudio.

Estas fotografías muestran la riqueza biológica del sitio y destacan la importancia de conservar estos ecosistemas, especialmente por la proximidad de la Unidad a la reserva natural.



Flamenco Americano



Pelicano Americano



Garza Tigre Mexicana



Cocodrilo de Pantano



Avoceta Americana



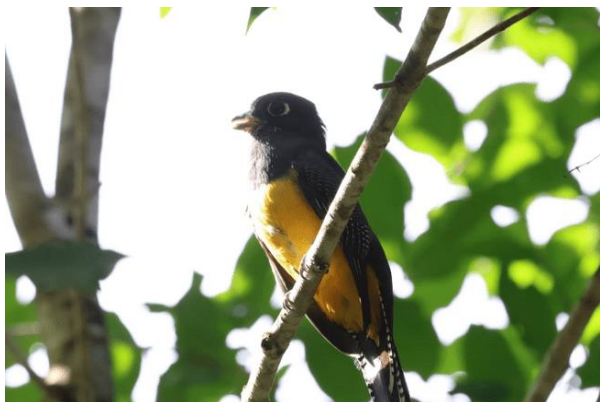
Colibrí Garganta Rubí



Espatula Rosada



Charrán de Sandwich



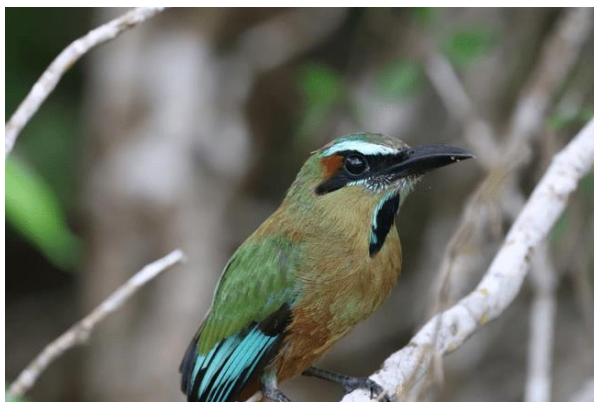
Coa Cabeza Negra



Garza Nocturna Corona Clara



Eufonia Garganta Negra Meosoamericana



Momoto Cejas Azules



Caracara Quebrantahuesos



Colibrí Tijereta Mexicano



Cigüeña Americana



Cormorán Neotropical



Anhinga Americana



Garza Tricolor



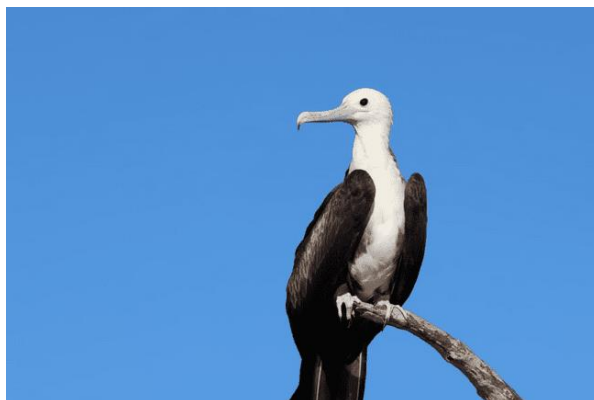
Chorlo Tildío



Garza Dedos Dorados



Golondrina Manglera



Fragata Tijereta



Carpintero Mexicano



Pelicano Café



Garza Rojiza



Garza Cucharón

Créditos fotográficos

Las fotografías incluidas en este anexo fueron tomadas por el Ing. Bruno Gael Pérez Méndez.