



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de ingeniería
Programa de maestría en ciencias de la ingeniería
Sistemas energéticos

**Análisis de la implementación de tecnología solar en un invernadero,
a través del análisis de ciclo de vida**

TESIS

Presentado en cumplimiento de los requisitos para obtener el grado de
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

Carmen Gabriela Ponce Salmerón

Número de cuenta: 1270187

DIRIGIDO POR:

Dra. María Dolores Durán García

COMITÉ TUTORIAL:

Dra. Liliana Ivette Ávila Córdoba

Dra. Cristina Salas Vargas

Toluca, México 2026

Resumen

El presente estudio evalúa el impacto ambiental y económico de implementar un sistema fotovoltaico en un invernadero tipo cenital destinado a la producción de tomate rojo en el Estado de México. Se comparan dos escenarios energéticos: el abastecimiento convencional a partir de la red eléctrica nacional y un escenario alternativo basado en un sistema fotovoltaico distribuido de 4.31 kWp. El análisis se desarrolla mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con enfoque atribucional, con un alcance de la cuna al uso y una unidad funcional definida como *1 tonelada de tomate producida bajo condiciones de invernadero*.

La evaluación ambiental se realiza mediante dos metodologías complementarias: el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) para el análisis multicategoría y el método del IPCC basado en el Potencial de Calentamiento Global a 100 años (GWP100) para la categoría de Cambio Climático. El análisis multicategoría incluye las categorías de agotamiento de combustibles fósiles, agotamiento de metales, agotamiento de recursos hídricos, acidificación terrestre, formación de partículas y toxicidad humana. En paralelo, el ACV económico considera los costos de inversión, operación, mantenimiento y reemplazo del sistema fotovoltaico durante su vida útil, con el fin de evaluar su viabilidad financiera.

Los resultados muestran que la integración del sistema fotovoltaico reduce de manera significativa las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad funcional, validando la hipótesis planteada. Asimismo, se observa una reducción relevante en las categorías asociadas a impactos operativos del suministro eléctrico convencional, junto con un desplazamiento de cargas ambientales hacia las etapas de producción del sistema fotovoltaico, coherente con la lógica del ACV. El análisis económico indica que la instalación del sistema fotovoltaico es viable bajo las condiciones evaluadas, presentando un periodo de recuperación atractivo.

En conjunto, los hallazgos confirman que la adopción de energía solar en invernaderos cenitales constituye una estrategia ambiental y económicamente sostenible, que permite disminuir impactos ambientales asociados al consumo eléctrico y mejorar la eficiencia energética en la producción hortícola.

Índice general

Capítulo 1:	Planteamiento del problema	4
1.1	Antecedentes	4
1.2	Justificación	10
1.3	Objetivos	11
1.4	Hipótesis	11
1.5	Alcances y limitaciones	12
Capítulo 2:	Marco teórico conceptual	15
2.1	Introducción a la sostenibilidad	15
2.1.1	Desarrollo sostenible	16
2.1.2	Indicadores de sostenibilidad	16
2.2	Sostenibilidad y energía en México	17
2.3	Las tecnologías fotovoltaicas y sus impactos ambientales	18
2.3.1	Tecnología fotovoltaica en el Estado de México	19
2.4	Invernaderos	20
2.4.1	Clasificación de invernaderos	21
2.4.2	Invernaderos fotovoltaicos: Implicaciones y perspectivas	22
2.5	Producción agrícola de tomate	22
2.5.1	Agricultura en el Estado de México	23
2.6	Análisis de ciclo de vida	25
2.6.1	Normas ISO que rigen el ACV	25
2.6.2	Metodología de ACV	26
2.6.3	Herramientas informáticas para estudios de ACV	34
2.7	El ACV y la energía fotovoltaica	34
2.8	Aplicaciones del ACV en el sector agrícola	35
Capítulo 3:	Marco metodológico	38
3.1	Visita a instalaciones agrícolas	39
3.2	Análisis de consumo y desempeño de los invernaderos	50
3.3	Datos de invernadero propuesto	55
3.4	Sistemas que componen el invernadero propuesto	57
a)	Distribución de plantas y consumo hídrico del invernadero propuesto	57
b)	Sistema de riego y recuperación de agua	64
c)	Sistema de control climático	66
d)	Sistemas de abastecimiento energético	68

3.5	Escenarios propuestos	71
3.6	Fundamento metodológico del ACV económico	72
Capítulo 4:	Análisis de ciclo de vida	74
4.1	Límites del sistema	75
4.2	Inventario de ciclo de vida	76
4.2.1	Justificación técnica y metodológica para la adaptación de escala de los flujos de la integración del sistema fotovoltaico de 4.31 kWp basado en uno de 3 kWp	78
4.2.2	Inventario adaptado	92
4.2.3	Transporte	94
4.3	Análisis económico del ciclo de vida	101
4.3.1	Determinación del costo de la electricidad de red (tarifa CFE)	101
4.3.2	Parámetros técnicos y económicos considerados	103
4.3.3	Desarrollo matemático del análisis económico	104
4.3.4	Beneficio económico por energía no comprada	112
4.3.5	Integración con el ACV	113
Capítulo 5:	Resultados por categoría de impacto y comparación de escenarios	116
5.1	Resultados por categoría de impacto obtenidos mediante el método IPCC 2021 GWP100	117
5.1.1	Potencial de calentamiento global	117
5.2	Resultados por categoría de impacto obtenidos mediante el método ReCiPe Midpoint (H) 2016	119
I	Acidificación terrestre	121
II	Toxicidad humana	124
III	Formación de partículas	127
IV	Agotamiento de recursos hídricos	131
V	Agotamiento de metales	134
VI	Agotamiento de combustibles fósiles	138
5.3	Resultados del análisis económico del ciclo de vida del sistema fotovoltaico propuesto	141
	Discusión y conclusiones	143
	Recomendaciones y trabajos futuros	146
	ANEXOS	148
	Anexo 1. Encuestas aplicadas a productores	148
	Anexo 2. Fichas técnicas de componentes que integran el sistema fotovoltaico	161
	Anexo 3. Análisis de categorías de impacto con relevancia secundaria	163
	Referencias	177

Índice de figuras

1.1	Red bibliométrica del ACV de SFV en invernaderos productores de tomate (Elaboración propia, 2023).	6
2.1	Clasificación de invernaderos [1]	21
2.2	Grafica porcentual de la producción de tomate en el Estado de México [2]	24
2.3	Estructura del análisis de ciclo de vida (Extraído desde la ISO 14040)	27
2.4	Ejemplo de unidad funcional y flujo de referencia (Elaboración propia)	28
2.5	Niveles para definir límites del sistema (Elaboración propia)	29
2.6	Elementos obligatorios para la EICV (Extraído de ISO 14044)	30
3.1	Diagrama para selección de instalaciones (Elaboración propia)	38
3.2	Fotografía del interior del invernadero en San Antonio Albarranes	40
3.3	Ilustración representativa de distancia de siembra en invernadero en San Antonio Albarranes (Elaboración propia)	41
3.4	Fotografía del interior del invernadero en San Miguel Caltepanitla	43
3.5	Ilustración representativa de distancia de siembra en invernadero en San Miguel Caltepanitla (Elaboración propia)	44
3.6	Fotografía de tinacos de almacenamiento para el fertirriego	45
3.7	Fotografía de la placa de identificación del soplador	45
3.8	Fotografía del programador de riego	46
3.9	Fotografía del exterior del invernadero en Amanalco De Becerra	48
3.10	Ilustración representativa de distancia de siembra en invernadero en Amanalco de Becerra	48
3.11	Fotografía de planta de tomates en Amanalco de Becerra	49
3.12	Análisis de consumo hídrico en invernaderos (Elaboración propia,2024)	53
3.13	Análisis de desempeño agrícola en invernaderos (Elaboración propia,2024)	54
3.14	Análisis de consumo energético en invernaderos (Elaboración propia,2024)	54
3.15	Gráfica porcentual del censo de cargas del invernadero (Elaboración propia,2024)	56
3.16	Ilustración representativa de distancia de siembra en invernadero propuesto	59
4.1	Límites del sistema (Elaboración propia, 2025)	75
5.1	Comparación de escenarios en contribución al potencial de calentamiento global	117
5.2	Scn-2 Contribución por fases y subcomponentes al potencial de calentamiento global (GWP100).	119
5.3	Comparación del potencial de acidificación terrestre entre Scn-1 y Scn-2 (Re-CiPe 2016 Midpoint (H)).	121

5.4	Contribución por fases y subcomponentes al potencial de acidificación terrestre en el Scn-2.	123
5.5	Comparación del impacto de toxicidad humana entre Scn-1 y Scn-2 (ReCiPe 2016 Midpoint (H)).	124
5.6	Contribución por fases y subcomponentes a la toxicidad humana en el Scn-2.	126
5.7	Comparación del potencial de formación de partículas entre Scn-1 y Scn-2 (ReCiPe 2016 Midpoint (H)).	128
5.8	Contribución por fases y subcomponentes a la formación de partículas en el Scn-2.	130
5.9	Comparación del agotamiento de recursos hídricos entre Scn-1 y Scn-2 (ReCiPe 2016 Midpoint (H)).	131
5.10	Contribución por fases y subcomponentes al agotamiento de recursos hídricos en el Scn-2.	133
5.11	Comparación del agotamiento de metales entre Scn-1 y Scn-2 (ReCiPe 2016 Midpoint (H)).	134
5.12	Contribución por fases y subcomponentes al agotamiento de metales en el Scn-2.	136
5.13	Comparación del agotamiento de combustibles fósiles entre Scn-1 y Scn-2 (ReCiPe 2016 Midpoint (H)).	138
5.14	Contribución por fases y subcomponentes al agotamiento de combustibles fósiles en el Scn-2.	140
5.15	Ficha técnica de módulo Canadian Solar	161
5.16	Ficha técnica de microinversor Enphase IQ8	162
5.17	Comparación de escenarios en contribución a la formación de oxidantes fotoquímicos.	163
5.18	Scn-2 Contribución por fases y subcomponentes a la formación de oxidantes fotoquímicos.	164
5.19	Comparación de escenarios en contribución a la eutrofización de agua dulce	166
5.20	Scn-2 Contribución por fases y subcomponentes a la eutrofización en agua dulce.	167
5.21	Comparación de escenarios en contribución a la ecotoxicidad de agua dulce	169
5.22	Scn-2 Contribución por fases y subcomponentes a la ecotoxicidad en agua dulce.	170
5.23	Comparación de escenarios en contribución a la ecotoxicidad terrestre	172
5.24	Scn-2 Contribución por fases y subcomponentes a la ecotoxicidad terrestre.	173
5.25	Comparación de escenarios en contribución a la ecotoxicidad marina	174
5.26	Scn-2 Contribución por fases y subcomponentes a la ecotoxicidad marina.	175

Índice de tablas

1.1	Estado del arte sobre integración de energía solar, agricultura protegida y ACV (Elaboración propia, 2023).	7
-----	---	---

2.1	Número de municipios productores a través de agricultura protegida en el Estado de México [2]	25
2.2	Categorías de impacto de alta relevancia seleccionadas según ReCiPe 2016 Midpoint (H).	32
2.3	Categorías de impacto relevantes secundarias seleccionadas según ReCiPe 2016 Midpoint (H).	33
2.4	Categorías de impacto seleccionadas <i>ReCiPe</i> (Elaboración propia, 2024) . . .	33
3.1	Síntesis de datos de invernadero en San Antonio Albarranes	42
3.2	Síntesis de datos de invernadero en San Miguel Caltepanitla	47
3.3	Síntesis de datos de invernadero en Amanalco de Becerra	50
3.4	Análisis de consumo y desempeño en San Antonio Albarranes	51
3.5	Análisis de consumo y desempeño en San Miguel Caltepanitla	52
3.6	Análisis de consumo y desempeño en Amanalco de Becerra	53
3.7	Censo de cargas de invernadero (Elaboración propia, 2024)	55
3.8	Características del invernadero	56
3.9	Resumen de distribución de plantas dentro del invernadero	58
3.10	Horarios de riego y fertirriego (Datos primarios proporcionados por el productor)	65
3.11	Lógica de control	67
3.12	Características del módulo fotovoltaico Canadian Solar 420 W	70
3.13	Características del inversor Enphase IQ8	71
4.1	Flujo del inversor (3kWp)	78
4.2	Escalamiento de microinversores por cantidad física	80
4.3	Variables y parámetros utilizados para la adaptación del flujo de microinversores	81
4.4	Entradas conocidas desde la tecnósfera para el escenario fotovoltaico.	82
4.5	Escalamiento de módulos fotovoltaicos por cantidad física	83
4.6	Variables y parámetros utilizados para la adaptación del flujo de módulos fotovoltaicos	85
4.7	Flujo del sistema de montaje fotovoltaico (3 kWp)	86
4.8	Escalamiento de sistema de montaje fotovoltaico por cantidad física	87
4.9	Variables y parámetros utilizados para la adaptación del flujo del sistema de montaje fotovoltaico	89
4.10	Flujo de instalación eléctrica del sistema fotovoltaico (3 kWp)	90
4.11	Escalamiento del flujo de instalación eléctrica del sistema fotovoltaico	91
4.12	Variables y parámetros utilizados para la adaptación del flujo de instalación eléctrica del sistema fotovoltaico	92
4.13	Inventario para instalación de 4.31 kWp	93
4.14	Resumen de tramos de transporte modelados en SimaPro (Corte por clasificación).	99
4.15	Estructura tarifaria CFE para riego agrícola en media tensión (RAMT, región Centro)	102
4.16	Parámetros técnicos y económicos considerados en el análisis	104
4.17	Costos del sistema fotovoltaico sin baterías	105
5.1	Potencial de calentamiento global/t de tomate	118

5.2	Acidificación terrestre por tonelada de tomate	121
5.3	Toxicidad humana por tonelada de tomate	125
5.4	Formación de partículas por tonelada de tomate	128
5.5	Agotamiento de recursos hídricos por tonelada de tomate	131
5.6	Agotamiento de metales por tonelada de tomate	135
5.7	Agotamiento de combustibles fósiles por tonelada de tomate	139
5.8	Indicadores económicos del sistema fotovoltaico autónomo	141
5.9	Horarios de riego y fertirriego (Datos primarios proporcionados por el productor)	153
5.10	Formación de oxidantes fotoquímicos/t de tomate	163
5.11	Eutrofización de agua dulce/t de tomate	166
5.12	Ecotoxicidad de agua dulce/t de tomate	169
5.13	Ecotoxicidad terrestre/t de tomate	172
5.14	Ecotoxicidad marina/t de tomate	174

Introducción

La agricultura protegida se ha consolidado como un componente estratégico para fortalecer la seguridad alimentaria, optimizar el uso de recursos y mejorar la eficiencia energética en la producción hortícola. En México, el uso de invernaderos ha experimentado un crecimiento sostenido; sin embargo, su operación depende de manera significativa del suministro eléctrico, particularmente para sistemas de ventilación, riego, control climático e infraestructura auxiliar. Esta dependencia energética implica costos operativos elevados y una contribución indirecta a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente cuando la electricidad proviene de fuentes convencionales de origen fósil.

En este contexto, la integración de sistemas fotovoltaicos (SFV) en invernaderos emerge como una alternativa tecnológica con potencial para reducir tanto las emisiones asociadas al consumo eléctrico como los costos de operación. No obstante, la evaluación de estos beneficios no puede limitarse únicamente a la fase de uso del sistema, sino que requiere un enfoque metodológico integral que considere las cargas ambientales y económicas incorporadas a lo largo del ciclo de vida de la tecnología implementada, así como los posibles desplazamientos de impacto hacia etapas previas del sistema productivo.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto ambiental y económico derivado de la implementación de un sistema fotovoltaico de 4.31 kWp en un invernadero tipo cenital destinado a la producción de tomate rojo en el Estado de México. La investigación se desarrolla mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con enfoque atribucional y un alcance de la cuna al uso, empleando como unidad funcional *1 tonelada de tomate producida en un invernadero cenital*. El sistema fotovoltaico evaluado incorpora módulos fotovoltaicos monocristalinos y microinversores, cuya modelación requirió una adaptación metodológica específica dentro del ACV, debido a la limitada disponibilidad de inventarios representativos para este tipo de configuración en bases de datos convencionales. Dicha adaptación se fundamenta en principios de equivalencia funcional y escalamiento de inventarios, garantizando la coherencia metodológica del estudio.

Para el análisis ambiental se emplean metodologías complementarias: el método ReCiPe 2016 Midpoint (H), que permite evaluar de manera detallada múltiples categorías de impacto ambiental (incluyendo cambio climático, agotamiento de recursos, acidificación, formación de partículas y toxicidad humana), y el método del IPCC basado en el Potencial de Calentamiento Global a 100 años (GWP100) para un análisis específico de las emisiones de GEI. De manera paralela, el ACV económico incorpora los costos de inversión, operación, mantenimiento y reemplazo del sistema fotovoltaico, lo que permite integrar una evaluación ambiental y económica coherente bajo un enfoque de sostenibilidad del ciclo de vida.

La hipótesis planteada en este trabajo establece que *es posible reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, expresadas en kg de CO₂ eq por unidad funcional, mediante la implementación de un sistema fotovoltaico en un invernadero tipo cenital*. Esta hipótesis se contrasta a través de la comparación entre un escenario convencional, abastecido por la red eléctrica nacional, y un escenario alternativo basado en generación fotovoltaica distribuida

en sitio, considerando explícitamente los impactos incorporados en la fabricación, instalación y transporte del sistema fotovoltaico.

El documento se estructura de la siguiente manera: el **Capítulo 1** presenta el planteamiento del problema, los antecedentes, la justificación del estudio, los objetivos, la hipótesis, así como los alcances y limitaciones de la investigación. El **Capítulo 2** desarrolla el marco teórico–conceptual, abordando los fundamentos de la sostenibilidad, la agricultura protegida, la tecnología fotovoltaica y los principios metodológicos del Análisis de Ciclo de Vida. El **Capítulo 3** describe el marco metodológico, incluyendo el análisis del invernadero real, el diseño del invernadero propuesto, los sistemas que lo integran y el fundamento del ACV económico. El **Capítulo 4** expone el desarrollo del ACV ambiental y económico, incluyendo los límites del sistema, el inventario de ciclo de vida, la adaptación metodológica del sistema fotovoltaico, el transporte y el desarrollo matemático del análisis económico. Finalmente, el **Capítulo 5** presenta los resultados por categoría de impacto obtenidos mediante los métodos IPCC 2021 y ReCiPe 2016 Midpoint (H), así como los resultados del análisis económico del ciclo de vida. La sección de **Discusión y Conclusiones** integra los hallazgos más relevantes, valida la hipótesis planteada y expone las implicaciones del estudio, junto con la sección **Recomendaciones y trabajos futuros** para investigaciones futuras.

En conjunto, la integración del ACV ambiental y económico proporciona una visión integral de la sostenibilidad asociada a la implementación de tecnología solar en la agricultura protegida, permitiendo no solo cuantificar la reducción de emisiones de GEI, sino también identificar desplazamientos de impacto, oportunidades de mejora en la cadena de suministro y criterios técnicos para la toma de decisiones orientadas a la eficiencia energética del sector hortícola mexicano.

Capítulo 1

Capítulo 1

Planteamiento del problema

El uso de energías renovables en la agricultura protegida se ha convertido en un tema de creciente interés debido a la necesidad de mejorar la eficiencia energética, reducir costos operativos y disminuir los impactos ambientales asociados a la producción de alimentos. Los invernaderos dedicados al cultivo de tomate rojo presentan una alta demanda energética derivada del control climático, ventilación, riego y otros procesos automatizados, lo que hace indispensable explorar alternativas tecnológicas sostenibles para su operación.

En este capítulo se presenta el planteamiento del problema que da origen al presente estudio. Para ello, se describen los antecedentes científicos y técnicos que contextualizan el uso de sistemas fotovoltaicos en invernaderos, se muestra la evidencia bibliométrica que refleja el estado actual de la investigación, y se expone la justificación que fundamenta la pertinencia de realizar una evaluación de ciclo de vida (ACV) aplicada a este sistema. Finalmente, se establecen los objetivos generales y específicos que guían el desarrollo del trabajo.

1.1. Antecedentes

La preocupación internacional por el deterioro ambiental comenzó a consolidarse a finales del siglo XX, a partir de las primeras conferencias de Naciones Unidas sobre medio ambiente y desarrollo. La Conferencia de Estocolmo (1972) y la creación de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo marcaron un punto de inflexión al posicionar el vínculo entre crecimiento económico y degradación ambiental en la agenda política global [3, 4]. Posteriormente, el Informe Brundtland “*Nuestro Futuro Común*” (1987) definió el concepto de desarrollo sostenible sobre tres pilares *económico, ambiental y social* [5], que fueron retomados y ampliados en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro (1992) [6].

Sobre esta base se formuló la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada en 2015 por los 193 Estados miembros de la ONU [7]. La Agenda establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que buscan, entre otros propósitos, erradicar la pobreza, proteger el planeta

y garantizar prosperidad para las generaciones presentes y futuras. Entre ellos, destacan los objetivos relacionados con la energía asequible y no contaminante, la producción y consumo responsables y la acción por el clima, directamente vinculados a los sistemas energéticos y agroalimentarios. No obstante, los informes de seguimiento evidencian que el avance no es suficiente y han motivado un llamado a una “década de acción” para acelerar la implementación de los ODS [8], reforzando la necesidad de transformar tanto la matriz energética como los modelos de producción agrícola.

En este contexto, la producción agrícola bajo condiciones controladas ha adquirido un papel estratégico en México debido a la creciente demanda de tomate rojo, uno de los cultivos hortícolas de mayor valor comercial y volumen de exportación en el país [1,9]. Los invernaderos han permitido incrementar la productividad y reducir la variabilidad asociada a las condiciones climáticas; sin embargo, esta modalidad implica un uso intensivo de energía para la operación de sistemas de ventilación, bombeo, control térmico, iluminación y automatización, lo que incrementa tanto los costos operativos como la huella ambiental de la producción [10,11]. Estas cargas energéticas dependen en gran medida del suministro eléctrico convencional, cuyo mix nacional aún se basa de forma significativa en combustibles fósiles [12,13], lo que refuerza la urgencia de explorar alternativas más sostenibles para el abastecimiento energético de invernaderos.

Diversas investigaciones han señalado que la integración de tecnologías solares en instalaciones agrícolas constituye una vía prometedora para reducir la dependencia de la red eléctrica, mejorar la resiliencia ante fluctuaciones de precios y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de alimentos. Experiencias en países como China, España, Italia y Chile muestran que los sistemas fotovoltaicos (SFV) aplicados a invernaderos o sistemas agrovoltaicos pueden reducir los costos de electricidad y optimizar el uso del suelo, al combinar producción agrícola y generación de energía en un mismo espacio [14–16]. No obstante, la adopción de estas soluciones en México sigue siendo limitada debido, entre otros factores, a barreras de financiamiento, ausencia de normativas específicas para sistemas híbridos agrícola–energéticos y escasez de información local sobre consumos energéticos reales, condiciones climáticas particulares y potencial solar aplicable a sistemas protegidos [17,18].

En paralelo, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se ha consolidado como una herramienta robusta para evaluar los impactos ambientales de sistemas tecnológicos desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, conforme a las normas ISO 14040–14044 [19,20]. En el ámbito energético, existen numerosos estudios dedicados al ACV de sistemas fotovoltaicos, que han generado inventarios y factores de impacto específicos para distintas tecnologías y configuraciones [21,22]. Asimismo, en agricultura protegida se han evaluado impactos ambientales de distintos cultivos y tecnologías de producción. Incluso se han desarrollado declaraciones ambientales de producto para cultivos hortícolas en invernadero, demostrando que la trazabilidad de impactos a lo largo del ciclo de vida permite identificar etapas críticas y oportunidades de mejora [23]. Sin embargo, la integración de ambas áreas —evaluar mediante ACV la incorporación de SFV en invernaderos— continúa siendo escasa, y prácticamente inexistente cuando se trata de invernaderos dedicados al cultivo de tomate rojo en México [11,16]. Esta carencia limita la capacidad de identificar compromisos ambientales,

optimizar el diseño tecnológico y apoyar la toma de decisiones basada en evidencia científica.

Con el fin de dimensionar la magnitud de esta brecha, se realizó un análisis bibliométrico de la producción científica registrada en SCOPUS sobre ACV, energía fotovoltaica e invernaderos. Esta exploración permitió visualizar las relaciones entre los temas clave del estudio y evidenciar la dispersión del conocimiento disponible.

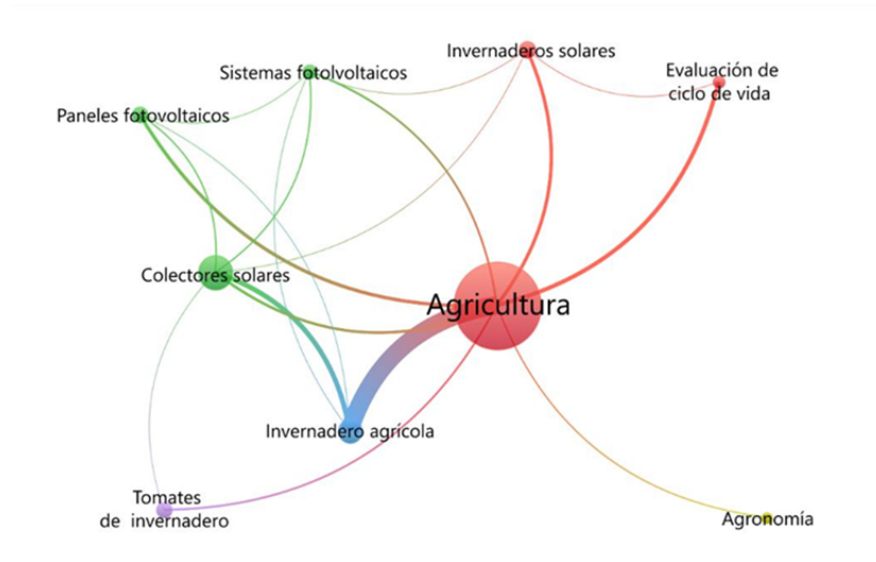


Figura 1.1: Red bibliométrica del ACV de SFV en invernaderos productores de tomate (Elaboración propia, 2023).

La Figura 1.1 muestra que, aunque existe un número creciente de estudios relacionados con energía solar, sostenibilidad y agricultura protegida, la conexión específica entre ACV e invernaderos con integración fotovoltaica es aún tenue, y prácticamente nula en el caso particular del cultivo de tomate rojo. Esta visualización confirma que la incorporación de SFV en invernaderos bajo un enfoque de ciclo de vida constituye una línea de investigación emergente con vacíos científicos relevantes.

Para profundizar en la caracterización del conocimiento existente, se llevó a cabo una revisión detallada del estado del arte en torno a la integración de sistemas fotovoltaicos, la producción agrícola en invernaderos y la aplicación del ACV. Los trabajos recopilados permiten identificar las aproximaciones metodológicas más utilizadas, los avances recientes en agrovoltaica y las principales limitaciones en la evaluación ambiental de estos sistemas.

Tabla 1.1: Estado del arte sobre integración de energía solar, agricultura protegida y ACV (Elaboración propia, 2023).

Título	Autores	Año	Objetivo del estudio	Metodología	Resultados clave	Conclusiones
Environmental Product Declaration of tomato	Thrace Greenhouses S.A.	2022	Desarrollar una declaración ambiental de producto para tomates cultivados en invernaderos.	ACV para evaluar los impactos ambientales de la producción de tomate.	Se identifican los impactos clave en cada etapa de producción.	La declaración ambiental ayuda a comprender y mitigar los impactos ambientales en la producción de tomates.
Agrovoltaica. La simbiosis de la generación fotovoltaica y la agricultura	Gutiérrez, L.	2022	Explorar la integración de la generación fotovoltaica con la agricultura.	Revisión de literatura y estudios de caso sobre sistemas agrovoltaicos.	Los sistemas agrovoltaicos pueden mejorar la eficiencia energética y la productividad agrícola.	La combinación de generación fotovoltaica y agricultura es una solución sostenible y potencialmente rentable.
Comparative life cycle cost analysis of various solar energy-based integrated systems for self-sufficient greenhouses	Sajid, M.	2021	Analizar el costo del ciclo de vida de sistemas integrados de energía solar para invernaderos autosuficientes.	Evaluación comparativa de costos de ciclo de vida (LCCA) para diferentes configuraciones solares.	Los sistemas solares integrados pueden reducir significativamente los costos operativos.	Los invernaderos autosuficientes basados en energía solar son económicamente viables y sostenibles.
Electricidad generada en planta fotovoltaica El Romero Solar 196 MW	ACCIONA®	2021	Describir la generación de electricidad en la planta fotovoltaica El Romero Solar.	Análisis técnico de capacidad de generación y rendimiento de la planta.	La planta de 196 MW genera una cantidad significativa de electricidad renovable.	La generación fotovoltaica a gran escala contribuye a la reducción de emisiones de carbono.

Tabla 1.1: continuación

Título	Autores	Año	Objetivo del estudio	Metodología	Resultados clave	Conclusiones
Smart farming for improving agricultural management	Mohamed, E.	2021	Mejorar la gestión agrícola mediante agricultura inteligente.	Implementación de sensores y análisis de datos para optimizar la gestión.	La agricultura inteligente incrementa la eficiencia y productividad.	La adopción de tecnologías inteligentes es clave para modernizar la gestión agrícola.
A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses	Gorjian, S.	2021	Revisar oportunidades para implementar tecnologías solares en invernaderos.	Revisión de literatura sobre aplicaciones y beneficios de tecnologías solares.	Se identifican múltiples oportunidades de mejora en sostenibilidad y eficiencia.	La integración de tecnologías solares en invernaderos ofrece beneficios ambientales y económicos.
Generación energética de sistemas agrovoltaicos bifaciales en el valle de Lluta	Clandestino, F.	2020	Evaluar la generación de energía de sistemas agrovoltaicos bifaciales.	Análisis de rendimiento energético en condiciones locales.	Los sistemas bifaciales muestran alta eficiencia y buen aprovechamiento del suelo.	Los sistemas agrovoltaicos bifaciales son una opción viable para aumentar la generación de energía en zonas agrícolas.
Energy life cycle assessment on applying solar technologies for greenhouse strawberry production	Hosseini, F.	2019	Evaluar el ciclo de vida energético de tecnologías solares en invernaderos de fresa.	ACV energético de la producción de fresas con tecnologías solares.	Se reduce de forma significativa el consumo energético y las emisiones de carbono.	Las tecnologías solares mejoran la sostenibilidad energética de la producción en invernadero.
Planeación agrícola nacional	SAGARPA	2017–2030	Desarrollar un plan nacional de agricultura.	Evaluación de políticas y estrategias agrícolas de largo plazo.	Se identifican directrices para la sostenibilidad y el crecimiento del sector.	La planeación de largo plazo puede mejorar eficiencia y productividad agrícola en México.

Tabla 1.1: continuación

Título	Autores	Año	Objetivo del estudio	Metodología	Resultados clave	Conclusiones
Integration of solar technology to modern greenhouse in China: Current status, challenges and prospect	Wang, T.	2016	Examinar la integración de tecnología solar en invernaderos modernos en China.	Estudios de caso y revisión de experiencias de integración solar en invernaderos.	La integración solar presenta desafíos técnicos y económicos, pero también oportunidades significativas.	La adopción de tecnologías solares en invernaderos puede ser un motor clave para la sostenibilidad agrícola.

La Tabla 1.1 sintetiza las investigaciones más relevantes relacionadas con agricultura protegida, integración de energía solar y evaluación ambiental y económica. En conjunto, los estudios revisados coinciden en que la incorporación de tecnologías solares en invernaderos puede reducir costos energéticos y huella de carbono, y mejorar la competitividad del sector agrícola. Sin embargo, también ponen de manifiesto la ausencia de trabajos que integren simultáneamente agricultura protegida, energía fotovoltaica y ACV en el contexto específico del cultivo de tomate rojo en México. Esta brecha metodológica respalda la pertinencia de desarrollar una evaluación de ciclo de vida aplicada a un invernadero fotovoltaico en el Estado de México, como se plantea en la presente investigación.

1.2. Justificación

La incorporación de sistemas fotovoltaicos (SFV) en invernaderos representa una oportunidad estratégica para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental del sector agrícola mexicano. Dado que los invernaderos destinados al cultivo de tomate rojo presentan una demanda energética elevada y constante, sustituir parcial o totalmente la electricidad proveniente de fuentes fósiles por energía solar permite reducir costos operativos, disminuir emisiones y fortalecer la resiliencia de los sistemas productivos frente a fluctuaciones de precios y disponibilidad energética [14, 16].

Sin embargo, pese al potencial de estas tecnologías, su adopción sigue siendo limitada en México debido a la falta de información técnica y ambiental que permita dimensionar sus impactos a lo largo de todo el ciclo de vida. En este contexto, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se presenta como una herramienta fundamental para evaluar de manera integral los efectos ambientales asociados desde la producción de componentes fotovoltaicos hasta la operación y el fin de vida del sistema, en concordancia con las normas ISO 14040–14044 [19, 20, 24]. Esta metodología ha demostrado ser eficaz para identificar etapas críticas, cuantificar impactos y orientar decisiones tecnológicas con base en evidencia científica.

Aplicar un ACV a un invernadero productor de tomate en el Estado de México con integración solar es particularmente relevante por tres razones principales. Primero, permite evaluar si la sustitución de electricidad convencional por energía fotovoltaica realmente reduce la huella ambiental en condiciones climáticas y operativas locales, considerando que los impactos de los SFV dependen del contexto donde se instalan [21]. Segundo, proporciona información crítica para mejorar la eficiencia energética del sistema, optimizar el diseño de la instalación fotovoltaica y orientar inversiones hacia tecnologías con mejor desempeño ambiental y económico [17, 25]. Tercero, contribuye a cerrar la brecha de conocimiento identificada en los antecedentes, donde se observó la ausencia de estudios que integren agricultura protegida, energía solar y ACV en un mismo marco analítico.

Desde una perspectiva ambiental y social, esta evaluación es necesaria porque los invernaderos constituyen una alternativa de producción intensiva cuyo crecimiento debe alinearse con criterios de sostenibilidad. La integración de sistemas renovables no solo favorece la mitigación

del cambio climático mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también promueve el uso responsable de recursos no renovables y la transición hacia un modelo agrícola menos dependiente de combustibles fósiles [26]. A nivel económico, el uso de energía fotovoltaica puede traducirse en menores costos operativos y en una mayor competitividad para los productores frente a mercados que demandan productos con menor huella ambiental.

Finalmente, la realización de esta investigación permitirá generar información técnica, ambiental y metodológica que actualmente no existe para el contexto mexicano. Este conocimiento es indispensable para diseñar estrategias energéticas sostenibles en agricultura protegida, apoyar la toma de decisiones de productores y organismos gubernamentales, y fomentar la adopción de tecnologías fotovoltaicas respaldadas por evaluaciones rigurosas de ciclo de vida. En suma, el estudio no solo cubre un vacío científico, sino que ofrece herramientas prácticas para avanzar hacia sistemas agrícolas más eficientes, resilientes y ambientalmente responsables.

1.3. Objetivos

Objetivo general

Evaluar la integración de tecnología solar en un invernadero a través del ACV para la determinación de la huella ambiental y, en consecuencia, la sostenibilidad del sistema, considerando las etapas desde la instalación hasta la cosecha (de la cuna al uso).

Objetivos particulares

- Generar el inventario de ciclo de vida para un invernadero solar de tomate rojo en el estado de México.
- Diseñar el sistema fotovoltaico para las opciones energéticas del invernadero.
- Evaluar las principales categorías de impacto ¹ ocasionadas por la implementación de sistemas fotovoltaicos en invernaderos a través de la metodología de análisis de ciclo de vida.

1.4. Hipótesis

Es posible reducir las emisiones de GEI en kg de CO₂ eq en un invernadero tipo de tomate rojo mediante la implementación de SFV para generación de energía eléctrica.

¹Las categorías de impacto consideradas son: Acidificación terrestre, Agotamiento de combustibles fósiles, Agotamiento de metales, Agotamiento de recursos hídricos, Formación de partículas, Toxicidad para humanos y potencial de calentamiento global.

1.5. Alcances y limitaciones

Alcances

- El ACV ambiental se desarrollará bajo un enfoque de “la cuna al uso”, considerando las etapas desde la extracción de materias primas, manufactura, transporte, instalación y operación del sistema fotovoltaico, así como el consumo energético asociado al funcionamiento del invernadero. No se incluye la etapa de fin de vida debido a la falta de datos específicos en el contexto regional, aunque se reconoce su relevancia potencial.
- El estudio incluye la elaboración de un inventario detallado de ciclo de vida (LCI) para la tecnología solar utilizada en el invernadero agrícola, empleando fuentes primarias y secundarias, así como datos provenientes de Ecoinvent y bases de datos especializadas.
- Además del ACV ambiental, se llevará a cabo un análisis económico de la implementación del sistema fotovoltaico, considerando indicadores como el costo nivelado de energía (LCOE), el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR). Este análisis permitirá complementar los resultados ambientales con una evaluación financiera de la viabilidad del sistema.
- El estudio se limita al análisis energético requerido para el óptimo funcionamiento de un invernadero tipo dedicado al cultivo de tomate, evaluando exclusivamente los flujos energéticos relacionados con ventilación, riego, control climático y otros consumos eléctricos relevantes.

Limitaciones

- Se excluyen del ACV ambiental los insumos agrícolas asociados a la producción del tomate tales como fertilizantes, pesticidas, sustratos y actividades de manejo agronómico, ya que el objetivo del estudio se centra en la evaluación de la contribución energética y su sustitución mediante tecnología fotovoltaica.
- No se desarrollará un ACV social. Aunque esta dimensión es parte del enfoque de sostenibilidad, la falta de indicadores cuantificables y de metodologías socialmente validadas para el contexto agrícola local impide su incorporación en esta investigación. La evaluación social requeriría datos primarios sobre condiciones laborales, percepción comunitaria y distribución de beneficios, los cuales no forman parte del alcance del presente trabajo.
- Los resultados del análisis económico no incluyen externalidades ambientales monetizadas ni costos sociales asociados al cambio tecnológico, limitando la interpretación financiera exclusivamente a parámetros técnicos y energéticos.

- El desempeño del sistema fotovoltaico se modela bajo condiciones climáticas y radiográficas promedio del Estado de México; variaciones estacionales o anomalías climáticas pueden modificar los resultados operativos reales.

Capítulo 2

Capítulo 2

Marco teórico conceptual

Este capítulo presenta los fundamentos conceptuales que sustentan el análisis realizado en este estudio. En primer lugar, se abordan los principios de la sostenibilidad y los indicadores clave utilizados para evaluar el desempeño ambiental, energético y productivo en sistemas agrícolas. Posteriormente, se revisan los elementos teóricos relacionados con la generación de energía mediante sistemas fotovoltaicos y su integración a procesos agroproductivos. Finalmente, se introduce el enfoque de ACV como herramienta metodológica para evaluar los impactos ambientales asociados con cada etapa del sistema energético y agrícola considerado. En conjunto, estos conceptos permiten establecer las bases necesarias para comprender y contextualizar la evaluación de la integración de tecnología fotovoltaica en invernaderos de tomate.

2.1. Introducción a la sostenibilidad

En el contexto actual de creciente conciencia ambiental y la necesidad imperante de adoptar prácticas sostenibles, la sostenibilidad entendida como la capacidad de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las de las generaciones futuras, se convierte en el eje central de este estudio [27].

La integración de tecnología solar en la agricultura, particularmente en invernaderos, busca mejorar la eficiencia de los procesos productivos al mismo tiempo que reduce la huella ambiental asociada a la generación y consumo de energía. Este enfoque se alinea con las tendencias actuales de sostenibilidad, que promueven prácticas agrícolas capaces de disminuir las emisiones, optimizar el uso de los recursos y contribuir a la mitigación del cambio climático [28]. Así, en este apartado se presentan las bases teóricas que permiten comprender los principios de sostenibilidad, la generación fotovoltaica y su aplicación en sistemas agroproductivos, los cuales sustentan el análisis desarrollado en este estudio.

2.1.1. Desarrollo sostenible

Desde la Revolución Industrial, el paradigma económico que ha guiado la interacción entre el ser humano y la biosfera ha comenzado a mostrar signos de deterioro en décadas recientes. Estos desajustes evidencian poca congruencia entre los sistemas ecológico y socioeconómico, los cuales operan de manera descoordinada tanto en el tiempo como en el espacio. En los años ochenta surgió el concepto de Desarrollo Sostenible como un esfuerzo por restablecer las relaciones entre el ser humano y el entorno natural. Desde entonces, esta noción ha logrado articular perspectivas diversas gracias a su carácter integrador, consolidándose como un eje central en múltiples ámbitos políticos y de acción [29].

El concepto de desarrollo sostenible ha estado presente a lo largo de la historia de la humanidad, donde las necesidades básicas del ser humano se satisfacían utilizando los recursos naturales disponibles. Con una población humana relativamente pequeña hasta el siglo XVIII, los ecosistemas tenían la capacidad de recuperarse de las intervenciones humanas. El desarrollo sostenible se define como un proceso evaluado mediante criterios e indicadores ambientales, económicos y sociales, para mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas. Este enfoque se basa en la preservación del equilibrio ecológico, la protección del ambiente y el uso sostenible de los recursos naturales, asegurando así que las necesidades de las generaciones futuras no se vean comprometidas [30].

El término “sostenible” se originó en las ciencias biológicas, donde la evaluación de la conservación o agotamiento de un recurso se realiza considerando los patrones y características naturales del mismo. Aunque el concepto de desarrollo sostenible se relaciona con la sostenibilidad socioeconómica, fue formalizado por primera vez en el Informe Brundtland (1987), también conocido como “Nuestro Futuro Común”, elaborado por la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, establecida en 1983 [31].

2.1.2. Indicadores de sostenibilidad

La evaluación de sostenibilidad realizada en este estudio se fundamenta en indicadores alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y con las categorías de impacto derivadas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). De acuerdo con ISO 14040 y 14044 [19, 20], los indicadores deben ser coherentes con el objetivo y alcance del estudio; por ello, se priorizaron métricas cuantificables y directamente relacionadas con los efectos ambientales y energéticos de integrar un sistema fotovoltaico en un invernadero.

En el presente análisis, los ODS pertinentes son: **ODS 7** (Energía asequible y no contaminante), **ODS 12** (Producción y consumo responsables) y **ODS 13** (Acción por el clima), siguiendo lo establecido por Naciones Unidas [32]. Estos objetivos guiaron la selección de los siguientes indicadores ambientales, energéticos y económicos.

Indicadores ambientales

1.Cambio climático (kg CO₂ eq): Indicador central en sistemas energéticos y directamente relacionado con el ODS 13. Permite evaluar la contribución del sistema al calentamiento global [33].

2.Formación de material particulado y formación de oxidantes fotoquímicos: Categorías relevantes para la salud humana y la calidad del aire en procesos energéticos [33,34].

3.Acidificación terrestre: Importante para evaluar efectos sobre ecosistemas y suelos agrícolas, vinculada con el ODS 15 [33].

4.Ecotoxicidad terrestre y marina: Incluidas como categorías secundarias debido a su relevancia ambiental y presencia en cadenas de suministro de tecnologías energéticas [35].

5.Agotamiento de recursos minerales y fósiles: Indicadores clave para evaluar presión sobre materiales críticos utilizados en módulos y microinversores fotovoltaicos, alineados con el ODS 12 [21, 26].

Indicadores energéticos

Intensidad energética y eficiencia del sistema fotovoltaico: Métricas esenciales para el ODS 7, utilizadas para cuantificar la contribución del sistema FV a la reducción del consumo eléctrico del invernadero [22].

Indicadores económicos

LCOE, Valor Actual Neto (VAN) y TIRM: Indicadores económicos ampliamente utilizados en sistemas fotovoltaicos para evaluar viabilidad y sostenibilidad financiera [13, 36].

El conjunto de estos indicadores permite evaluar de manera integral el desempeño ambiental, energético y económico de la implementación fotovoltaica en el invernadero, en consistencia con los ODS priorizados y con las categorías de impacto definidas en el ACV. Aspectos productivos y toxicidad por agroquímicos no fueron incluidos, ya que el objetivo del estudio es aislar los efectos ambientales asociados exclusivamente a la tecnología fotovoltaica.

2.2. Sostenibilidad y energía en México

La sostenibilidad y la energía en México han sido temas de creciente importancia en los últimos años. La transición energética justa y sustentable es un objetivo clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y asegurar la independencia energética del país. El Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático ha definido cuatro ejes de trabajo fundamentales para lograr esta transición: movilidad, uso eficiente y energía verde para la industria, sistemas energéticos rurales sustentables, y democratización de la energía y generación de energía distribuida comunitaria.

Para lograr esta transición, México debe enfocarse en el desarrollo de energías renovables. Según la Secretaría de Energía, la participación de las renovables en la generación de energía eléctrica ha aumentado significativamente, pasando de 29 % en 2002 a un porcentaje en constante aumento en años recientes. Sin embargo, la tendencia a la baja en la participación de las renovables en la matriz energética es un tema de preocupación. El país cuenta con un gran potencial para el aprovechamiento de energía solar, eólica y geotérmica; sin embargo, para que estas fuentes se consoliden dentro de la matriz energética nacional, es necesario fomentar la inversión privada que permita ampliar la infraestructura, impulsar proyectos de generación y acelerar la transición hacia un sistema energético más sostenible [37].

La seguridad energética es otro tema de gran importancia en México. El país ha invertido significativamente en la producción de energía hidroeléctrica, pero el alto costo de construcción y mantenimiento de las presas ha limitado su expansión. Además, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Pemex se encuentran entre los principales emisores de gases de efecto invernadero del país. Para cumplir con los compromisos voluntarios establecidos en sus Contribuciones Nacionales Determinadas Previstas (INDC), México debe promover la incorporación de energías renovables y reducir su dependencia de los hidrocarburos [38].

Las INDC son los compromisos climáticos que cada país presentó ante la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) para reducir sus emisiones y fortalecer la transición energética.

Según el Inventario Nacional de Energía Renovable [39], las energías con mayor potencial en México son la solar y la eólica. Las políticas públicas, la reducción de costos y los avances tecnológicos son factores clave para su implementación. El cambio climático, que tiene un impacto significativo en el país, se manifiesta en el aumento de la frecuencia y severidad de eventos catastróficos como huracanes y sequías. Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es crucial para mitigar estos efectos. Una transición energética justa y sustentable es esencial para lograr esta reducción y promover un desarrollo sostenible [40].

2.3. Las tecnologías fotovoltaicas y sus impactos ambientales

La energía fotovoltaica es una tecnología limpia y renovable que convierte la luz del sol en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Esta tecnología ha experimentado un rápido crecimiento en las últimas décadas debido a sus numerosas ventajas ambientales. En primer lugar, no emite gases de efecto invernadero ni sustancias tóxicas durante su funcionamiento, por lo que no contribuye al calentamiento global ni contamina el aire. Esto ayuda a reducir la huella de carbono y las enfermedades respiratorias asociadas a la contaminación. Además, es una fuente de energía inagotable y gratuita que no se agota, a diferencia de los combustibles fósiles. Los paneles solares pueden funcionar de manera limpia durante 25 a 30 años, reduciendo el uso de minerales y la necesidad de excavaciones intensivas para obtener combustibles fósiles. La energía fotovoltaica también permite la generación de energía

de manera descentralizada, cerca de los puntos de consumo, reduciendo las pérdidas en el transporte. Asimismo, contribuye a la diversificación de la matriz energética, disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles [41].

Pero la implementación de la energía fotovoltaica, especialmente en grandes plantas solares, también puede generar impactos negativos. La construcción de estas plantas puede alterar el ecosistema local y afectar a la flora y fauna, modificando hábitats y paisajes [42]. Aunque en menor medida que otras tecnologías, la limpieza de los paneles solares requiere el uso de agua. Al final de su vida útil, los paneles solares deben ser reciclados o dispuestos adecuadamente para evitar la contaminación. Dependiendo de la ubicación, las plantas solares pueden generar un impacto visual en el paisaje.

Es importante evaluar cuidadosamente los efectos y tomar medidas para mitigarlos, como la selección adecuada de los sitios de instalación, la implementación de prácticas de reciclaje y la integración de las plantas solares en el paisaje. Además, es fundamental considerar la eficiencia energética de las plantas solares y la optimización de su diseño para maximizar la generación de energía [43].

La energía fotovoltaica es una tecnología con un gran potencial para contribuir a la transición hacia un futuro energético más sostenible, siempre que se gestionen adecuadamente sus impactos ambientales. Su implementación puede ser un paso importante hacia una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero y una disminución del consumo de combustibles fósiles.

2.3.1. Tecnología fotovoltaica en el Estado de México

La tecnología fotovoltaica ha sido un pilar fundamental en el desarrollo energético reciente del país. En México, la energía solar se ha posicionado como una alternativa estratégica para fortalecer la competitividad industrial y ampliar las opciones de suministro energético en los hogares. En la primera subasta eléctrica de largo plazo realizada en marzo de 2016, la energía fotovoltaica representó el 75 % de los proyectos adjudicados y multiplicó por 35 la capacidad instalada nacional [44].

Asimismo, se estimó que las nuevas plantas de generación fotovoltaica derivadas de esta subasta generarían alrededor de 9,200 empleos directos e indirectos, impulsando el desarrollo local y nacional [45]. Adicionalmente, la incorporación de 1,500 MW solares permitiría reducir aproximadamente 2.0 tCO₂ anuales, contribuyendo a los objetivos nacionales de mitigación [46].

En el Estado de México se han instalado 639 sistemas fotovoltaicos que incluyen panel solar, batería, inversor y accesorios de instalación. Estas acciones se han concentrado en los municipios de Almoloya de Alquisiras, Sultepec, Luvianos, Ixtapan de la Sal, Tonatico, Almoloya de Juárez y Tenango del Aire, beneficiando directamente a 639 familias y a más de 3,500 habitantes, y generando 142.84 MWh de energía limpia [47] [48].

Además, la empresa IUSASOL, con sede en el Estado de México, ha desarrollado el parque fotovoltaico en el municipio de Jocotitlán, cuya primera fase alcanzó una capacidad instalada de aproximadamente 21 MW en 2016 [49]. Este proyecto fue parte de un plan más amplio con ambición de alcanzar hasta 400 MW en fases futuras [50]. Los sistemas instalados aprovechan paneles solares que convierten la radiación solar en electricidad mediante células fotovoltaicas, las cuales alimentan inversores encargados de transformar dicha energía en corriente alterna utilizable.

La tecnología fotovoltaica en el Estado de México ha sido un impulso significativo para el desarrollo de la energía renovable y la sostenibilidad. La instalación de SFV ha mejorado la rentabilidad de las unidades de producción rural, reducido las emisiones de gases de efecto invernadero y los empleos generados.

2.4. Invernaderos

Los invernaderos son estructuras cerradas, cubiertas con materiales transparentes como vidrio o plástico, que permiten controlar las condiciones ambientales para el cultivo de plantas [51]. Estas estructuras aíslan a las plantas del exterior, protegiéndolas de factores climáticos adversos, plagas y enfermedades [52].

Una de las principales ventajas de utilizar invernaderos en la agricultura es la intensificación de la producción. Al controlar factores como temperatura, humedad y luz, se puede maximizar el rendimiento de los cultivos. Además, los invernaderos permiten cultivar durante todo el año, ajustando las condiciones climáticas a las necesidades de cada especie, lo que se traduce en una mejora de la calidad y apariencia de los productos [52].

Otra ventaja significativa es la protección contra plagas y enfermedades. El ambiente controlado de los invernaderos reduce la incidencia de estos problemas en los cultivos, lo que se traduce en una menor necesidad de aplicar tratamientos fitosanitarios [52].

Sin embargo, la implementación de invernaderos también presenta algunas desventajas. La alta inversión inicial requerida para su construcción y equipamiento hace que solo se justifique económicamente para cultivos de alto valor. Además, las condiciones de alta humedad y temperatura pueden favorecer el desarrollo de patógenos en los cultivos, por lo que es necesario un manejo adecuado para minimizar este riesgo [51].

Los invernaderos requieren un mayor consumo de recursos, como agua y energía, para mantener las condiciones para desarrollar los cultivos, pero, pese a ello, son una herramienta valiosa para la producción agrícola intensiva. Sin embargo, su implementación debe considerar beneficios y desventajas para maximizar su eficiencia y rentabilidad [51].

2.4.1. Clasificación de invernaderos

En este apartado se abordan distintas categorías que permiten comprender la diversidad de estructuras utilizadas en la agricultura protegida. Desde invernaderos convencionales hasta sistemas especializados, esta clasificación se enfoca en aspectos como tamaño, forma, materiales de construcción y tecnologías empleadas. Al explorar detalladamente cada tipo de invernadero, se revelan las particularidades que influyen en su eficiencia, adaptabilidad a diferentes cultivos y condiciones climáticas, así como en su impacto ambiental. Este análisis proporciona una visión integral de las opciones disponibles para la producción agrícola, destacando la importancia de seleccionar el tipo de invernadero más adecuado según sus necesidades y objetivos específicos.

Los invernaderos se clasifican de diversas formas según diferentes criterios, algunas de las formas de clasificación son las siguientes:

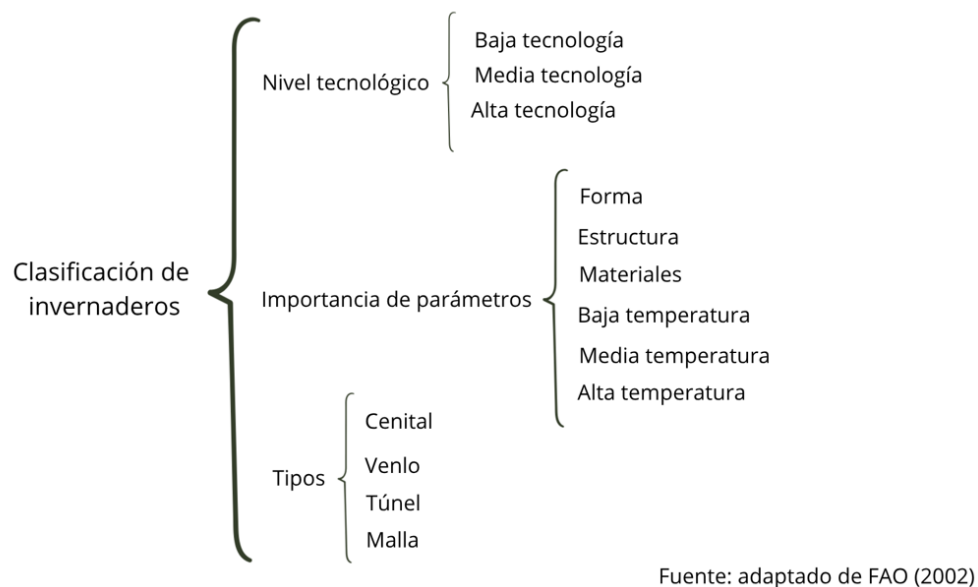


Figura 2.1: Clasificación de invernaderos [1]

El presente trabajo corresponde a un modelo cenital de tecnología media, ampliamente utilizado en la horticultura protegida del centro de México. Este tipo de estructura se caracteriza por su techo a dos aguas con cumbreras elevadas, lo que favorece una mayor ventilación natural, mejor control térmico y una mayor entrada de luz difusa. El recinto cuenta con una superficie total de 2 400 m², estructura de acero galvanizado, cubierta plástica de polietileno y ventanas cenitales, además de un sistema de riego por goteo y manejo climático básico. Estas características lo hacen adecuado para cultivos como el tomate, con requerimientos energéticos moderados.

2.4.2. Invernaderos fotovoltaicos: Implicaciones y perspectivas

En la búsqueda de soluciones innovadoras para enfrentar los desafíos climáticos y alimentarios, los invernaderos fotovoltaicos han surgido como una alternativa prometedora en la agricultura mexicana. Estos sistemas aprovechan la energía solar para crear un entorno controlado que permite el cultivo de diversos tipos de productos agrícolas, ofreciendo beneficios tanto en términos de aumento de la productividad como de reducción del impacto ambiental [2].

En el contexto de los desafíos agrícolas que enfrenta México, desde la presión sobre los recursos naturales hasta la necesidad de aumentar la productividad para satisfacer la demanda nacional e internacional. Los sistemas fotovoltaicos desempeñan un papel fundamental al aprovechar la energía solar, ofreciendo una solución sostenible para abordar los desafíos energéticos en los invernaderos [53]. Además de optimizar la producción agrícola, los invernaderos solares contribuyen significativamente a la generación de energía limpia, ayudando así a mitigar los impactos ambientales y a fortalecer la resiliencia frente al cambio climático.

Los invernaderos fotovoltaicos permiten extender la temporada de cultivo y controlar las condiciones ambientales, lo que se traduce en un aumento de la producción y la diversificación de los cultivos. Al aprovechar la energía proveniente del sol y reducir la dependencia de recursos hídricos, los invernaderos solares promueven una agricultura más sostenible y resiliente frente a las condiciones climáticas adversas. A pesar de sus beneficios, la adopción de invernaderos fotovoltaicos en México enfrenta desafíos significativos, que van desde la inversión inicial hasta la capacitación técnica y el acceso a financiamiento. Además, la falta de políticas y regulaciones específicas puede limitar su expansión a gran escala.

2.5. Producción agrícola de tomate

Como se ha mencionado anteriormente, el presente trabajo se centra en el cultivo de tomate en invernaderos; por esta razón, en este apartado se describen los pasos clave del proceso productivo, desde la preparación del cultivo hasta la cosecha.

El proceso de producción de tomate en invernadero implica una serie de etapas fundamentales, que se presentan a continuación:

- 1) **Establecimiento del cultivo:** Se consideran condiciones generales de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) en el predio, identificación de lotes, higiene, y la localización y diseño del invernadero [54].
- 2) **Producción de plántula:** Incluye la desinfección del medio de soporte radicular, marcos de plantación, trasplante, fertilización y fertirrigación [54].
- 3) **Preparación de las charolas de germinación:** Se seleccionan charolas con el tamaño

de celda adecuado para semillas de tomate (72 a 200 celdas) [54, 55]. Las celdas se llenan con un sustrato estéril y húmedo antes de sembrar [56].

- 4) **Siembra de las semillas:** Se coloca una semilla por celda a la profundidad recomendada por el proveedor, cubriéndola con una capa ligera de sustrato [56].
- 5) **Germinación:** Las charolas se mantienen en un ambiente cálido y húmedo (22–24°C) para favorecer la germinación. El riego debe mantener la humedad del sustrato sin saturarlo [56].
- 6) **Trasplante a macetas o bandejas:** Una vez que las plántulas desarrollan las primeras hojas verdaderas, se transfieren a macetas o bandejas con celdas mayores para mejorar el desarrollo radicular [54, 55].
- 7) **Aclimatación:** Las plántulas se exponen gradualmente a mayor intensidad lumínica para fortalecerlas antes del trasplante definitivo [56].
- 8) **Trasplante al invernadero:** Las plantas, ya con un tamaño adecuado, se colocan en el sustrato o suelo preparado, siguiendo las distancias recomendadas en la bibliografía [54, 56].
- 9) **Cuidado de las plantas en el invernadero:** Incluye tutorado, poda, riego, fertilización, y manejo fitosanitario. También se consideran plagas, enfermedades virales, alteraciones fisiológicas, recolección y postcosecha [54].
- 10) **Tutorado:** Se emplean métodos como tejido, estacas, trípodes o jaulas de alambre. El tutorado es esencial para un crecimiento ordenado y frutos de buena calidad [56].
- 11) **Cosecha:** Se realiza cuando los frutos alcanzan su madurez fisiológica (color rojo intenso), aproximadamente tres meses después del trasplante, prolongándose hasta cinco meses. La cosecha debe ser frecuente y cuidadosa para evitar daños en la planta [56].

En conjunto, el proceso productivo del tomate en invernadero abarca desde la preparación inicial del cultivo y la producción de plántulas hasta el manejo agronómico, tutorado y cosecha, con el objetivo de garantizar frutos de calidad y altos rendimientos bajo condiciones controladas.

2.5.1. Agricultura en el Estado de México

De las hortalizas cultivadas en la República Mexicana, el tomate es de las más importantes en los últimos años, por los grandes beneficios alimenticios, técnicos y de comercialización. Su consumo es una parte importante de la dieta humana, ya que es un alimento muy versátil, con

formas de consumo variadas, altas ingestas de este producto están estrechamente relacionadas con un impacto benéfico para la salud, ya que es capaz de reducir el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares y diferentes tipos de cáncer, atribuido principalmente a su alto contenido de antioxidantes [57].

En el Estado de México, la producción agrícola es una parte esencial de la economía. Entre los diversos cultivos que se destacan en esta región, el tomate rojo se rige como uno de los principales protagonistas, según la Encuesta Nacional Agropecuaria 2017 [2], con la participación de ocho municipios productores dedicados a su producción.

En la Figura 2.2 se observa el porcentaje de municipios del Estado de México que producen tomate a través de agricultura a cielo abierto y a través de agricultura protegida. Actualmente, el 54 % de la producción de tomate en el Estado de México es bajo agricultura protegida.

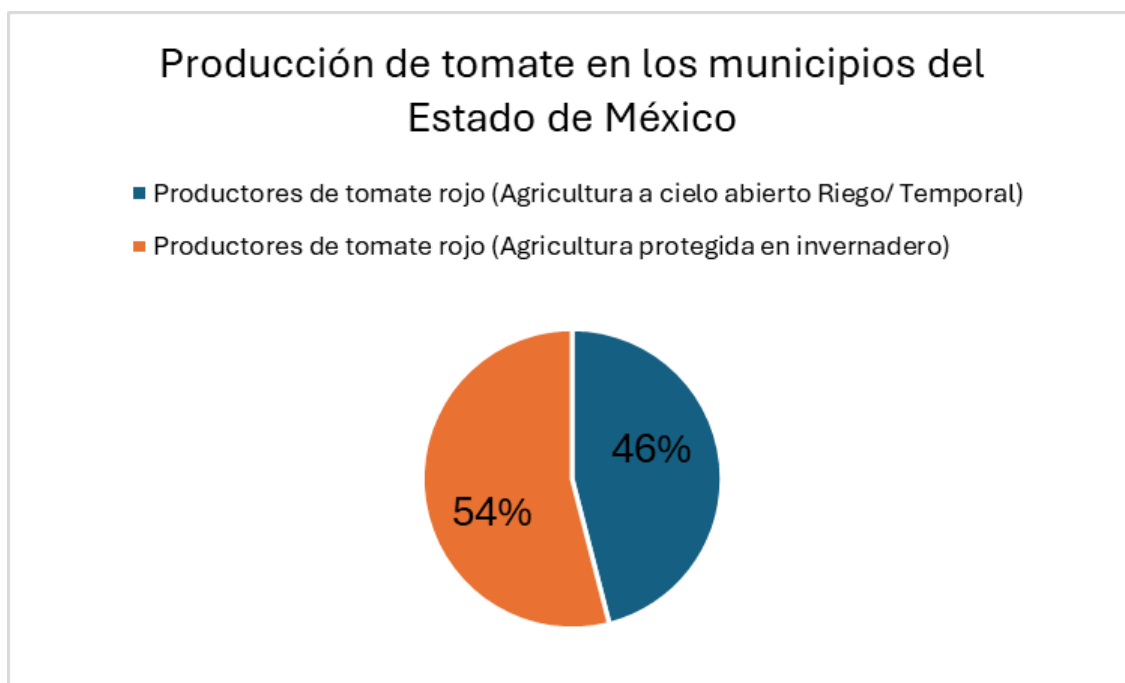


Figura 2.2: Grafica porcentual de la producción de tomate en el Estado de México [2]

La Tabla 2.1 presenta el número de municipios productores agrícolas bajo agricultura protegida, siendo el cultivo de tomate el que cuenta con mayor presencia en el Estado de México. Los municipios reportados en la Encuesta Intercensal 2015 del INEGI [58] son: Otumba, Tenancingo, Tonalco, Axapusco, Atlacomulco, Valle de Bravo, Amanalco y Temascaltepec.

Tabla 2.1: Número de municipios productores a través de agricultura protegida en el Estado de México [2]

Cultivos del Estado de México	
Cultivo	Número de municipios productores
Rosa	2
Pepino	1
Nopal	7
Tomate	8
Fresa	2
Flor	2
Calabaza	1
Árboles de navidad	1

El cultivo de tomate es un proceso que requiere un considerable consumo de energía, con un promedio de aproximadamente 290 kWt por cada unidad producida [59]. Esto se debe a la necesidad de mantener condiciones óptimas de temperatura y humedad en los invernaderos, así como al uso de sistemas de riego y luces artificiales en algunas etapas del cultivo. La eficiencia energética en la producción de tomate es un aspecto importante que los agricultores y la industria agrícola están buscando mejorar para reducir su impacto ambiental y los costos asociados. Las prácticas agrícolas varían en decisión del productor y los jornaleros del proceso productivo del tomate.

2.6. Análisis de ciclo de vida

El ACV es una metodología que evalúa los impactos ambientales asociados con un producto, proceso o actividad a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. En México, el interés por el ACV ha ido en aumento debido a la creciente preocupación por la sostenibilidad y el impacto ambiental de las actividades industriales.

2.6.1. Normas ISO que rigen el ACV

Las ISO 14040 y 14044 son normas internacionales que proporcionan los principios y el marco general para el ACV y establecen la metodología específica para llevar a cabo dicha evaluación, respectivamente [19, 20].

La norma ISO 14040 establece los principios y el marco general para el ACV, incluyendo

la definición y objetivo del análisis, la fase de inventario del ciclo de vida (ICV), la fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) y la fase de interpretación del ciclo de vida [19]. Por otro lado, la norma ISO 14044 establece los requisitos y directrices para llevar a cabo el ACV, incluyendo la definición del objetivo y alcance, el análisis del inventario del ciclo de vida, la evaluación del impacto del ciclo de vida e interpretación de los resultados [20].

La norma ISO 14044 define los objetivos y el alcance que debe tener la aplicación prevista en los resultados del análisis del ciclo de vida. La aplicación prevista debe ser considerada al definir el objetivo y el alcance, pero está fuera del alcance de la norma.

2.6.2. Metodología de ACV

El marco metodológico para la evaluación del ciclo de vida ha sido estandarizado por la Organización Internacional de Normalización (ISO).

El ACV permite identificar y cuantificar los aspectos ambientales de un producto o servicio desde la extracción de materias primas hasta su disposición final; se usa para evaluar el ciclo de vida de los productos y servicios, generando requisitos y directrices para evaluarlo. Es un instrumento que investiga y evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. La información obtenida a través del ACV puede ser utilizada para tomar decisiones más informadas y sostenibles en el diseño y desarrollo de productos y servicios [60].

Se compone de 4 fases [61], como se muestra en la siguiente figura:

- Definición de objetivo y alcance
- Análisis de inventario
- Evaluación de impacto
- Interpretación

Las fases no se desarrollan en una única secuencia, ya que el ACV es un proceso iterativo. Durante las iteraciones posteriores, es posible alcanzar niveles de mayor detalle, comenzando con un enfoque simplificado que puede evolucionar hasta un análisis completo y detallado de ACV. A continuación, se describen los aspectos fundamentales a considerar en cada etapa ilustrada en la Figura 2.3.

(a) Definición del objetivo y alcance

El objetivo del estudio debe ser el justificante para llevar a cabo el estudio, así como las aplicaciones previstas. El alcance será la descripción del nivel de detalle del estudio y debe mostrar que el objetivo se puede cumplir con las limitantes establecidas previamente.

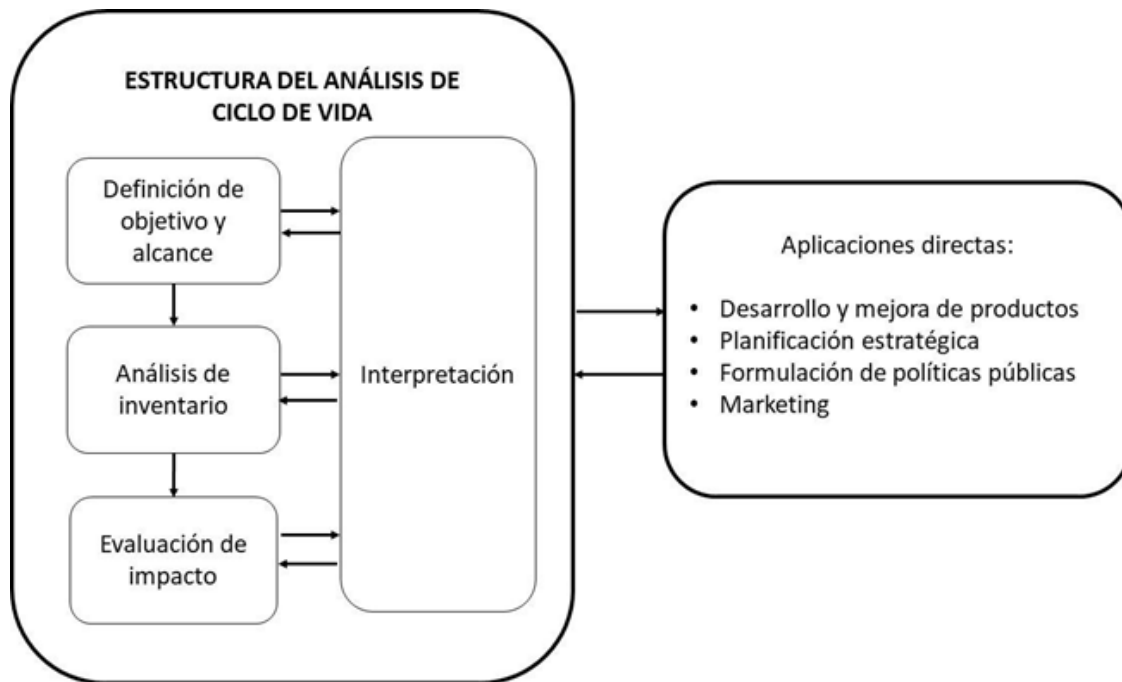


Figura 2.3: Estructura del análisis de ciclo de vida (Extraído desde la ISO 14040)

En esta fase se requiere definir los siguientes elementos:

1. La función del sistema a evaluar.
2. La unidad funcional y el flujo de referencia.
3. Los límites del sistema.
4. Procedimientos de asignación.
5. Suposiciones y limitaciones.
6. Calidad y requisitos de los datos.

Unidad funcional (UF)

Es una medida cuantitativa de la función del sistema estudiado, proporciona una referencia que tiene relación con las entradas y salidas de los recursos y emisiones de un proceso y actividad. La UF cuantifica, describe las propiedades de un producto y puede ser de tipo físico y funcional.

Tipo físico: es la medida física que caracteriza el producto.

Ejemplo:

Masa → kg, kg/ha

Energía → MJ, kWh, MJ/ha

Volumen → L, m³, L/h

Tipo funcional: representa la funcionalidad que cumple el producto.

Ejemplo: horas de iluminación, durabilidad, aporte nutricional, etc.

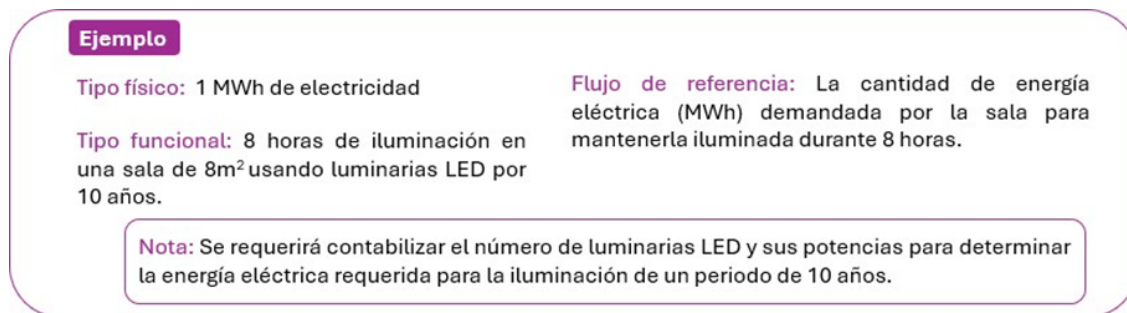


Figura 2.4: Ejemplo de unidad funcional y flujo de referencia (Elaboración propia)

La elección y definición de la UF es imprescindible cuando el resultado es utilizado con fines comparativos, para asegurar que dichas comparaciones sean realizadas en bases comunes.

Límites del sistema

Los límites del sistema determinan cuales etapas del proceso se incluyen en el estudio de ACV, se clasifican de la siguiente manera (puede apreciarse en la Figura 2.5):

- Puerta a Puerta:
El análisis es limitado a lo que entra y sale de una etapa.
- Cuna a Puerta:
Se analiza el impacto de la fuente, incluyendo la extracción de la materia prima, hasta que termina la producción.
- Cuna al Uso:
Abarca todas las etapas desde la extracción de materias primas hasta el momento en que el producto se utiliza, excluyendo su disposición o tratamiento final.
- Puerta a Tumba:
Limita el estudio a partir de la salida de fábrica, la etapa de uso y la disposición final de los residuos de un producto.
- Cuna a Tumba:
Es examinado el impacto de todo el ciclo de vida, incluyendo la etapa de uso y la disposición final.

(b) Análisis de Inventario

En la etapa del Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (AICV) se compilan los datos que corresponden a las entradas y salidas para todos los procesos del ciclo de vida tomando como referencia la UF. Para cada etapa que compone el ciclo de vida se compila una lista de recursos utilizados (provenientes de la naturaleza o de la tecnosfera) y emisiones (al suelo, aire y agua).

Las fuentes de información pueden clasificarse en primarias y secundarias:

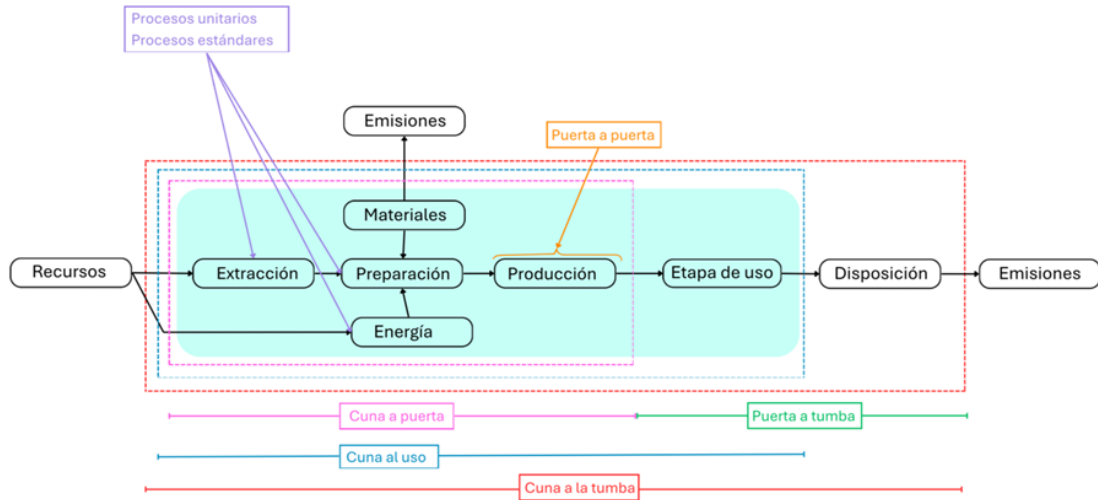


Figura 2.5: Niveles para definir límites del sistema (Elaboración propia)

- Los datos primarios vienen directamente de procesos específicos: mediciones, entrevistas, muestreos, etc.
- Los datos secundarios se obtienen de literatura científica, bases de datos, informes estadísticos, etc.

En la actualidad, existen bases de datos de Inventarios de Ciclo de Vida (ICV) como Ecoinvent siendo una de las más reconocidas a nivel mundial por la comunidad científica debido a que abarca energía, suministros, productos químicos, metales, agricultura, gestión de residuos y otras industrias [62]. Está ampliamente reconocida como la base de datos de ICV más grande y consistente del mercado, con más de 15,000 conjuntos de datos de ICV en diversos sectores como suministro energético, agricultura, transporte, biocombustibles y biomateriales, productos químicos a granel y especiales, materiales de construcción, materiales de embalaje, textiles, metales básicos y preciosos, procesamiento de metales, TIC y electrónica, lácteos, madera y tratamiento de residuos [63].

La base de datos Ecoinvent está integrada en diversos softwares de ACV, facilitando el acceso a una amplia variedad de conjuntos de datos utilizados para aplicaciones como la evaluación del ciclo de vida, la gestión ambiental, la medición de la huella de carbono y agua, el diseño de productos, el ecodiseño y la elaboración de Declaraciones Medioambientales de Producto (EPD) [63]. Además, esta herramienta es una fuente confiable y ampliamente aceptada para estudios alineados con las normas ISO 14040 y 14044, reconocida por su transparencia, detallada documentación y actualizaciones periódicas [63].

Siempre es importante la validación de los datos, a través de mediciones y monitoreo, procesos de cálculos ya que la calidad de los datos es determinante para la representatividad de los resultados que se obtengan.

(c) Evaluación de impacto

En la evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV), los flujos de inventario se clasifican mediante categorías de impacto, considerando su impacto potencial en el medio ambiente, salud humana o recursos.

Así pues, la evaluación de impacto se realiza a través de la clasificación y caracterización de elementos del inventario relacionados a una sustancia de referencia conocida como categoría de impacto. En la Figura 2.6 se presentan los elementos obligatorios para la evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV).

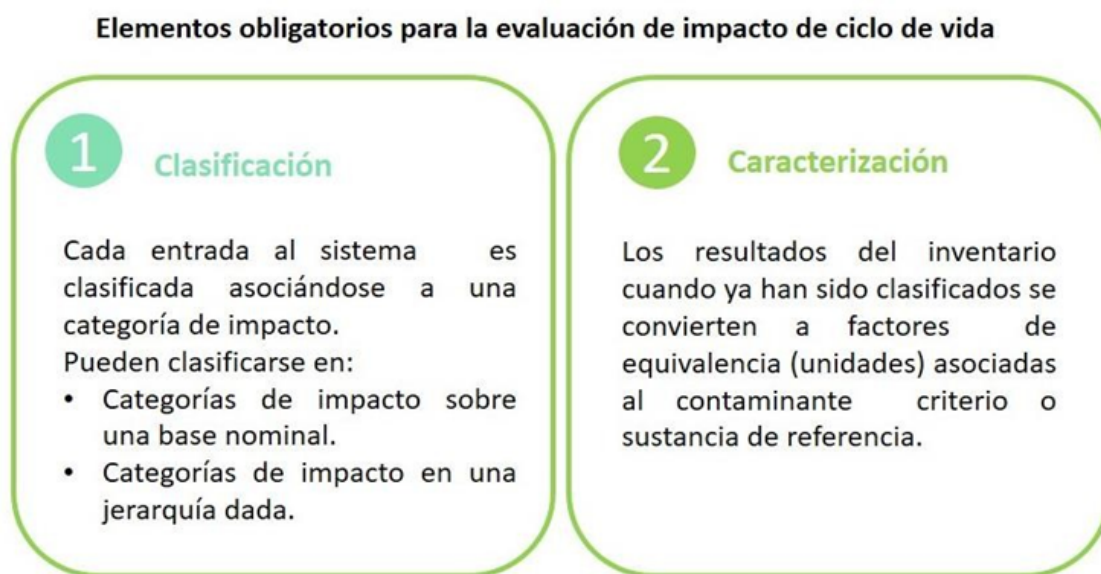


Figura 2.6: Elementos obligatorios para la EICV (Extraído de ISO 14044)

Después de la caracterización, las entradas y salidas del sistema del producto están representados por una compilación de resultados de los indicadores de la categoría de impacto.

1) Metodologías de evaluación de impacto

Existen diversas metodologías para la evaluación de impactos ambientales; entre ellas, ReCiPe 2016 en su enfoque de categorías de punto medio. Este método, desarrollado por RIVM, Radboud University, Norwegian University of Science and Technology y PRé Sustainability, incluye múltiples factores de caracterización. En el presente estudio se consideraron específicamente las categorías de toxicidad humana, formación de material particulado, formación de oxidantes fotoquímicos, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad marina, escasez de agua, agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles. Estas categorías permiten cuantificar los principales efectos ambientales asociados al sistema energético y agrícola evaluado.

También existe la metodología desarrollada por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sobre Cambio Climático en categorías de punto medio, conocida como Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential) GWP 100. Este, contiene

los factores de cambio climático del potencial de calentamiento global (GWP) con un marco de tiempo de 100 años, es importante tener en cuenta que B. Niblick [64, 65] recomienda por defecto los factores GWP 100.

Las categorías de punto medio evalúan la magnitud del impacto generado directamente a un mecanismo ambiental, sin considerar las repercusiones que esto ocasione al ecosistema.

2) Categorías de impacto

La selección de las categorías de impacto es un paso crítico dentro de la fase de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV), pues determina qué aspectos ambientales serán cuantificados y analizados. De acuerdo con las normas ISO 14040 y 14044, esta selección debe realizarse de manera coherente con el objetivo y alcance del estudio, asegurando la relevancia científica y la lo que integra el análisis [19, 20]. Asimismo, UNEP/SETAC destaca que la elección de indicadores debe basarse en criterios de pertinencia ambiental, robustez metodológica y disponibilidad de modelos de caracterización validados [66].

Se prioriza la selección de categorías que representen los principales mecanismos de impacto asociados al sistema estudiado, considerando tanto la magnitud como la persistencia de las cargas ambientales sobre la salud humana y los ecosistemas. Para ello, se analizan las etapas relevantes del ciclo de vida y los flujos ambientales más significativos, garantizando que las categorías elegidas sean capaces de capturar los impactos clave desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida.

La literatura recomienda emplear indicadores de punto medio (midpoint), ya que estos se encuentran más directamente vinculados con las intervenciones ambientales (emisiones y consumos) y presentan menor incertidumbre en comparación con las categorías de punto final (endpoint), además de contar con modelos ampliamente consolidados y calibrados [67]. En este trabajo se adoptó el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) como marco principal de evaluación, dado su uso extendido en estudios de ACV para sistemas energéticos y su sólido fundamento científico.

La selección final de categorías se alineó con los objetivos del estudio, priorizando aquellas que permiten evaluar los impactos principales del suministro energético en un invernadero, así como los efectos asociados a la fabricación, instalación, operación y fin de vida del sistema fotovoltaico.

La clasificación de las categorías de impacto en *alta relevancia* y *relevancia secundaria* se realizó conforme a los lineamientos de las normas ISO 14040 y 14044, que señalan la importancia de seleccionar indicadores coherentes con los flujos ambientales más significativos del sistema y con los objetivos del estudio [19, 20]. Las categorías de alta relevancia corresponden a los impactos con mayor contribución potencial en el inventario del sistema fotovoltaico e invernadero, particularmente aquellos asociados al agotamiento de recursos, la calidad del aire y la toxicidad humana.

Por su parte, las categorías clasificadas como de relevancia secundaria mantienen validez científica dentro del método ReCiPe 2016 [67], pero presentan una contribución cuantitativa menor o un vínculo menos determinante con los procesos principales del

sistema. Su inclusión busca garantizar transparencia metodológica sin modificar las conclusiones prioritarias del análisis.

El listado completo de categorías consideradas, junto con el contaminante o sustancia de referencia y una breve descripción del mecanismo de impacto modelado, se presenta en las siguientes Tablas 2.2, 2.3, 2.4.

Tabla 2.2: Categorías de impacto de alta relevancia seleccionadas según ReCiPe 2016 Mid-point (H).

Indicador	Contaminante criterio	Modela
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	Aborda los impactos derivados de emisiones acidificantes que afectan suelos, vegetación y ecosistemas terrestres.
Agotamiento de combustibles fósiles	kg petróleo eq	Escasez de recursos fósiles basada en el contenido energético del petróleo equivalente consumido a lo largo del ciclo de vida.
Agotamiento de metales	kg Fe eq	Representa la disminución de reservas de metales utilizados en equipos e infraestructura, y la posible escasez futura de recursos no renovables.
Agotamiento de recursos hídricos	m ³	Consumo de agua proveniente de diversas fuentes durante el ciclo de vida, representando presión sobre recursos hídricos.
Formación de partículas	kg PM ₁₀ eq	Modela la generación de partículas finas y precursores asociados, con efectos en calidad del aire y salud humana.
Toxicidad para humanos	kg 1,4-DCB eq	Evalúa los impactos de sustancias tóxicas y contaminantes químicos sobre la salud humana a través de diferentes vías de exposición.

Tabla 2.3: Categorías de impacto relevantes secundarias seleccionadas según ReCiPe 2016 Midpoint (H).

Indicador	Contaminante criterio	Modela
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC eq	Evalúa la formación de ozono troposférico generado por compuestos orgánicos volátiles no metánicos.
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	Representa el aporte de fósforo a cuerpos de agua dulce, causando enriquecimiento excesivo y deterioro de calidad del agua.
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DCB eq	Evalúa los efectos tóxicos de sustancias químicas sobre organismos en ecosistemas de agua dulce.
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB eq	Modela la toxicidad de sustancias químicas en ambientes terrestres, afectando especies y procesos ecológicos.
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB eq	Representa la toxicidad de contaminantes químicos sobre organismos marinos y ecosistemas oceánicos.

Tabla 2.4: Categorías de impacto seleccionadas *ReCiPe* (Elaboración propia, 2024)

Indicador	Contaminante criterio	Modela
Potencial de calentamiento global GWP100	kg CO ₂ eq	Evalúa cambio climático y kg de CO ₂ equivalente.

3) Interpretación de resultados

En la fase final del estudio, los resultados del ACV se interpretan y presentan de manera transparente, alineándose con los objetivos y el alcance definidos previamente. El propósito principal de esta etapa es ofrecer una exposición precisa y comprensible de los hallazgos, que sirva como fundamento para las conclusiones y recomendaciones orientadas a los procesos de toma de decisiones. La interpretación abarca tres importantes áreas [61]:

- Identificación de aspectos significativos (parámetros clave, categorías de impacto, etapas del ciclo de vida, entre otros).
- Evaluación de resultados a través de controles de integridad, sensibilidad, incertidumbre.
- Definición de conclusiones, limitaciones y recomendaciones. En esta sección debe cuidarse reflejar los resultados más significativos del estudio según el objetivo, alcance y limitaciones.

A través de la identificación de aspectos clave, la evaluación de resultados y la definición de conclusiones, limitaciones y recomendaciones, se asegura una presentación precisa y estructurada de los hallazgos del estudio. Esta fase proporciona una base sólida para tomar decisiones fundamentadas y desarrollar estrategias sostenibles. La transparencia en la exposición de resultados, junto con una comunicación efectiva, es fundamental para garantizar la confiabilidad y la aplicabilidad de los estudios de ACV.

2.6.3. Herramientas informáticas para estudios de ACV

La complejidad asociada a la recopilación y gestión de datos requeridos para evaluar los impactos ambientales hace que la elaboración de un ACV sea un proceso desafiante. Por esta razón, la mayoría se lleva a cabo utilizando bases de datos de ICV y softwares de ACV comerciales para facilitar y agilizar este análisis [61].

Las bases de datos son conjuntos de datos de entrada y salida de procesos específicos, por ejemplo, tratamientos de agua, y se usan para complementar los inventarios durante el ciclo de vida de cualquier producto o actividad.

El software de ACV es una herramienta que administra y procesa todos los datos del ACV; en este software, el usuario coloca los datos del ICV que se recopilaban previamente, utiliza las bases de datos disponibles en el software y realiza la evaluación de ciclo de vida. En este caso, será empleado SimaPro; se trata de un software analítico utilizado como herramienta profesional para realizar estudios de ACV, a través del cual es posible evaluar los impactos ambientales de productos (servicios o bienes), procesos y actividades. Los resultados calculados por el software pueden estimar huellas ambientales de productos, como la huella de carbono, de agua, entre otros.

2.7. El ACV y la energía fotovoltaica

Actualmente se busca un manejo sostenible de la energía que tome en cuenta no solo los aspectos económicos sino también los aspectos ambientales de las nuevas tecnologías energéticas. Se considera que la energía fotovoltaica es una fuente de energía 100 % limpia, se denomina así porque mejora aspectos ambientales muy concretos en una determinada etapa de su ciclo de vida: el uso, dejando de lado las demás etapas que conforman el ciclo de vida de un sistema de aprovechamiento de energía solar fotovoltaica.

La energía fotovoltaica ha cobrado relevancia en México como una fuente de energía limpia y renovable. El ACV aplicado a la energía fotovoltaica permite evaluar su desempeño ambiental a lo largo de su ciclo de vida, desde la fabricación de los paneles solares hasta su disposición final. Algunos aspectos para considerar sobre el ACV y la energía fotovoltaica en México son:

- Impacto ambiental: Estudios han demostrado que la energía fotovoltaica tiene un bajo impacto ambiental en comparación con fuentes de energía convencionales en México, como el uso de combustibles fósiles.
- Políticas públicas : El gobierno mexicano ha implementado políticas de fomento a las energías renovables, incluyendo la energía fotovoltaica, lo que ha impulsado su adopción y el interés por evaluar su desempeño ambiental a través del ACV.
- Beneficios socioeconómicos: La implementación de proyectos de energía fotovoltaica en México no solo contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también genera empleo y promueve la innovación tecnológica en el sector energético.

2.8. Aplicaciones del ACV en el sector agrícola

La evaluación del impacto ambiental completo de las instalaciones agrovoltaicas, que combinan la producción de energía solar fotovoltaica con actividades agrícolas, se ha convertido en una herramienta esencial. Estas instalaciones representan una solución innovadora para la producción sostenible de energía y alimentos, pero es decisivo comprender su impacto ambiental para maximizar los beneficios y minimizar las consecuencias no deseadas [68].

Esta herramienta permite evaluar todas las etapas del ciclo de vida de las instalaciones agrovoltaicas, desde la extracción de materias primas para la fabricación de paneles solares hasta la disposición de estos al final de su vida útil. Esto incluye el análisis de emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de agua y energía, uso de suelo, contaminación del suelo y del agua, entre otros aspectos ambientales relevantes [69].

Una de las aplicaciones más importantes de esta herramienta en el sector agrovoltaico es la optimización del diseño de instalaciones. Al evaluar el impacto ambiental de diferentes diseños y tecnologías, se pueden identificar oportunidades para mejorar la eficiencia energética, reducir las emisiones y minimizar el uso de recursos naturales [70]. Por ejemplo, la disposición de los paneles solares puede optimizarse para maximizar la producción de energía sin comprometer la productividad agrícola, y se pueden seleccionar materiales más sostenibles para la fabricación de los paneles y estructuras de soporte.

Además, esta herramienta permite comparar las instalaciones agrovoltaicas con sistemas convencionales de producción de energía y agricultura, lo que facilita la identificación de prácticas y tecnologías óptimas para fomentar la sostenibilidad en el sector [71]. Este análisis es especialmente relevante debido al creciente interés en la transición hacia sistemas basados en energías renovables y prácticas agrícolas sostenibles.

Entre las aplicaciones que tiene el ACV en el sector agrovoltaico destaca un análisis del ciclo de vida de paneles solares fotovoltaicos utilizados para alimentar sistemas de riego, comparando dos metodologías: Eco-Indicador 99 y EPS-2000, elaborado por el Departamento

de Ingeniería Agrícola y Forestal de la Universidad de Valladolid [43]. El objetivo es estimar los impactos ambientales de los paneles a lo largo de su ciclo de vida, incluyendo fabricación y reutilización, para determinar su idoneidad técnica, económica y ambiental.

Se estudian dos tipos de paneles: monocristalinos y policristalinos, incorporando mejoras ambientales como el uso de grafenos, sulfuro de molibdeno, marcos reciclados y catalizadores menos contaminantes. El proceso de ensamblaje es el mayor contribuyente a los impactos ambientales, seguido por la transformación de silicio metalúrgico a solar. La metodología Eco-Indicador 99 agrupa los impactos en tres categorías (daños a la salud humana, calidad del ecosistema y recursos), mientras que EPS-2000 emplea cuatro (salud humana, regeneración del ecosistema, stock de recursos y biodiversidad, y valores culturales).

Los resultados muestran que las mejoras ambientales en la fabricación, como el uso de silicio policristalino y marcos reciclados, reducen significativamente los impactos, especialmente en las categorías de calidad del ecosistema, biodiversidad y agotamiento de recursos según EPS-2000. Además, se observan beneficios en la regeneración de ecosistemas y la disponibilidad de alimentos. En conclusión, el estudio demuestra que la aplicación de medidas de mejora ambiental en la fabricación de paneles solares fotovoltaicos reduce considerablemente su huella ecológica a lo largo de su vida útil.

También es relevante mencionar que en México el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) [72] ha impulsado múltiples proyectos agropecuarios basados en energías renovables, incluyendo sistemas fotovoltaicos para bombeo de agua, climatización de invernaderos, mejora de la eficiencia hídrica y productiva, y sistemas híbridos para pequeñas unidades de producción. Estos proyectos, apoyados mediante programas de concurrencia y estímulos a la innovación tecnológica, han demostrado que la integración de soluciones energéticas renovables en el sector agrícola puede reducir emisiones, disminuir costos operativos y mejorar la resiliencia de los sistemas productivos, lo que refuerza la pertinencia del uso del ACV para evaluar su desempeño ambiental.

Capítulo 3

Capítulo 3

Marco metodológico

Este capítulo describe la metodología que se diseñó integrando aspectos técnicos, productivos y energéticos del invernadero. El enfoque parte de la caracterización física de las instalaciones y del cultivo y avanza hacia el análisis del manejo agronómico, los sistemas de riego y los flujos de consumo de recursos. Esta estructura metodológica permite organizar la información relevante para el análisis del ciclo de vida, y facilita la identificación de áreas de oportunidad para la incorporación de tecnologías fotovoltaicas.

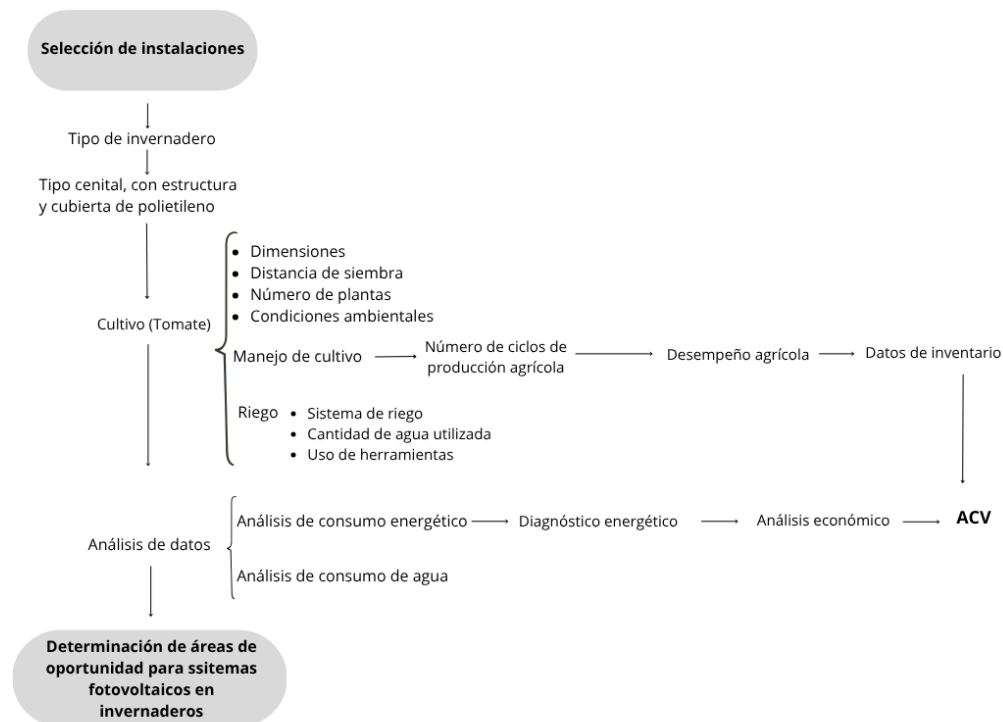


Figura 3.1: Diagrama para selección de instalaciones (Elaboración propia)

En la figura 3.1, se presenta un diagrama de flujo que integra las etapas consideradas para la selección y evaluación de un invernadero en el contexto de un ACV aplicado a instalaciones fotovoltaicas. El diagrama inicia con la elección del tipo de invernadero y su configuración productiva (cultivo, tipo de cubierta, sistema estructural), y continúa con la caracterización del manejo agronómico y los sistemas de riego. A partir de esta información se conforma el inventario de datos necesarios para el análisis, el cual incluye dimensiones, insumos, consumos energéticos y hídricos.

Posteriormente, esta base de inventario se conecta con dos líneas de evaluación: por un lado, el análisis económico, que considera costos de instalación, operación y mantenimiento; y por otro, la evaluación ambiental mediante ACV, que permite identificar y cuantificar los impactos ambientales asociados al sistema. La integración de ambos enfoques facilita una valoración completa del escenario, permitiendo comparar alternativas y determinar oportunidades de optimización tanto en términos ambientales como de desempeño económico.

3.1. Visita a instalaciones agrícolas

Las visitas a las instalaciones agrícolas se realizaron con el propósito de obtener información directa sobre las condiciones operativas, estructurales y energéticas de invernaderos reales en la región. Las ubicaciones seleccionadas fueron elegidas por su representatividad en cuanto a prácticas agrícolas locales, tipo de infraestructura y disponibilidad de datos técnicos. Esta selección permitió recopilar información confiable y contextualizada que sirve como base para el análisis energético y ambiental desarrollado en esta investigación.

A continuación, se presentan semblanzas de invernaderos que abrieron sus puertas para brindar información para realizar esta investigación.

a) San Antonio Albarranes, Temascaltepec



Figura 3.2: Fotografía del interior del invernadero en San Antonio Albarranes

En el contexto de una investigación, se realizó una visita detallada al invernadero especializado en la producción de tomates ubicado en la comunidad de San Antonio Albarranes, municipio de Temascaltepec. Este caso de estudio destaca por su relevancia en el ámbito de la agricultura moderna y la producción hortícola. Durante el recorrido, fue posible observar de primera mano las instalaciones y los procesos operativos de gran escala, abarcando desde la infraestructura física hasta las tecnologías empleadas, lo que permitió comprender su funcionamiento y su impacto en el desarrollo del sector agrícola local.

El invernadero es de tipo cenital, con estructura metálica y cubierta de polietileno reforzado. Las paredes están cubiertas con maya anti-áfidos, lo que permite un sistema de ventilación pasivo para mantener el control de la temperatura en un rango de entre 23 y 25°C durante el día y entre 15 y 18 °C durante la noche. Tiene una extensión total de 3,250 m², en el que se lleva a cabo un ciclo de producción de tomate al año, que se desarrolla desde marzo hasta noviembre. La siembra se realiza con una distancia de 25 cm entre plantas y 170 cm entre líneas, lo que permite un acomodo total de 9,000 plantas en el perímetro del invernadero.



Figura 3.3: Ilustración representativa de distancia de siembra en invernadero en San Antonio Albarranes (Elaboración propia)

El riego se efectúa mediante un sistema por goteo, donde cintas con emisores de agua transitan por cada línea y alcanzan a cada planta. El tiempo que tarda en llegar el agua a la primera y última planta es de 2 minutos. El riego no precisa de bombear agua, debido a que en la ubicación geográfica hay una corriente de agua con presión suficiente para abastecer de agua a las plantas. Para buscar el óptimo desempeño de las plantas y la producción, se añaden macroelementos en el agua de riego (calcio, nitrógeno, potasio) para llevar a cabo el fertirriego empleando un sistema Venturi. El suelo del lugar posee características porosas con limo y arcilla; el riego necesario para cada planta es de 1.5L de agua por día.

En las plantas nacen racimos de flor cada 27 días y en cada planta se dejan 12 o 13 racimos para asegurar la calidad del tomate. Para la polinización, cuando ya hay flores, un trabajador poliniza usando un soplador mientras transita entre las líneas de siembra dos veces por día.

Finalmente, la cosecha del tomate se realiza una vez por semana durante 7 meses, efectuando en total 70 cortes de tomate por ciclo. La producción aproximada es de 15 kg de tomate / m^2 /un ciclo.

La Tabla 3.1 presenta una síntesis de las características estructurales y operativas del invernadero de San Antonio Albarranes, incluyendo su ubicación, extensión, condiciones de temperatura, sistema de riego y parámetros de cultivo. Esta información constituye la base para el modelado energético y el análisis posterior del sistema.

Tabla 3.1: Síntesis de datos de invernadero en San Antonio Albarranes

Ubicación:	Temascaltepec
Clasificación:	Invernadero tipo cenital
Extensión:	3,250 m ²
Cultivo:	Tomate
Temperaturas	
Día	23 a 25 °C
Noche	15 a 18 °C
Ciclos de siembra/año:	1
Tipo de ventilación:	Pasiva
Distancia de siembra	
Entre planta y planta	25 cm
Entre líneas	170 cm
Número de plantas:	9,000
Riego	
Sistema de riego	Goteo
Tiempo de espera	2 minutos
Cantidad de agua por planta	1.5 litros
Polinización	
Manual	2 veces/día
Cosecha	
1 vez por semana	
Cortes por ciclo	70 cortes
Cantidad cosechada/m ² /ciclo	15 kg

En relación con los objetivos de este trabajo, esta instalación presenta varias ventajas. Entre ellas destacan la sencillez operativa del sistema de riego por gravedad, que elimina el consumo energético asociado al bombeo y facilita la estimación de los flujos de agua para el análisis; así como la estructura cenital con ventilación pasiva, que reduce la necesidad de equipos mecánicos para el control climático. Estas características permiten estudiar un sistema agrícola con bajas demandas energéticas directas, ideal para evaluar oportunidades de mejora y la potencial incorporación de tecnologías como sistemas fotovoltaicos. No obstante, también se identifican desventajas importantes: la dependencia de la presión natural del agua limita la capacidad de control preciso del riego y del fertirriego; la ventilación pasiva provoca variabilidad térmica durante el día y la noche; y la baja infraestructura técnica dificulta la medición detallada de consumos, lo cual representa un reto para la modelación fina del desempeño energético. Estas condiciones, en conjunto, ofrecen un escenario representativo y desafiante para el análisis energético y ambiental desarrollado en esta investigación.

b) San Miguel Caltepanitla, Tecozautla



Figura 3.4: Fotografía del interior del invernadero en San Miguel Caltepanitla

En San Miguel Caltepanitla, Tecozautla, se visitó otro invernadero dedicado a la producción de tomates. Este invernadero también sirve como caso de estudio en la agricultura moderna y la producción hortícola. Durante la visita, se evaluaron las instalaciones y la tecnología utilizada.

Este invernadero es de tipo cenital, con estructura metálica y cubierta de polietileno reforzado, con mallas anti-áfidos para una ventilación pasiva que mantiene la temperatura entre 35-45 °C durante el día y 10-18 °C por la noche. Con una extensión de 2,496 m², realiza dos ciclos de producción de tomate al año. Las plantas se siembran a 40 cm de distancia entre ellas y 120 cm entre líneas, con un total de 8,320 plantas.



Figura 3.5: Ilustración representativa de distancia de siembra en invernadero en San Miguel Caltepanitla (Elaboración propia)

El riego se realiza mediante un sistema de riego por goteo, donde cintas con emisores de agua recorren cada línea y llegan a cada planta. El tiempo que tarda en llegar el agua a la primera y última planta es de 3 minutos. Para efectuar el riego, se bombea agua de un pozo a un tanque elevado y se utiliza una bomba de 7.5 HP. Este proceso toma 2 horas al día.

En este invernadero, el riego se realiza usando la bomba de 4 HP varias veces al día en periodos cortos y distribuidos a lo largo de la jornada. En total, se llevan a cabo 17 eventos de riego y fertirriego diarios, cada uno con una duración de entre 2 y 3 minutos, lo que asegura la hidratación continua del cultivo de tomate y la dosificación adecuada de nutrientes. La distribución detallada de los horarios puede consultarse en la Tabla 5.9 del Anexo 1.

Para buscar el óptimo desempeño de las plantas y la producción, se prepara una solución nutritiva de macroelementos (calcio, nitrógeno, potasio, fósforo) en 4 contenedores distintos. Debido a las características de esta mezcla, es importante tenerla en movimiento 10 minutos por día. Para este fin, se utiliza un soplador que se puede observar en la Figura 3.6.

Debido a las características del suelo y los requerimientos del cultivo, el riego de agua necesario para cada planta es de 3 litros de agua por día y 12 minutos de riego con agroquímicos.

Para gestionar las prácticas descritas previamente, se emplea un programador de riego (ver figura 3.8). Este dispositivo regula la apertura de las válvulas y coordina los horarios establecidos para la distribución de agua y fertilizantes, asegurando una operación eficiente y automatizada.



Figura 3.6: Fotografía de tinacos de almacenamiento para el fertirriego



Figura 3.7: Fotografía de la placa de identificación del soplador

Finalmente, la cosecha del tomate se realiza una vez por semana con 12 cortes por ciclo. La producción aproximada es de 6 kg de tomate/m²/un ciclo.

El propietario menciona las dificultades que enfrenta en el invernadero para producir tomate debido al consumo energético y al costo de sus recibos de luz, que oscilan entre \$3,000 y \$5,000 mensuales; esta situación revela la necesidad de evaluar alternativas como un sistema fotovoltaico. El servicio eléctrico opera bajo la tarifa RABT (Riego Agrícola en Baja Tensión), la cual incluye cargos por energía, demanda y costos regulados del Mercado Eléctrico Mayorista, lo que mantiene elevados los costos incluso con consumos moderados [73–75]. En este contexto, un sistema fotovoltaico autónomo surge como una opción para reducir parte del consumo proveniente de CFE y disminuir los costos operativos del invernadero.



Figura 3.8: Fotografía del programador de riego

La Tabla 3.2 presenta una síntesis de las características estructurales y operativas del invernadero de San Miguel Caltepanitla, incluyendo su ubicación, extensión, condiciones de temperatura, sistema de riego y parámetros de cultivo. Esta información constituye la base para el modelado energético y el análisis posterior del sistema.

Tabla 3.2: Síntesis de datos de invernadero en San Miguel Caltepanitla

Ubicación:	Tecoautla
Clasificación:	Invernadero tipo cenital
Extensión:	2,496 m ²
Cultivo:	Tomate
Temperaturas	
Día	35 a 45 °C
Noche	10 a 18 °C
Ciclos de siembra/año:	2
Tipo de ventilación:	Pasiva
Distancia de siembra	
Entre planta y planta	40 cm
Entre líneas	120 cm
Número de plantas:	8,320
Riego	
Sistema de riego	Goteo
Tiempo de espera	3 minutos
Cantidad de agua por planta	3 litros
Polinización	
Cable	2 veces/día
Cosecha	
1 vez por semana	
Cortes por ciclo	12 cortes
Cantidad cosechada/m ² /ciclo	6 kg

c) Amanalco de Becerra, Amanalco



Figura 3.9: Fotografía del exterior del invernadero en Amanalco De Becerra

En Amanalco de Becerra, Amanalco, se visitó un tercer invernadero dedicado a la producción de tomates. Este invernadero también se estudió por sus prácticas agrícolas modernas y su impacto en la producción hortícola. Se evaluaron las instalaciones y procesos operativos para entender mejor su contribución al sector agrícola local.

El invernadero es de tipo cenital, con estructura metálica y cubierta de polietileno reforzado, y mallas antiáfidos que permiten una ventilación pasiva, manteniendo la temperatura entre 23-25 °C durante el día y 15-17 °C por la noche. Con una extensión de 280 m², realiza dos ciclos de producción de tomate al año. Las plantas se siembran a 30 cm de distancia entre ellas y 80 cm entre líneas, con un total de 326 plantas.



Figura 3.10: Ilustración representativa de distancia de siembra en invernadero en Amanalco de Becerra

El riego se realiza por goteo, con cintas emisoras de agua que alcanzan cada planta en 4

minutos. Se utiliza una bomba de 1/2 HP para bombear el agua desde un tinaco a nivel del suelo. Cada planta necesita 2.5 litros de agua diaria, y los agroquímicos se aplican de manera foliar con una mochila fumigadora. La polinización se realiza manualmente sacudiendo las plantas una vez al día.

La cosecha se realiza una vez por semana durante los dos ciclos anuales, logrando 3 kg de tomate por m² en cada ciclo. La producción total por ciclo es de 6 cortes.



Figura 3.11: Fotografía de planta de tomates en Amanalco de Becerra

En la Figura 3.11 se observa un tomate listo para cosechar aproximadamente a las 10 semanas tras el trasplante. A continuación, se presenta una tabla con la síntesis de datos de este invernadero.

La Tabla 3.3 presenta una síntesis de las características estructurales y operativas del invernadero de Amanalco de Becerra, incluyendo su ubicación, extensión, condiciones de temperatura, sistema de riego y parámetros de cultivo. Esta información constituye la base para el modelado energético y el análisis posterior del sistema.

Tabla 3.3: Síntesis de datos de invernadero en Amanalco de Becerra

Ubicación:	Amanalco
Clasificación:	Invernadero tipo cenital
Extensión:	280 m ²
Cultivo:	Tomate
Temperaturas	
Día	23 a 25 °C
Noche	15 a 17 °C
Ciclos de siembra/año:	2
Tipo de ventilación:	Pasiva
Distancia de siembra	
Entre planta y planta	30 cm
Entre líneas	80 cm
Número de plantas:	326
Riego	
Sistema de riego	Goteo
Tiempo de espera	4 minutos
Cantidad de agua por planta	2.5 litros
Polinización	
Manual (Sacuden plantas)	1 vez/día
Cosecha	
1 vez por semana	
Cortes por ciclo	6 cortes
Cantidad cosechada/m ² /ciclo	3 kg

Las visitas a los invernaderos de San Antonio Albarranes, San Miguel Caltepanitla, y Amanalco de Becerra resaltaron la importancia de la eficiencia y la innovación en la producción de tomates en entornos controlados. Estas experiencias enriquecieron el conocimiento sobre operaciones agrícolas modernas y la integración de tecnología y buenas prácticas, fundamentales para el análisis de la agricultura sostenible y la producción de alimentos de alta calidad.

3.2. Análisis de consumo y desempeño de los invernaderos

Este análisis se centra en la evaluación del consumo de agua y energía, así como el desempeño agrícola de tres invernaderos dedicados a la producción de tomate. Estos datos son

fundamentales para identificar oportunidades de mejora y optimización en la gestión de los recursos y la eficiencia en la producción. A continuación, se presentan los resultados en forma de tablas de cada invernadero.

Tabla 3.4: Análisis de consumo y desempeño en San Antonio Albarranes

San Antonio Albarranes, Temascaltepec		
Consumo de agua		
Capacidad en plantas	9000	Plantas
Litros de agua / planta / día	1.5	Litros
Agua / invernadero / día	13500	Litros
Agua / invernadero / bimestre	810000	litros / bimestre
Desempeño agrícola		
Capacidad de invernadero	3250	m ²
Cosecha por ciclo	15	kg/m ²
Cosecha total por ciclo	48750	kg de tomates por ciclo
Cosecha total por bimestre	48.75	t de tomates / ciclo
Cosecha total por ciclo	12.188	t de tomates / bimestre

El invernadero de San Antonio Albarranes muestra un consumo de agua significativo, utilizando 810,000 litros por bimestre. A pesar de esto, su desempeño agrícola es notable, logrando una producción de 12.188 toneladas de tomate por bimestre. Esto se logra sin necesidad de utilizar energía eléctrica, gracias a las prácticas específicas implementadas en su operación.

Tabla 3.5: Análisis de consumo y desempeño en San Miguel Caltepanitla

San San Miguel Caltepanitla, Tecozautla		
Consumo de agua		
Capacidad en plantas	8320	Plantas
Litros de agua / planta / día	3	Litros
Agua / invernadero / día	24960	Litros
Agua / invernadero / bimestre	1497600	litros / bimestre
Desempeño agrícola		
Capacidad de invernadero	2496	m ²
Cosecha por ciclo	6	kg/m ²
Cosecha total por ciclo	14976	kg de tomates por ciclo
Cosecha total por bimestre	14.98	t de tomates / ciclo
Cosecha total por ciclo	3.744	t de tomates / bimestre
Consumo energético		
Soplador	15.00003	kWh/bimestre
Bomba para llenar tanque	671.4	kWh/bimestre
Bombeo sistema de riego agua	180	kWh/bimestre
Controlador de riego	32.384	kWh/bimestre
Bombeo sistema de riego agroquímicos	72	kWh/bimestre
Consumo Total (kWh/bimestre)	970.784	kWh/bimestre

El invernadero en San Miguel Caltepanitla destaca por su consumo de agua de 1,497,600 litros por bimestre, lo que es significativamente mayor que el consumo del invernadero en San Antonio Albarranes. Su desempeño agrícola es inferior, con una producción de 3.744 toneladas de tomate por bimestre. Además, su consumo energético es de 970,784 kWh por bimestre, lo que sugiere una mayor dependencia de fuentes energéticas no renovables.

Tabla 3.6: Análisis de consumo y desempeño en Amanalco de Becerra

Amanalco de Becerra, Amanalco		
Consumo de agua		
Capacidad en plantas	326	Plantas
Litros de agua / planta / día	2.5	Litros
Agua / invernadero / día	815	Litros
Agua / invernadero / bimestre	48900	litros / bimestre
Desempeño agrícola		
Capacidad de invernadero	280	m ²
Cosecha por ciclo	3	kg/m ²
Cosecha total por ciclo	840	kg de tomates por ciclo
Cosecha total por bimestre	0.84	t de tomates / ciclo
Cosecha total por ciclo	0.21	t de tomates / bimestre
Consumo energético		
Bombeo sistema de riego agua	114	kWh/bimestre
Consumo Total (kWh/bimestre)	114	kWh/bimestre

El invernadero en Amanalco de Becerra tiene un consumo de agua muy bajo, con solo 48,900 litros por bimestre. Su desempeño agrícola es muy bajo, con solo 0.21 toneladas de tomate por bimestre, al igual que su consumo energético, con solo 114 kWh por bimestre. A continuación, se presentan los datos de los invernaderos en forma de gráficos para facilitar la comprensión y visualización de los resultados. Los gráficos muestran el consumo de agua y energía, así como el desempeño agrícola de cada invernadero.

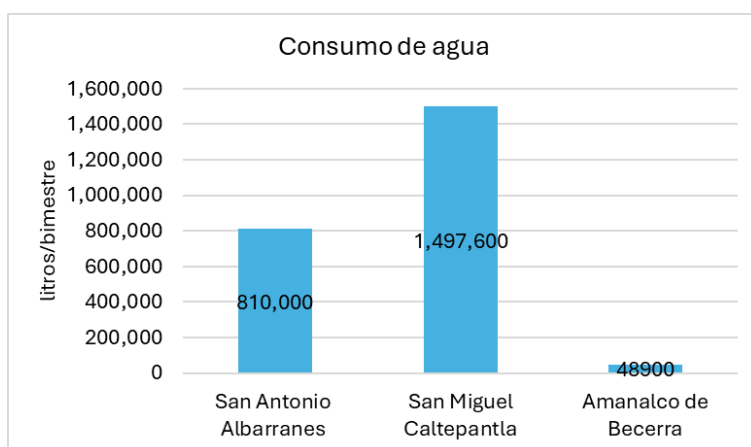


Figura 3.12: Análisis de consumo hídrico en invernaderos (Elaboración propia, 2024)

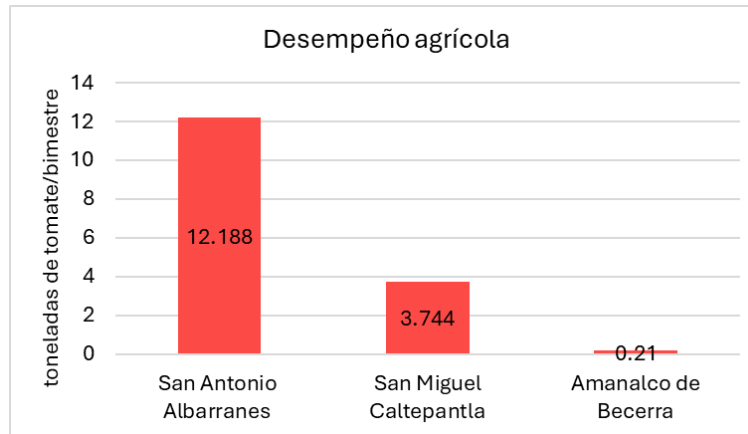


Figura 3.13: Análisis de desempeño agrícola en invernaderos (Elaboración propia,2024)

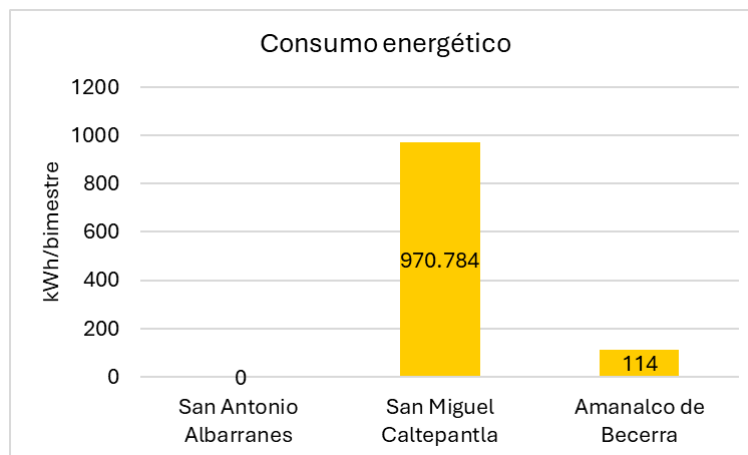


Figura 3.14: Análisis de consumo energético en invernaderos (Elaboración propia,2024)

En vista de los datos presentados, el invernadero en San Miguel Caltepanitla se destaca por su consumo de agua y energía, lo que sugiere una mayor dependencia de fuentes no renovables. Sin embargo, su desempeño agrícola es inferior al de los otros invernaderos. Por lo tanto, se considera que es un modelo adecuado para la propuesta de instalación de sistemas fotovoltaicos, ya que su consumo energético es significativo y podría ser reducido mediante la utilización de energía renovable. Esto no solo reduciría los costos de energía, sino que también contribuiría a una mayor sostenibilidad en la producción agrícola.

Con base en la información técnica y productiva recopilada directamente con los productores de los tres invernaderos analizados, fue posible identificar patrones reales de consumo hídrico, energético y desempeño agrícola representativos de la región. Por esta razón, se presentan las Figuras 3.12, 3.13 y 3.14, las cuales permiten visualizar de manera comparativa dichos indicadores y facilitan la interpretación de las diferencias entre los sistemas evaluados. A partir de este análisis, se definieron los parámetros operativos, supuestos de consumo y características productivas del invernadero propuesto, asegurando que el caso de estudio refleje condiciones reales de operación.

3.3. Datos de invernadero propuesto

Para la generación de un ICV se elaboró un diagnóstico energético de un invernadero para recolectar datos. El presente análisis de consumo energético del invernadero propuesto se enfoca en un invernadero cenital ubicado en el Estado de México, con una extensión total de 2,400 m² y dos ciclos de producción de tomate al año. El invernadero tiene 8,500 plantas, distribuidas en líneas separadas por 120 cm y 40 cm.

Las condiciones climáticas del invernadero varían entre 35 y 45 °C durante el día y 10 y 18 °C durante la noche. El sistema de riego del invernadero consta de un pozo, un tanque elevado y dos bombas eléctricas; una de 7.5 HP que bombea el agua del pozo al tanque durante 2 horas al día, y otra de 4 HP que se utiliza para regar el cultivo durante 12 horas al día.

El objetivo de este análisis energético es identificar oportunidades de mejora en la eficiencia energética del invernadero, optimizando el uso de energía en los sistemas de riego y preparación de la solución nutritiva.

En la tabla que se presenta a continuación se documenta el censo de cargas del invernadero que empezará a ser tomado como invernadero propuesto para el desarrollo de la investigación.

Tabla 3.7: Censo de cargas de invernadero (Elaboración propia, 2024)

Equipo	(Horas uso/día)	(Horas uso/bimestre)	Potencia (W)	Consumo (kWh/bimestre)
Soplador	0.17	10	1500	15
Bomba llenado de tanque	2.00	120	5595	671
Bombeo sistema de riego agua	1.00	60	3000	180
Controlador de rie- go	1.33	80	404.8	32
Bombeo riego agro- químicos	0.40	12	3000	72
Consumo total				971 kWh/bimestre

En la Figura 3.15 se observa una gráfica porcentual en la que, de los datos representados, el 69 % del consumo eléctrico en el invernadero es debido al uso de la bomba para llenar el tanque de almacenamiento de agua; el 19 % es el consumo energético requerido para el riego de agua a las plantas, seguido del riego de agroquímicos.

En base a lo anterior, a continuación, se presenta una tabla a modo de síntesis de los datos para el diseño del invernadero propuesto para el ACV.

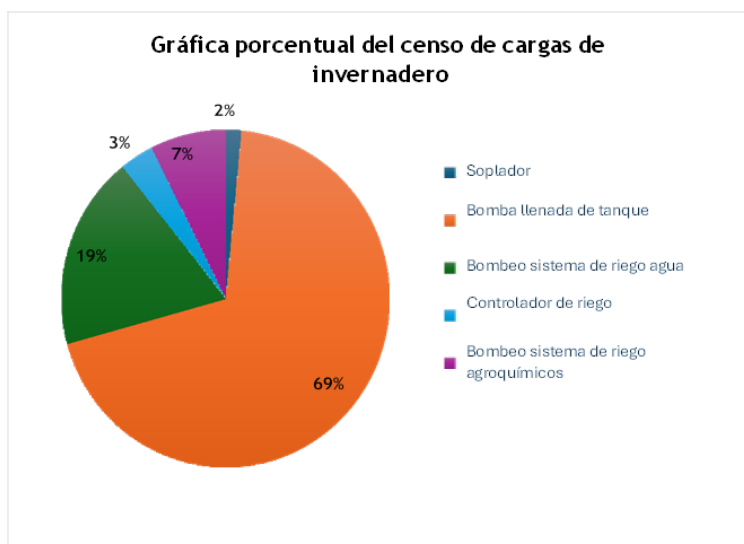


Figura 3.15: Gráfica porcentual del censo de cargas del invernadero (Elaboración propia,2024)

Tabla 3.8: Características del invernadero

Ubicación y características generales	
Ubicación	Estado de México
Clasificación	Invernadero tipo cenital
Extensión	2400 m ²
Cultivo	Tomate
Temperaturas	
Día	35 a 45°C
Noche	10 a 18°C
Ciclos de siembra/año	2
Ventilación y siembra	
Tipo de ventilación	Pasiva
Entre planta y planta	40 cm
Entre líneas	120 cm
Número de plantas	8500
Riego	
Sistema de riego	Goteo
Tiempo de espera	4 minutos
Cantidad de agua por planta	2.5 litros
Equipos requeridos	
Soplador	1500 W
Bomba 7.5 HP	5595 W
Bomba 4 HP	3000 W
Controlador de riego	400 W
Bomba agroquímicos 4 HP	3000 W

A continuación, se presentan los cálculos más relevantes para el invernadero propuesto.

3.4. Sistemas que componen el invernadero propuesto

En esta sección se presentarán los sistemas que componen el invernadero, los cuales han sido diseñados para optimizar el uso de recursos y mejorar la eficiencia operativa del cultivo. Se abordarán en detalle tres componentes clave: el sistema de riego, que garantiza una distribución eficiente del agua para el cultivo de tomate; el sistema de control climático, que regula las condiciones ambientales dentro del invernadero para asegurar un entorno óptimo para el crecimiento de las plantas; y el sistema de abastecimiento energético, que aprovecha la energía solar para proporcionar una fuente sostenible de electricidad. La integración de estos sistemas no solo mejora la productividad y sostenibilidad del invernadero, sino que también reduce su huella ambiental al maximizar el uso de energías renovables y minimizar el consumo de recursos.

a). Distribución de plantas y consúmo hídrico del invernadero propuesto

Datos del invernadero:

- Área: 2,400 m²
- Dimensiones: 50 m de largo x 48 m de ancho
- Altura total: 11 m (8 m antes de los arcos + 3 m de los arcos)

Volumen total del invernadero:

1. Parte rectangular: Este es el volumen de la estructura principal, que tiene una base de 50 m x 48 m y una altura de 8 m
2. Parte semicircular: Esta es la parte de los arcos en la parte superior del invernadero, que tiene una altura adicional de 3 m.

Cálculo del volumen de la parte rectangular:

$$V_{\text{rectangular}} = 50 \text{ m} \times 48 \text{ m} \times 8 \text{ m} = 19,200 \text{ m}^3 \quad (3.1)$$

Cálculo del volumen de la parte semicircular:

El volumen de la parte semicircular se puede aproximar al volumen de un cilindro (dado que el arco es semicircular).

El radio r de la semicircunferencia es igual a la altura de los arcos, que es de 3 m.

$$V_{\text{semicircular}} = \frac{1}{2} \times \pi \times (3 \text{ m})^2 \times 50 \text{ m} = 706.86 \text{ m}^3 \quad (3.2)$$

Volumen total del invernadero:

$$V_{\text{total}} = 19,200 \text{ m}^3 + 706.86 \text{ m}^3 = 19,906.86 \text{ m}^3 \quad (3.3)$$

Distribución de plantas:

- Espaciado entre líneas: 120 cm (1.2 m)
- Espaciado entre plantas en una línea: 40 cm (0.4 m)

Cálculo del número de líneas y plantas por línea

- Ancho útil del invernadero para líneas de plantas:

$$N_{\text{líneas}} = \frac{\text{Ancho del invernadero}}{\text{Espaciado entre líneas}} = \frac{48 \text{ m}}{1.2 \text{ m/línea}} = 40 \text{ líneas} \quad (3.4)$$

- Número de plantas por línea:

$$N_{\text{plantas/línea}} = \frac{\text{Longitud del invernadero}}{\text{Espaciado entre plantas}} = \frac{50 \text{ m}}{0.4 \text{ m/planta}} = 125 \text{ plantas} \quad (3.5)$$

- Número total de plantas por:

$$N_{\text{total de plantas}} = N_{\text{líneas}} \times N_{\text{plantas/línea}} = 40 \text{ líneas} \times 125 \text{ plantas} = 5,000 \text{ plantas} \quad (3.6)$$

Tabla 3.9: Resumen de distribución de plantas dentro del invernadero

Parámetro	Valor
Área total del invernadero	2,400 m ²
Número de líneas de plantas	40
Número de plantas por línea	125
Número total de plantas	5,000
Espaciado entre líneas	1.2 m
Espaciado entre plantas	0.4 m

Descripción:

Invernadero de tipo cenital ubicado en el Estado de México, con una extensión total de 2,400 m² y dos ciclos de producción de tomate al año. El invernadero tiene 5,000 plantas, distribuidas en líneas separadas por 120 cm y 40 cm, como se ve en la Figura 3.16. Las plantas se siembran en macetas de 10 L y se ubican sobre canaletas. Las condiciones climáticas del invernadero varían entre 35 a 45 °C durante el día y 10 a 18 °C durante la noche.



Figura 3.16: Ilustración representativa de distancia de siembra en invernadero propuesto

Diseño de Acomodo:

a) Canaletas:

- Las plantas se colocan sobre canaletas que recorren toda la longitud de las líneas, con una inclinación adecuada para el drenaje.

b) Pasillos de Acceso:

- Pasillos entre líneas: Considera dejar un pasillo más amplio cada 10 líneas (120 cm), permitiendo un acceso cómodo para el mantenimiento y la cosecha.
- Ancho de pasillo: Aproximadamente 60 cm

Configuración de las Válvulas

- Número de plantas: 5,000 distribuidas en líneas separadas 40cm entre planta y planta.
- Longitud total de las líneas de riego: Suponiendo que cada línea de riego cubre 50 m (la longitud del invernadero).
- Separación entre líneas: 1.2 m (cada línea corre a lo largo del invernadero, de un lado al otro de los 48 m de ancho).

Entonces, el número de líneas de riego se calcula dividiendo el ancho del invernadero por la separación entre las líneas de riego:

$$\frac{48 \text{ m}}{1.2 \text{ m}} = 40 \quad (3.7)$$

Con 40 líneas de riego y cada línea cubriendo el largo de 50 m, la distribución correcta consiste en espaciar estas líneas cada 1.2 m a lo ancho del invernadero de 48 m. Esto maximiza el uso del espacio y asegura que cada planta reciba la cantidad adecuada de agua directamente en la raíz, lo que es crucial para la eficiencia del riego por goteo.

- Número de válvulas solenoides:

Separación entre líneas de riego: 1.2 m

Número total de líneas de riego: 40

Número de zonas de riego: 5

Líneas de riego por zona: $40/5=8$ líneas por zona de riego

Número total de válvulas solenoides: 5 (una por cada zona de riego)

- Modelo sugerido para válvulas: Válvula Eléctrica Hunter PGV-101G

Tamaño: 1 pulgada

Presión máxima: Hasta 12-150 PSI

Operación: 24V AC

Incluye Solenoide y Control de Flujo

Número de goteros

Número de goteros por línea:

$$N_{\text{got/linea}} = \frac{50 \text{ m}}{0.4 \text{ m/gotero}} = 125 \text{ goteros/linea} \quad (3.8)$$

Total de goteros por zona:

$$N_{\text{got/zone}} = 125 \text{ goteros/linea} \times 8 \text{ líneas} = 1,000 \text{ goteros/zona} \quad (3.9)$$

Total de goteros en el invernadero:

$$N_{\text{got/total}} = 1,000 \text{ goteros/zona} \times 5 \text{ zonas} = 5,000 \text{ goteros} \quad (3.10)$$

Requerimientos de agua

Agua de riego por planta: 3L/planta/día.

Total de agua necesaria:

$$V_{\text{agua}} = 3 \text{ L/planta} \times 5,000 \text{ plantas} = 15,000 \text{ L/día} \quad (3.11)$$

Distribución del agua

Tiempo de riego: 11 minutos (660 s) para la solución nutritiva.

Caudal necesario por línea de riego:

$$Q_{\text{línea}} = \frac{15,000 \text{ L}}{40 \text{ líneas}} = 375 \text{ L/línea/día} \quad (3.12)$$

Caudal por línea de riego por segundo:

$$Q_{\text{línea,seg}} = \frac{375 \text{ L/línea}}{720 \text{ s}} = 0.52 \text{ L/s por línea} \quad (3.13)$$

Cálculo del sistema de riego por goteo

Caudal de los goteros (asumido): 2 L/h por gotero.

Número de goteros por planta: 1 gotero/planta.

Total de goteros en el invernadero: 5,000 goteros.

Selección de tuberías

Para transportar el agua desde los tanques de tratamiento hasta los goteros, se seleccionan tuberías basadas en el caudal y la presión necesarias. Diámetro de tuberías

Usando la ecuación de continuidad:

$$Q = A \times v \quad (3.14)$$

donde: Q es el caudal, A el área de la sección transversal, y v la velocidad del flujo.

Asumiendo una velocidad de flujo $v = 1 \text{ m/s}$ (para evitar altas pérdidas por fricción):

$$A = \frac{0.5 \text{ L/s} = 0.0005 \text{ m}^3/\text{s}}{1 \text{ m/s}} = 0.0005 \text{ m}^2 \quad (3.15)$$

Calculando el diámetro necesario:

$$A = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad (3.16)$$

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{0.0005}{\pi}} = 0.0252 \text{ m} = 25.2 \text{ mm} \quad (3.17)$$

Se selecciona una tubería comercial de 1 pulgada (25.4 mm) de diámetro.

Cálculo de la longitud total de manguera para riego

Cada línea de riego tiene una manguera que recorre la longitud completa del invernadero (48 m).

Dado que existen 40 líneas de riego:

$$L_{\text{manguera}} = 40 \text{ líneas} \times 48 \text{ m} = 1,920 \text{ m} \quad (3.18)$$

Mangueras adicionales para conexiones y distribución principal

Además de las mangueras en cada línea, se requieren mangueras adicionales para la conexión desde la bomba hasta la tubería principal. Considerando la distancia entre el tanque de agua limpia y el invernadero, junto con la distribución interna, se estiman las siguientes longitudes:

- Desde el tanque hasta el invernadero: 50 m (valor estimado, puede variar según la disposición real).
- Distribución principal dentro del invernadero: 10 m adicionales para conexiones.

Longitud total de manguera

Sumando todas las mangueras necesarias:

$$L_{\text{total}} = 1,920 \text{ m (líneas de riego)} + 30 \text{ m (tanque a invernadero)} = 1,950 \text{ m} \quad (3.19)$$

Selección del diámetro de la manguera

Caudal por gotero: 2 L/h. Número de goteros: 5,000.

$$Q_{\text{total}} = \frac{5,000 \text{ goteros} \times 2 \text{ L/h}}{3,600 \text{ s}} = 2.78 \text{ L/s} \quad (3.20)$$

Velocidad recomendada del agua en la manguera: 1 m/s.

Usando la ecuación de continuidad ($Q = A \times v$):

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{2.78 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{1 \text{ m/s}} = 2.78 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (3.21)$$

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2 \times \sqrt{\frac{2.78 \times 10^{-3}}{\pi}} \approx 0.059 \text{ m} = 59 \text{ mm} \quad (3.22)$$

Por lo tanto, se seleccionan los siguientes diámetros comerciales:

- **60 mm** para la manguera principal de distribución.
- **25 mm** para las líneas de riego.

Cálculo de los metros de tubería

a) Tubería principal La tubería principal conecta el tanque de agua limpia con el invernadero y distribuye el flujo a las líneas de riego.

- Distancia del tanque al invernadero: 50 m.
- Distribución interna en el invernadero: 10 m.

$$L_{\text{principal}} = 50 \text{ m} + 10 \text{ m} = 60 \text{ m} \quad (3.23)$$

b) Tubería secundaria (para las líneas de riego) Cada línea de riego tiene una longitud de 48 m. Número de líneas de riego: 40.

$$L_{\text{secundaria}} = 40 \times 48 \text{ m} = 1,920 \text{ m} \quad (3.24)$$

Cálculo de conexiones

Las conexiones necesarias incluyen los siguientes componentes:

- **Codos de 90°:** Para cambiar la dirección del flujo en la tubería principal y secundaria. Se estiman 10 codos de 60 mm y 10 codos de 25 mm.
- **Tees:** Para dividir el flujo desde la tubería principal hacia las líneas de riego. Se requieren 40 tees de 60 mm (una por cada línea de riego).
- **Reducciones:** Para conectar la tubería principal de 60 mm con las secundarias de 25 mm. Se utilizan 40 reducciones de 60 mm a 25 mm.

Características de la manguera

- **Material:** Polietileno de alta densidad (PEAD), resistente a la intemperie y a los rayos UV.
- **Diámetros:** 60 mm para la tubería principal y 25 mm para las líneas de riego.
- **Presión de trabajo:** 4–6 bar.
- **Resistencia:** Adecuada para soportar la presión de la bomba y los químicos de la solución nutritiva.

b). Sistema de riego y recuperación de agua

El sistema de riego por goteo diseñado para el invernadero de 2,400 m² (50 m x 48 m) en el Estado de México está optimizado para proporcionar una irrigación eficiente y precisa, específicamente ajustado para el cultivo de tomate. Este sistema no solo asegura un suministro adecuado de agua a cada planta, sino que también contribuye significativamente a la conservación del agua y la eficiencia energética.

El agua para riego se extrae de un pozo utilizando una bomba de 7.5 HP durante 2 hrs/día, para filtrarla y llevarla al área técnica donde en un tanque elevado se almacena. A este tanque se le llamará “Tanque de agua limpia” posteriormente.

Después, una parte del agua proveniente del tanque de agua limpia se lleva a los “Tanques de tratamiento” en donde se prepara una solución nutritiva de macroelementos (calcio, nitrógeno, potasio, fósforo) en 4 tanques distintos (TN₁, TN₂, TN₃ y TN₄). Debido a las características de esta mezcla, es importante tenerla en movimiento 10 minutos por día y para esa tarea se utiliza un soplador que se encarga de remover el agua para que haya una buena dilución y evitar sedimentaciones.

Debido a las características del suelo y los requerimientos del cultivo, el riego de agua necesario para cada planta es de 3 litros de agua por día y 12 minutos de riego con la solución nutritiva.

Para el control de las prácticas anteriormente descritas se utiliza el programador de riego Hunter X – CORE que ofrece ajustes inteligentes del riego basados en la evapotranspiración. El dispositivo controla la apertura de las llaves y el horario programado (ver Tabla 1) para la distribución de agua y solución nutritiva.

Con una bomba de 4 HP el agua proveniente del tanque de agua limpia o de los tanques TN₁, TN₂, TN₃ y TN₄ se lleva al invernadero para la distribución y riego a través del uso de mangueras, válvulas y goteros, ya que el sistema de riego a las plantas es por goteo.

El invernadero también cuenta con un sistema de recuperación de agua; en las canaletas escurre el exceso de agua y a través de mangueras el agua se recolecta para llevarse al área técnica en la sección de tratamiento de agua con la misma bomba de 4 HP usada anteriormente. En el área de tratamiento, el agua se filtra y se nivela el pH para poder ser incorporada a los tanques.

Tabla 3.10: Horarios de riego y fertirriego (Datos primarios proporcionados por el productor)

Horario del día	Método	Tiempo de operación (Min)
07:00 am	Fertirriego	3
07:30 am	Fertirriego	3
08:15 am	Bombeo sistema de riego/agua	3
09:00 am	Fertirriego	3
09:15 am	Bombeo sistema de riego/agua	3
10:30 am	Bombeo sistema de riego/agua	3
11:00 am	Bombeo sistema de riego/agua	3
11:40 am	Bombeo sistema de riego/agua	2
12:20 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
01:00 pm	Fertirriego	2
01:30 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
02:00 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
02:30 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
03:00 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
03:40 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
04:20 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
04:45 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
Tiempo total/ día del bombeo sistema de riego (Min)		28
Tiempo total/ día manual- Fertirriego (Min)		11
Tiempo total/ día del bombeo sistema de riego (Min)		0.466
Tiempo total/ día manual- Fertirriego (Hrs)		0.183

Componentes del sistema de riego

1. Tuberías y goteros

El sistema cuenta con 40 líneas de riego que recorren los 50 metros de longitud del invernadero, cada línea está equipada con goteros espaciados cada 40 cm, lo que corresponde a la distancia entre plantas. Esto permite que cada planta reciba directamente el agua y los nutrientes necesarios sin desperdicio. Se utilizan aproximadamente 5,000 goteros en total, cada uno con un caudal de 2 L/h, proporcionando un suministro de agua meticulosamente controlado.

2. Sistema de válvulas

El riego se controla mediante cuatro válvulas solenoides principales, cada una manejando una sección del invernadero. Esto permite una gestión más efectiva y específica del riego en diferentes áreas, adaptándose a las necesidades particulares de las plantas o a condiciones variables del suelo y el ambiente.

3. Automatización y Control

El sistema de riego está completamente automatizado y se integra con sensores de humedad del suelo que proporcionan datos en tiempo real sobre la necesidad de agua de las plantas.

Un controlador central basado en Arduino gestiona la operación de las válvulas en función de la información recibida de los sensores, asegurando que el riego se realice de manera eficiente y sólo cuando sea necesario, lo que minimiza el uso de agua y reduce el costo operativo.

Este sistema está diseñado para maximizar la eficiencia del agua, uno de los recursos más críticos en la agricultura. Al entregar agua directamente a la base de cada planta, se minimiza la evaporación y el escurrimiento, lo que es especialmente importante en las áreas áridas o durante temporadas secas. Además, la capacidad de ajustar el riego según las condiciones específicas del suelo y el clima ayuda a prevenir la sobresaturación y el estrés hídrico de las plantas, lo que puede mejorar significativamente la salud de las plantas y el rendimiento de los cultivos.

- Fuente de Agua: El agua se suministra desde un pozo mediante una bomba de 7.5 HP que transporta el agua a un tanque de almacenamiento elevado, asegurando una presión adecuada en todo el sistema.
- Bomba de Riego: Una bomba adicional de 4 HP se utiliza para el sistema de riego por goteo, operando 12 horas al día para garantizar una distribución uniforme del agua y nutrientes.

Configuración del sistema de riego por goteo y recuperación de agua

- Capacidad de las bombas: 7.5 HP para el pozo y 4 HP para riego.
- Duración de bombeo del pozo: 2 horas al día
- Duración de riego: 12 horas al día.

c). Sistema de control climático

Pantallas térmicas

Las pantallas térmicas son telas formadas por una combinación de tejidos de poliéster dotados de una fina capa de aluminio entretejida con hilo de acrílico absorbente.

Equilibran la temperatura ambiente de los invernaderos manteniendo los niveles óptimos para el cultivo.

El sistema aprovecha la energía solar para retener calor en las estaciones más frías. Esto supone un importante ahorro energético.

a) *Configuración del sistema de control climático*

Las condiciones climáticas del invernadero varían entre 35 a 45 °C durante el día y 10 a 18 °C durante la noche. Por lo tanto, se presenta a continuación la lógica de control que se propone para el invernadero.

Tabla 3.11: Lógica de control

Lógica de control				
Parámetro	Día	Acción	Noche	Acción
Temperatura	<35	Activación de pantallas térmicas	<10	Activar pantallas térmicas para mantener el calor.
	>45	Abrir ventanas en el techo. Si la temperatura sigue subiendo, activar ventiladores.		

b) *Sistema de control y monitoreo*

★ **Controlador central: Arduino Mega 2560**

- Capacidad: Maneja múltiples entradas/salidas para la conexión de sensores, servomotores y módulos de relé.

★ **Módulos de Relé**

- Descripción: Controlan la activación de ventiladores y servomotores.
- Modelo: Módulo de relé de 8 canales.

★ **Monitoreo y Alarma**

- Pantalla LCD: Para mostrar la temperatura y estado de cada componente.
- Sistema de Alarma: Un buzzer conectado al sistema Arduino para alertar en caso de mal funcionamiento o temperatura extrema.

1) Ventiladores

En el invernadero con un volumen total de 12,000 m³ y una tasa de 60 renovaciones por hora, la capacidad requerida es de 720,000 m³/h.

Dividiendo esta capacidad entre ventiladores de 50,000 m³/h, serían necesarios al menos 15 ventiladores.

La distribución de los ventiladores debe centrarse en ubicarlos uniformemente a lo largo del invernadero, considerando su orientación cenital, para maximizar la extracción de calor acumulado y mantener una temperatura uniforme dentro del espacio.

2) Sensores de temperatura y humedad

Sensores DHT22 (AM2302):

- ★ Cantidad: 8 sensores distribuidos de manera uniforme.

- ★ Ubicación: 4 sensores en las esquinas del invernadero, a 2 metros del suelo. Los otros 4 sensores se colocan en puntos medios a lo largo del invernadero, también a 2 metros de altura.

Sensores de Techo (DS18B20):

- ★ Cantidad: 4 sensores en total.
- ★ Ubicación: un sensor en cada esquina del techo del invernadero, lo más cerca posible de las áreas donde se abrirán las ventanas para medir la temperatura del aire superior.

3) Pantallas térmicas

Servomotores MG995:

- ★ Cantidad: 6 servomotores distribuidos para controlar las pantallas térmicas a lo largo del invernadero.
- ★ Ubicación: los servomotores en puntos centrales a lo largo de las estructuras de soporte del invernadero, permitiendo un despliegue uniforme de las pantallas.

4) Apertura de ventanas en el techo

Control de ventanas

Servomotores HS-785HB:

- ★ Cantidad: 4 servomotores.
- ★ Ubicación: servomotor en cada esquina del techo para controlar la apertura de las ventanas.

d). Sistemas de abastecimiento energético

La selección adecuada de módulos solares y el dimensionamiento correcto del sistema son pasos fundamentales para garantizar un rendimiento óptimo. A continuación, se presenta el cálculo y selección de un sistema fotovoltaico diseñado para una ubicación con condiciones favorables de radiación solar, como el Estado de México.

Cálculo de consumo energético y dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Paso 1: Calcular el Consumo Energético Anual

Para determinar el consumo energético anual, se tomó como referencia un consumo bimestral de **970.784 kWh**, lo que resulta en un total de **5824.704 kWh anuales**. Este valor representa la energía necesaria para satisfacer la demanda eléctrica del usuario en un año.

Paso 2: Determinar la Producción Anual por kWp

Se utilizó información de herramientas reconocidas como:

- National Renewable Energy Laboratory (NREL) con su herramienta PVWatts Calculator, que estima la generación fotovoltaica basada en ubicaciones específicas.
- International Energy Agency (IEA) y su programa Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS - Task 1) [76], que proporciona estimaciones detalladas de la producción solar a nivel global.

Para una región como el Estado de México, con una radiación solar anual favorable, se considera un valor medio de 1,350 kWh/kWp/año.

Paso 3: Calcular los kWp Necesarios

Con base en los datos anteriores, se calcularon los kWp necesarios para satisfacer el consumo anual. Este valor se determinó dividiendo el consumo total entre la producción anual por kWp:

$$kWp = \frac{5824.704 \text{ kWh}}{1350 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp} \cdot \text{año}}} = 4.31 \text{ kWp} \quad (3.25)$$

Esto significa que se requieren aproximadamente 4.31 kWp para cubrir la demanda eléctrica anual.

A) Módulos fotovoltaicos

Selección de Módulos

Se eligió el módulo Canadian Solar Hiku 420 W Monocristalino con una capacidad de 0.42 kWp por módulo. Para alcanzar los 4.31 kWp, se necesitarán 10.27 módulos (aproximadamente 11 módulos, redondeando hacia arriba).

Características del Módulo Fotovoltaico

En la siguiente tabla se presentan las especificaciones técnicas del módulo seleccionado:

Tabla 3.12: Características del módulo fotovoltaico Canadian Solar 420 W

Características del módulo Canadian Solar 420 W	
Elemento	Descripción
Tamaño del módulo	$2108 \times 1048 \times 40$ mm
Masa	24.9 kg
Estructura	Aleación de aluminio
Vidrio frontal	Vidrio templado 3.2 mm
Espesor de la lámina EVA	0.5 mm
Espesor de la lámina posterior	200 ± 20 μ m
Vida útil	25 años
Dimensión de célula	156×156 mm ²
Eficiencia de las células	21 %
Área del módulo	1.65 m ²
Parámetros eléctricos	
Radiación solar anual	1,580 kWh/m ² ·año
Tensión en circuito abierto (Voc)	49.5 V
Tensión óptima de funcionamiento	39.5 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	11.25 A
Corriente óptima de funcionamiento	10.65 A
Potencia máxima en STC	420 W
Temperatura de operación	Menos de 40 °C a +85 °C
Voltaje máximo del sistema	1,000 V DC
Capacidad máxima del fusible en serie	20 A
Tolerancia de potencia	± 5 %
Irradiancia	1000 W/m ² , temperatura del módulo 25 °C

B) Microinversores

Para este sistema fotovoltaico, se analiza la implementación de microinversores **Enphase IQ8**. A continuación, se presentan los cálculos y características principales:

Producción Anual Esperada

•**Producción promedio por kWp en el Estado de México:** 1,350 kWh/kWp/año (valor estándar basado en ubicaciones con buena radiación solar).

•**Consumo energético anual:** 5,824.704 kWh.

Selección del micro inversor Enphase IQ8

Cada módulo solar de 420 Wp se conecta a un microinversor Enphase IQ8, optimizando la producción de energía. Las especificaciones principales son:

Tabla 3.13: Características del inversor Enphase IQ8

Elemento	Descripción	Unidad
Tensión máxima de entrada	60	V
Eficiencia de conversión máxima	97	%
Producción real	1316.25	kWh/kWp/año
Capacidad en kWp	4.425226211	kWp
Cantidad de microinversores	11	–

El diseño del sistema considera 11 módulos solares de 420 Wp, cada uno con su micro inversor Enphase IQ8. Esto asegura una eficiencia de conversión máxima del 97 %, resultando en una producción ajustada de **6,049.89 kWh/año**, suficiente para cubrir el consumo energético anual estimado de 5,824.704 kWh. La elección de micro inversor proporciona flexibilidad en el diseño, optimización de la energía y confiabilidad del sistema.

3.5. Escenarios propuestos

Escenario 1 (Scn-1): Invernadero con consumo energético total proveniente de la red eléctrica CFE. En este escenario, el invernadero depende completamente de la energía eléctrica proporcionada por la red eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La producción de tomates se realiza utilizando la energía generada por la red eléctrica, lo que implica un consumo constante y no renovable de energía. Este modelo de consumo energético será representado por el siguiente flujo de referencia:

*El consumo de energía (en kWh) asociado a la producción de 1 tonelada de tomates en un invernadero convencional **sin tecnología solar**.*

Abastecimiento energético del Scn-1	
Energía	100 % proveniente de la red eléctrica CFE
Consumo total	(kWh/tomate)

Escenario 2 (Scn-2): Invernadero con consumo energético total proveniente de instalación fotovoltaica.

En este escenario, el invernadero utiliza una instalación fotovoltaica para generar la energía necesaria para su funcionamiento. La energía solar es captada y convertida en electricidad mediante paneles solares, lo que reduce significativamente el consumo de energía de la red eléctrica. Este modelo de consumo energético será representado por el siguiente flujo de referencia:

*El consumo de energía (en kWh) asociado a la producción de 1 tonelada de tomates en un invernadero convencional **con tecnología solar**.*

Abastecimiento energético del Scn-2	
Energía solar	100 % generada por la instalación fotovoltaica
Consumo total	(kWh/tomate)

Al comparar los dos escenarios, se puede evaluar el impacto ambiental y la eficiencia energética de la implementación de tecnología solar en el invernadero. El análisis de ciclo de vida permitirá determinar si la instalación de paneles solares reduce significativamente el consumo de energía de la red eléctrica y, por lo tanto, minimiza el impacto ambiental.

3.6. Fundamento metodológico del ACV económico

El análisis económico desarrollado en este estudio complementa al ACV mediante la aplicación de la metodología de *Life Cycle Costing* (LCC), siguiendo los lineamientos de UNEP/SETAC [66] y las recomendaciones de evaluación financiera para sistemas fotovoltaicos propuestas por IRENA. Su propósito es determinar la viabilidad económica del sistema fotovoltaico considerando los costos y beneficios asociados a su instalación y operación durante la vida útil del proyecto.

En el Capítulo 4 se presenta el desarrollo matemático del modelo económico, que incluye: (1) la estimación de la energía generada anualmente por el sistema, incorporando degradación y desempeño operativo; (2) la construcción del flujo de caja con base en los costos iniciales (CAPEX), costos recurrentes (OPEX) y el beneficio económico por energía no comprada; y (3) el cálculo de los indicadores financieros LCOE, VAN y TIRM. Este fundamento metodológico garantiza coherencia entre la evaluación económica y el ACV ambiental previamente desarrollado, permitiendo una valoración integral del sistema fotovoltaico instalado en el invernadero.

Capítulo 4

Capítulo 4

Análisis de ciclo de vida

Alcances y limitaciones

El presente capítulo se se enmarca en un análisis de ciclo de vida con alcance *de la cuna al uso*, considerando todas las etapas necesarias para la operación energética del invernadero evaluado. El ACV ambiental incluye la producción, transporte, instalación y operación del sistema fotovoltaico, así como el consumo eléctrico anual del invernadero en el escenario convencional. El análisis económico incorpora los costos de inversión, operación, mantenimiento y reemplazos asociados a la tecnología solar, permitiendo estimar su viabilidad financiera a lo largo del ciclo de vida útil.

El estudio se centra en dos dimensiones de evaluación: el impacto ambiental y el desempeño económico. Para el análisis ambiental se emplean dos enfoques complementarios. En primer lugar, se utiliza el método ReCiPe 2016 bajo un enfoque atribucional para cuantificar múltiples categorías de impacto, permitiendo evaluar efectos como ecotoxicidad, uso de recursos y formación de partículas. En segundo lugar, la categoría de Cambio Climático se calcula siguiendo el método del IPCC mediante los potenciales de calentamiento global (GWP) a 100 años, conforme al AR6, lo que asegura coherencia metodológica con los lineamientos internacionales más actualizados. La combinación de ambos métodos fortalece la robustez del análisis, al integrar un enfoque multicriterio (ReCiPe) con una referencia climática estandarizada y ampliamente aceptada (IPCC).

Para la segunda, se aplican indicadores como el costo nivelado de electricidad y la recuperación de inversión. Ambas dimensiones permiten describir de manera integrada los efectos ambientales y financieros derivados de implementar energía solar en un invernadero tipo cenital.

No se incluye un Análisis de Ciclo de Vida Social (S-LCA). Esta exclusión se fundamenta en la limitada disponibilidad de datos primarios, la ausencia de información específica para el sector hortícola regional y las dificultades metodológicas señaladas en la literatura para la aplicación estandarizada del ACV social. Aunque existen guías como las propuestas

por UNEP/SETAC [66], su implementación requiere bases de datos, indicadores y criterios cualitativos que exceden el alcance y los objetivos del trabajo.

Asimismo, el estudio se desarrolla bajo supuestos y promedios representativos del caso de estudio, lo que implica un nivel de incertidumbre inherente al modelado ambiental y económico. No se consideran aspectos agronómicos, variabilidad climática extrema ni impactos indirectos relacionados con mano de obra, mercado o comportamiento de usuarios. En consecuencia, los resultados son válidos para el sistema evaluado bajo un marco metodológico delimitado y un enfoque atribucional.

4.1. Límites del sistema

Objetivo:

El objetivo principal es evaluar los impactos ambientales asociados con la producción de tomates en un invernadero convencional y compararlos con los impactos de un invernadero que utiliza tecnología solar. Esto permitiría determinar si la implementación de tecnología solar en el invernadero de tomates es una alternativa más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

El alcance del estudio se definió bajo un enfoque de *“la cuna al uso”*, lo cual incluye las etapas de extracción de materias primas, fabricación de componentes, transporte donde se utilizará el sistema, montaje en el lugar de operación, así como las fases de operación, mantenimiento y generación eléctrica durante su vida útil.

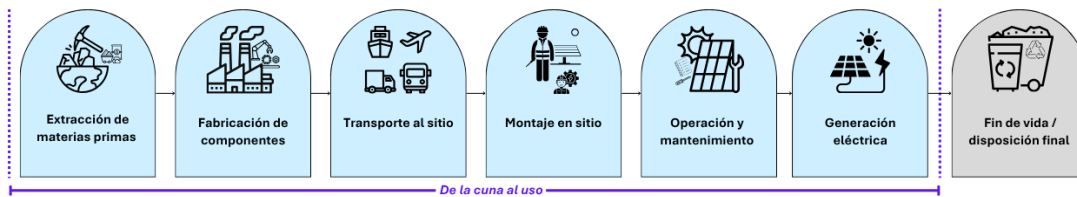


Figura 4.1: Límites del sistema (Elaboración propia, 2025)

Unidad funcional: La producción de 1 tonelada de tomates.

Flujo de referencia: El consumo de energía (en kWh) asociado a la producción de 1 tonelada de tomates en un invernadero convencional sin tecnología solar.

Esta combinación de unidad funcional y flujo de referencia permitirá evaluar el impacto ambiental de la implementación de tecnología solar en términos de la energía consumida por tonelada de tomates producida. De esta manera, se podrá comparar el desempeño energético y ambiental del invernadero con y sin tecnología.

Al establecer la unidad funcional en términos de la producción de tomates y el flujo de

referencia en consumo de energía, se podrá realizar un análisis de ciclo de vida completo y preciso que permita cuantificar los beneficios de la tecnología solar en la producción de tomates en el invernadero.

Función del sistema: La función del sistema es la producción de 1 tonelada de tomates en un invernadero convencional y en uno que utiliza tecnología solar.

4.2. Inventario de ciclo de vida

Para representar con mayor fidelidad el sistema fotovoltaico del caso de estudio, se adaptó un modelo existente en las librerías de SimaPro. El flujo original no reflejaba las condiciones reales de potencia (4.31 kWp), ubicación geográfica (México) ni configuración tecnológica (microinversores). Por ello, se realizaron ajustes en la cantidad de componentes, la geografía de los procesos y la unidad funcional. Estas adaptaciones se desarrollaron bajo un enfoque atribucional, conforme a la norma ISO 14044.

El flujo original utilizado en SimaPro (“Photovoltaic flat-roof installation, 3 kWp, single-Si, on roof {RoW} | photovoltaic flat-roof installation, 3 kWp, single-Si, on roof | Cut-off, U”) corresponde, de manera sencilla, a la instalación típica de un sistema fotovoltaico de 3 kWp sobre azotea, con módulos monocristalinos y la infraestructura básica del sistema.

Para ajustarlo al caso real del invernadero, este flujo se escaló proporcionalmente a 4.31 kWp, generando un proceso adaptado que nombré como (“Invernadero – Photovoltaic flat-roof installation, 4.31 kWp, single-Si, on roof {RoW} | photovoltaic flat-roof installation, 4.31 kWp, single-Si, on roof | Cut-off, U”). En términos simples, este flujo modificado representa el sistema fotovoltaico real del invernadero, compuesto por 11 módulos monocristalinos y 11 microinversores, con una potencia nominal total de 4.31 kWp.

Cuando los datos específicos no están disponibles, es válido utilizar datos representativos, siempre que se documente claramente el procedimiento y las limitaciones asociadas [77]. Además, la transparencia en la adaptación de inventarios es esencial para garantizar la reproducibilidad y credibilidad del estudio [78].

Cada flujo en SimaPro se integra por una cantidad, que representa el valor numérico del material, energía o componente utilizado o emitido por unidad del sistema analizado, y por un parámetro de incertidumbre expresado como la desviación estándar al cuadrado (DS^2). Esta última refleja la variabilidad o fiabilidad del dato, considerando posibles fluctuaciones mediante una distribución estadística, generalmente normal. De este modo, SimaPro no solo cuantifica los flujos, sino que también incorpora la incertidumbre asociada, permitiendo un análisis más robusto y realista del comportamiento del sistema bajo estudio.

Tratamiento y definición técnica de la incertidumbre (DS^2)

DS^2 representa la varianza asociada a una entrada del inventario del análisis de ciclo de vida

(ACV), cuando la distribución de incertidumbre es normal. Es decir, $DS^2 = \sigma^2$, donde σ es la desviación estándar de la cantidad registrada (por ejemplo, en m^2 de panel fotovoltaico).

Esta varianza expresa la incertidumbre estadística alrededor del valor central, utilizada por SimaPro en los cálculos de propagación de incertidumbre (por ejemplo, en el análisis de Monte Carlo).

En *Ecoinvent Data Quality Guidelines, Version 3* [78] se especifica cómo se manejan las incertidumbres y cómo se representan en las bases de datos de SimaPro/Ecoinvent:

“For the normal distribution, the value given in the field ‘standard deviation’ is interpreted as the variance (σ^2) unless otherwise noted.”

El campo DS^2 o $2*DS$ en SimaPro indica la dispersión de la distribución asociada a una entrada. En el caso de una distribución normal, este valor se interpreta como la varianza (DS^2), que describe cuánta variación se espera respecto al valor medio. Este parámetro es clave para representar la incertidumbre inherente a los datos de entrada, y puede ser calculado directamente o escalado proporcionalmente si la cantidad ha sido ajustada, como en este caso para 4.31 kWp. En el “SimaPro Database Manual – Methods Library” [77] se explica que:

“In the input tables, the column ‘ DS^2 or $2*DS$ ’ provides either the variance for normal distributions or 2 times the standard deviation for lognormal distributions. The interpretation depends on the distribution type declared.”

Confirmación del tipo de distribución

En los archivos EcoSpold, el campo `standardDeviation` no siempre representa lo mismo: su significado depende del tipo de distribución estadística asignada al dato. Por esta razón, es necesario identificar primero qué distribución utiliza cada flujo para interpretar correctamente el valor.

En términos generales, EcoSpold utiliza dos interpretaciones:

- ✓ **Distribución normal (“Reg. Normal”):** El valor registrado en `standardDeviation` corresponde a la **varianza** del dato, es decir, σ^2 . En este caso, para obtener la desviación estándar real se debe calcular la raíz cuadrada del valor.
- ✓ **Distribución lognormal, triangular u otras:** En estas distribuciones, el campo puede registrar **dos veces la desviación estándar**, es decir, 2σ . Esto se utiliza cuando el modelo requiere expresar la amplitud de la incertidumbre en lugar de la varianza.

En el flujo analizado dentro de este estudio, la distribución declarada en SimaPro es “**Reg. Normal**”, por lo que el valor en `standardDeviation` debe interpretarse como una **varianza** (σ^2), y no como 2σ . Esta confirmación permite aplicar correctamente la fórmula de incertidumbre recomendada por EcoSpold 01 [79].

4.2.1. Justificación técnica y metodológica para la adaptación de escala de los flujos de la integración del sistema fotovoltaico de 4.31 kWp basado en uno de 3 kWp

Microinversores

a) Representación del inventario de ciclo de vida

Para representar la electrónica de potencia del sistema fotovoltaico base, se emplea en SimaPro el flujo “*Inverter, 2.5 kW {GLO} | market for | Cut-off, U*”, perteneciente a la base de datos Ecoinvent 3.8 [81]. Este flujo modela un inversor centralizado típico asociado a una instalación fotovoltaica de 3 kWp, e incluye los insumos materiales y energéticos necesarios para su fabricación, así como los supuestos de vida útil y reemplazo integrados en el inventario.

Es fundamental aclarar que este flujo no representa un equipo físico específico instalado en el sistema, sino una *cantidad equivalente del proceso*, es decir, una representación funcional del servicio de conversión de corriente continua (DC) a corriente alterna (AC) a lo largo del ciclo de vida del sistema fotovoltaico. En este contexto, la unidad *p* (piece) no corresponde al número de dispositivos instalados, sino a una unidad funcional equivalente del proceso, coherente con la definición de procesos tipo *market for* en Ecoinvent [63, 79, 81].

Tabla 4.1: Flujo del inversor (3kWp)

Entradas conocidas desde la tecnología (materiales/combustibles)	Cantidad	Ud.	Distribución	DS ² o 2*DS	Comentario
Inverter, 2.5 kW (GLO) market for Cut-off, U	2.4	p	Reg. Normal	1.5416	Calculated value. The lifetime of the inverter is assumed with 15 years. Thus, it must be exchanged once during the lifetime of the plant. The inverter investigated for this study has a capacity of 2.5 kW. EcoSpold01Location=RER

La Tabla 4.1 presenta el flujo original del inversor utilizado en el modelo base de 3 kWp, incluyendo la cantidad asignada (2.4 p), la unidad, el tipo de distribución estadística y el comentario técnico proporcionado por la base de datos.

b) Significado el valor original

En el modelo de referencia de 3 kWp, la cantidad asociada al flujo del inversor es de 2.4 p, valor que proviene directamente del inventario base de Ecoinvent y no fue definido arbitrariamente en este estudio [81]. Este valor no representa 2.4 inversores físicos, sino una cantidad

equivalente del proceso que integra dos factores técnicos fundamentales: el ajuste por potencia y el reemplazo por vida útil.

b.1) Ajuste por relación de potencia

El flujo representa un inversor con una potencia nominal de 2.5 kW, mientras que el sistema fotovoltaico de referencia tiene una potencia de 3 kWp. Desde el punto de vista funcional, la relación entre ambas potencias se expresa como:

$$\frac{3 \text{ kWp}}{2.5 \text{ kW}} = 1.2 \quad (4.1)$$

Este factor indica que, para satisfacer la demanda funcional del sistema de 3 kWp, se requiere más de una unidad equivalente del proceso de inversor representado en el inventario [81].

b.2) Ajuste por vida útil y reemplazo

De acuerdo con el comentario técnico del flujo (Tabla 4.1), la vida útil del inversor se asume en 15 años, mientras que la vida útil del sistema fotovoltaico es de aproximadamente 30 años [81]. En consecuencia, el inversor debe ser reemplazado una vez durante la operación del sistema, lo que introduce el siguiente factor:

$$\frac{30 \text{ años}}{15 \text{ años}} = 2 \quad (4.2)$$

b.3) Interpretación integrada del valor 2.4 p

Ecoinvent integra ambos factores en una sola cantidad equivalente del proceso. De forma conceptual, el valor puede interpretarse como:

$$2.4 = 1.2 \times 2 \quad (4.3)$$

Así, el valor 2.4 p representa la demanda funcional total del proceso de inversor necesaria para cubrir tanto la potencia requerida como los reemplazos durante el ciclo de vida del sistema fotovoltaico de 3 kWp [63, 79, 81].

c) Adaptación al sistema fotovoltaico del invernadero

El sistema fotovoltaico analizado en este estudio presenta una potencia instalada de 4.31 kWp y utiliza una configuración basada en 11 microinversores Enphase IQ 8A (384 W AC cada uno). Sin embargo, la base de datos Ecoinvent no dispone de un flujo específico para microinversores.

Ante esta limitación, se emplea el flujo de inversor centralizado de 2.5 kW como *proxy* tecnológico, manteniendo la equivalencia funcional del proceso de conversión DC/AC, tal como lo permiten la norma ISO 14044 y el ILCD Handbook, siempre que se documenten claramente los supuestos y limitaciones [20, 80].

Para adaptar el flujo al sistema real del invernadero, se conserva la lógica interna del inventario base y se aplica un escalamiento proporcional a la potencia instalada, definido como:

$$\text{Factor de escala} = \frac{4.31 \text{ kWp}}{3 \text{ kWp}} = 1.4366 \quad (4.4)$$

Este factor se aplica directamente a la cantidad original del flujo del inversor:

$$q_{\text{microinversor}} = 2.4 \times 1.4366 = 3.44784 \text{ p} \quad (4.5)$$

Este valor se mantiene sin redondeo, ya que representa una cantidad funcional continua del proceso y no un conteo físico de equipos. Aunque el sistema cuenta físicamente con 11 microinversores, el inventario modela únicamente la electrónica de potencia equivalente requerida a lo largo del ciclo de vida del sistema [20, 80].

Tabla 4.2: Escalamiento de microinversores por cantidad física

Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)

Cantidad para instalación de 3 kWp				Cantidad para instalación de 4.31 kWp			
Inverter, 2.5 kW {GLO} market for	2.4	p		Inverter, 2.5 kW {GLO} market for	(4.31/3)=1.4366	p	
Cut-off, U				Cut-off, U			
					(1.4366) × 2.4 =	p	
					3.44784		

La Tabla 4.2 resume el procedimiento de escalamiento aplicado desde el modelo base de 3 kWp hasta el sistema adaptado de 4.31 kWp.

d) Tratamiento de la incertidumbre

El flujo del inversor presenta una incertidumbre asociada expresada como $DS^2 = 1.5416$, correspondiente a una distribución normal, de acuerdo con la documentación de Ecoinvent y SimaPro [62, 77, 81]. En distribuciones normales, el parámetro DS^2 representa la varianza (σ^2) del valor medio del flujo, utilizada para la propagación de incertidumbre en análisis de Monte Carlo [62, 77].

Dado que la cantidad del flujo está expresada en unidades discretas equivalentes del proceso (p) y no en magnitudes físicas continuas como masa, energía o superficie, no se realiza

un escalamiento de la varianza, en concordancia con las buenas prácticas de modelado de inventarios de ciclo de vida [62, 63, 77, 79].

Tabla 4.3: Variables y parámetros utilizados para la adaptación del flujo de microinversores

Variable	Descripción	Modelo base	Sistema invernadero	Unidad	Criterio de adaptación	Ref.
Tipo de flujo	Proceso de inversor utilizado como proxy	Inverter, 2.5 kW (GLO)	Inverter, 2.5 kW (GLO)	–	Equivalencia funcional DC/AC	[20, 81]
Cantidad equivalente	Cantidad funcional del proceso	2.4	3.44784	p	Escalamiento proporcional por kWp	[20, 63, 79, 81]
Potencia del sistema	Potencia pico instalada	3	4.31	kWp	Dato de diseño del sistema	[20, 63, 79]
Factor de escala	Relación de potencias	1.0	1.4366	–	4.31/3	[20, 63, 79]
Número físico de equipos	Microinversores instalados	–	11	p	Dato descriptivo (no modelado)	–
Tipo de distribución	Distribución estadística	Normal	Normal	–	Se conserva del flujo base	[62, 77, 81]
Incertidumbre (DS ²)	Varianza del proceso	1.5416	1.5416	–	No se escala (variable discreta)	[62, 77, 79, 81]

Módulo fotovoltaico

a) Representación del inventario de ciclo de vida

Para representar los módulos fotovoltaicos del sistema base, se emplea en SimaPro el flujo “*Photovoltaic panel, single-Si wafer {GLO} | market for | Cut-off, U*”, perteneciente a la base de datos Ecoinvent 3.8 [81]. Este flujo modela un módulo fotovoltaico monocristalino de silicio, considerando los insumos materiales y energéticos asociados a la fabricación del panel, así como los procesos aguas arriba necesarios para su provisión dentro de un mercado global.

Este flujo no describe un módulo fotovoltaico comercial específico, sino una *cantidad equivalente del proceso* expresada en términos de superficie instalada (m^2). En Ecoinvent, la superficie del módulo se utiliza como variable representativa, ya que existe una relación directa entre el área del panel y la cantidad de materiales empleados en su fabricación, tales como silicio, vidrio, aluminio y polímeros [79, 81].

La Tabla 4.4 presenta el flujo original del módulo fotovoltaico utilizado en el modelo base de 3 kWp, incluyendo la cantidad asociada (22.07187 m^2), la unidad, el tipo de distribución estadística y el valor del parámetro de incertidumbre (DS^2).

Tabla 4.4: Entradas conocidas desde la tecnósfera para el escenario fotovoltaico.

Entradas conocidas desde la tecnósfera	Cantidad	Ud.	DS^2 o 2^{DS}
Photovoltaic panel, single-Si wafer {GLO} market for Cut-off, U	22.07187	m^2	1.3269

b) Significado el valor original

En el modelo de referencia de 3 kWp, la cantidad asociada al flujo del módulo fotovoltaico es de 22.07187 m^2 , valor que proviene directamente del inventario base de Ecoinvent y no fue definido arbitrariamente en este estudio [81]. Esta cantidad representa la superficie total de módulos fotovoltaicos requerida para alcanzar una potencia instalada de 3 kWp bajo los supuestos tecnológicos y de eficiencia considerados en el inventario.

La utilización de la superficie como variable de referencia permite capturar de manera adecuada la relación entre la potencia instalada y la cantidad de materiales utilizados en la fabricación del módulo. Diferentes tecnologías fotovoltaicas presentan variaciones en eficiencia, lo que se traduce en distintas superficies necesarias para generar la misma potencia pico. Por esta razón, Ecoinvent expresa este proceso en m^2 y no directamente en kWp [79, 81].

Desde un punto de vista conceptual, la superficie total del módulo puede relacionarse con la potencia instalada mediante la eficiencia del panel y la irradiancia estándar, aunque en el inventario base este cálculo ya se encuentra implícito en el valor reportado.

c) Adaptación al sistema fotovoltaico del invernadero

El sistema fotovoltaico analizado en este estudio cuenta con una potencia instalada de 4.31 kWp y está conformado por 11 módulos fotovoltaicos monocristalinos de silicio, cada uno con una potencia nominal de 420 Wp. Dado que el flujo de Ecoinvent está expresado en términos de superficie, la adaptación del inventario se realiza con base en la superficie física real de los módulos utilizados en el sistema del invernadero.

Las dimensiones de cada módulo son:

$$\text{Altura} = 1.722 \text{ m}, \quad \text{Ancho} = 1.134 \text{ m}$$

Por lo tanto, la superficie de un módulo fotovoltaico se calcula como:

$$A_{\text{módulo}} = 1.722 \times 1.134 = 1.953848 \text{ m}^2 \quad (4.6)$$

La superficie total instalada en el sistema del invernadero se obtiene multiplicando la superficie de un módulo por el número total de módulos:

$$A_{\text{total}} = 1.953848 \times 11 = 21.480228 \text{ m}^2 \quad (4.7)$$

Este valor sustituye a la superficie original del flujo base de 3 kWp (22.07187 m²), ya que representa con mayor fidelidad la configuración física real del sistema fotovoltaico analizado.

Tabla 4.5: Escalamiento de módulos fotovoltaicos por cantidad física

Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)

Cantidad para instalación de 3 kWp			Cantidad para instalación de 4.31 kWp		
Photovoltaic panel, single-Si wafer	22.07187	m ²	Photovoltaic panel, single-Si wafer	1.953848 × 11 =	21.480228 m ²
{GLO} market for Cut-off, U			{GLO} market for Cut-off, U		

Fundamento metodológico

La adaptación del flujo del módulo fotovoltaico se fundamenta en el uso de la **superficie física instalada (m²)** como variable de escalamiento, en lugar de utilizar exclusivamente la potencia pico instalada (kWp). En inventarios de referencia como Ecoinvent, los procesos asociados a la fabricación de módulos fotovoltaicos están definidos en función de cantidades físicas continuas, particularmente la superficie del módulo, debido a que esta guarda una relación directa con la cantidad de materiales empleados, tales como vidrio, silicio, aluminio y polímeros [79,81].

Escalar un flujo únicamente con base en la potencia instalada puede introducir inconsistencias físicas cuando existen diferencias en la eficiencia, dimensiones o tecnología de los módulos

fotovoltaicos empleados. Por esta razón, el presente estudio adopta un enfoque de escalamiento basado en la superficie real de los módulos instalados en el sistema del invernadero, garantizando que la representación del inventario refleje de manera coherente las condiciones físicas y tecnológicas del sistema analizado, en concordancia con los principios metodológicos del ACV establecidos en la norma ISO 14044 y el ILCD Handbook [20, 80].

d) Tratamiento de la incertidumbre

El flujo del módulo fotovoltaico presenta una incertidumbre asociada expresada como $DS^2 = 1.3269$, correspondiente a una distribución normal, de acuerdo con la documentación de Ecoinvent y SimaPro [62, 77, 81]. Este parámetro representa la varianza (σ^2) asociada a la superficie del módulo fotovoltaico, e integra la variabilidad inherente a los procesos de manufactura y suministro de los materiales.

Dado que la cantidad del flujo está expresada en términos de una magnitud física continua (m^2), la incertidumbre debe ajustarse de manera proporcional al cambio en la cantidad. En inventarios de ciclo de vida, cuando una variable aleatoria se escala por un factor constante, la varianza se ajusta de acuerdo con la siguiente relación [62, 77]:

$$\text{Var}(Y) = \alpha^2 \times \text{Var}(X) \quad (4.8)$$

En este caso, el factor de ajuste corresponde a la relación entre la superficie real del sistema del invernadero y la superficie del modelo base:

$$\alpha = \frac{21.480228}{22.07187} \quad (4.9)$$

Por lo tanto, la varianza ajustada para el sistema de 4.31 kWp se calcula como:

$$DS_{4.31 \text{ kWp}}^2 = \left(\frac{21.480228}{22.07187} \right)^2 \times 1.3269 = 1.2567 \quad (4.10)$$

Este ajuste garantiza la coherencia estadística del inventario modificado y mantiene la representatividad de la incertidumbre relativa asociada al proceso de fabricación del módulo fotovoltaico [62, 77, 81].

Tabla 4.6: Variables y parámetros utilizados para la adaptación del flujo de módulos fotovoltaicos

Variable	Descripción	Modelo base	Sistema invernadero	Unidad	Criterio de adaptación	Ref.
Tipo de flujo	Proceso genérico de módulo FV	Photovoltaic panel, single-Si wafer (GLO)	Photovoltaic panel, single-Si wafer (GLO)	–	Representatividad tecnológica	[20, 79–81]
Cantidad física	Superficie total del módulo	22.07187	21.480228	m ²	Sustitución por superficie real	[20, 79–81].
Número de módulos	Módulos instalados	–	11	p	Dato de diseño del sistema	–
Superficie por módulo	Área geométrica del módulo	–	1.953848	m ²	Cálculo geométrico	Ficha técnica [97]
Potencia por módulo	Potencia pico nominal	–	420	Wp	Dato del fabricante	Ficha técnica [97]
Tipo de distribución	Distribución estadística	Normal	Normal	–	Se conserva del flujo base	[62, 77, 81]
Incertidumbre (DS ²)	Varianza del proceso	1.3269	1.2567	–	Escalamiento cuadrático por área	[62, 77, 79, 81]

Sistema de montaje fotovoltaico

a) Representación del inventario de ciclo de vida

Para representar la estructura de soporte del sistema fotovoltaico base, se emplea en SimaPro el flujo “*Photovoltaic mounting system, for flat-roof installation {GLO} | market for | Cut-off, U*”, perteneciente a la base de datos Ecoinvent 3.8 [81]. Este flujo modela el conjunto de componentes estructurales necesarios para la instalación de módulos fotovoltaicos sobre techos planos, incluyendo perfiles metálicos, elementos de fijación y herrajes asociados.

El flujo no describe un sistema de montaje específico de un fabricante determinado, sino una *cantidad equivalente del proceso*, expresada en términos de superficie instalada (m²). Esta elección responde a que la cantidad de materiales estructurales requeridos guarda una relación directa con el área ocupada por los módulos fotovoltaicos, así como con los espaciamientos y configuraciones típicas de instalación consideradas en el inventario [79, 81].

La Tabla 4.7 presenta el flujo original del sistema de montaje utilizado en el modelo base de 3 kWp, incluyendo la cantidad asociada, la unidad, el tipo de distribución estadística y el valor del parámetro de incertidumbre (DS²).

Tabla 4.7: Flujo del sistema de montaje fotovoltaico (3 kWp)

Entradas conocidas desde la tecnósfera	Cantidad	Ud.	DS ² o 2 ^{DS}
Photovoltaic mounting system, for flat-roof installation {GLO} market for Cut-off, U	21.429	m ²	1.3269

b) Significado el valor original

En el modelo de referencia de 3 kWp, la cantidad asociada al flujo del sistema de montaje es de 21.429 m², valor que proviene directamente del inventario base de Ecoinvent y no fue definido arbitrariamente en este estudio [81]. Esta cantidad representa la superficie de estructura necesaria para instalar un sistema fotovoltaico de 3 kWp bajo los supuestos de diseño, separación entre módulos y configuración típicos considerados en el inventario.

A partir de este valor, es posible obtener una densidad de montaje implícita en el modelo base, expresada como superficie de estructura por unidad de potencia instalada:

$$\frac{21.429 \text{ m}^2}{3 \text{ kWp}} = 7.143 \frac{\text{m}^2}{\text{kWp}} \quad (4.11)$$

Este valor integra de manera implícita consideraciones prácticas de instalación, tales como los espaciamientos entre módulos, la inclinación y los requisitos estructurales, por lo que resulta más representativo utilizar esta relación directamente del inventario base que recurrir a estimaciones teóricas simplificadas [79, 81].

c) Adaptación al sistema fotovoltaico del invernadero

El sistema fotovoltaico analizado en este estudio cuenta con una potencia instalada de 4.31 kWp. Dado que el flujo del sistema de montaje está expresado en términos de superficie, la adaptación del inventario se realiza mediante un escalamiento proporcional basado en la densidad de montaje obtenida del modelo base.

Asumiendo que las condiciones de instalación del sistema del invernadero (tipo de cubierta, configuración sobre techo y criterios estructurales) son comparables a las consideradas en el inventario de referencia, la superficie de estructura requerida para el sistema de 4.31 kWp se calcula como:

$$A_{\text{montaje, 4.31}} = \left(7.143 \frac{\text{m}^2}{\text{kWp}} \right) \times 4.31 \text{ kWp} = 30.786 \text{ m}^2 \quad (4.12)$$

Este valor sustituye a la superficie original del flujo base (21.429 m²) y representa de manera coherente la cantidad de estructura necesaria para el sistema fotovoltaico real del invernadero propuesto.

Tabla 4.8: Escalamiento de sistema de montaje fotovoltaico por cantidad física

Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/estructura de montaje)		
Proceso	Cantidad para instalación de 3 kWp	Cantidad para instalación de 4.31 kWp
Photovoltaic mounting system, for flat-roof installation {GLO} market for Cut-off, U	21.429 m ²	(21.429/3)×4.31 = 30.78633 m ²

Fundamento metodológico

La adaptación del flujo del sistema de montaje fotovoltaico se fundamenta en el uso de la **superficie física instalada (m²)** como variable de escalamiento, en lugar de utilizar exclusivamente la potencia pico instalada (kWp). En inventarios de referencia como Ecoinvent, los procesos asociados a estructuras de montaje están definidos en función de cantidades físicas continuas, ya que la masa de materiales estructurales (principalmente acero y aluminio) depende directamente del área ocupada por los módulos fotovoltaicos y de su disposición geométrica [79,81].

Este enfoque evita inconsistencias físicas que podrían surgir al escalar únicamente por potencia, especialmente cuando existen diferencias en la eficiencia, dimensiones o número de módulos instalados. Por ello, el presente estudio adopta un escalamiento basado en la superficie derivada del modelo base de Ecoinvent, garantizando la coherencia física y metodológica

del inventario adaptado, en concordancia con los principios del ACV establecidos en la norma ISO 14044 y el ILCD Handbook [20, 80].

d) Tratamiento de la incertidumbre

El flujo del sistema de montaje presenta una incertidumbre asociada expresada como $DS^2 = 1.3269$, correspondiente a una distribución normal, de acuerdo con la documentación de Ecoinvent y SimaPro [62, 77, 81]. Este parámetro representa la varianza (σ^2) asociada a la superficie de estructura modelada.

Dado que la cantidad del flujo está expresada en términos de una magnitud física continua (m^2), la incertidumbre debe ajustarse de manera proporcional al cambio en la cantidad. De acuerdo con la regla general de propagación de la varianza [62, 77], se cumple que:

$$\text{Var}(Y) = \alpha^2 \times \text{Var}(X) \quad (4.13)$$

donde el factor de ajuste corresponde a la relación entre la superficie adaptada y la superficie del modelo base:

$$\alpha = \frac{30.786}{21.429} \quad (4.14)$$

Por lo tanto, la varianza ajustada para el sistema de 4.31 kWp se calcula como:

$$DS_{4.31 \text{ kWp}}^2 = \left(\frac{30.786}{21.429} \right)^2 \times 1.3269 \quad (4.15)$$

Este ajuste garantiza la coherencia estadística del inventario modificado y mantiene la representatividad de la incertidumbre relativa asociada al proceso de fabricación de la estructura de montaje [62, 77, 81].

Tabla de variables del sistema de montaje fotovoltaico

Tabla 4.9: Variables y parámetros utilizados para la adaptación del flujo del sistema de montaje fotovoltaico

Variable	Descripción	Modelo base	Sistema invernadero	Unidad	Criterio de adaptación	Ref.
Tipo de flujo	Proceso genérico de estructura FV	Sistema de montaje FV (GLO)	Sistema de montaje FV (GLO)	–	Representatividad tecnológica	[79, 81]
Cantidad física	Superficie de estructura	21.429	30.786	m ²	Escalamiento por densidad de montaje	[79, 81]
Potencia del sistema	Potencia pico instalada	3	4.31	kWp	Dato de diseño del sistema	[20, 80]
Densidad de montaje	Área por unidad de potencia	7.143	7.143	m ² /kWp	Derivada del modelo base	[81]
Tipo de distribución	Distribución estadística	Normal	Normal	–	Se conserva del flujo base	[62, 77, 81]
Incertidumbre (DS ²)	Varianza del proceso	1.3269	Escalada	–	Escalamiento cuadrático por área	[62, 77]

Instalación eléctrica del sistema fotovoltaico

a) Representación del inventario de ciclo de vida

Para representar la instalación eléctrica asociada al sistema fotovoltaico, se utiliza en SimaPro el flujo “*Photovoltaics, electric installation for 3 kWp module, at building {GLO} | market for | Cut-off, U*”, perteneciente a la base de datos Ecoinvent 3.8 [81].

A pesar de su denominación, este proceso no representa la instalación eléctrica de un módulo individual, sino la **instalación eléctrica completa de un sistema fotovoltaico de referencia de 3 kWp**. El flujo integra de manera agregada los insumos y actividades necesarios para la conexión eléctrica del sistema, incluyendo cableado, protecciones, dispositivos de seguridad, conexiones, elementos auxiliares y mano de obra asociada.

La variable funcional que gobierna este proceso es, por tanto, la **capacidad nominal instalada del sistema (kWp)**, y no una magnitud geométrica ni un conteo discreto de componentes [79, 81].

Cabe señalar que se emplea un flujo clasificado como *market for*, y no como *market group for*. Los procesos *market group for* agrupan mercados de múltiples regiones y tecnologías, lo cual resulta menos adecuado para representar una actividad de instalación eléctrica que ocurre en un contexto geográfico específico. El uso de un flujo *market for* permite mantener una mayor coherencia geográfica y funcional, reduciendo la dispersión asociada a promedios suprarregionales [79, 80].

Asimismo, aunque el flujo base presenta una localización global ({GLO}), la electricidad y las actividades de instalación ocurren físicamente en México. En coherencia con el criterio de **representatividad geográfica** adoptado en esta tesis, los flujos eléctricos asociados a la instalación se sustituyen posteriormente por *Electricity, low voltage {MX} | market for | Cut-off, U*, garantizando que los impactos reflejen la matriz eléctrica nacional y el contexto real del invernadero [20, 80].

La Tabla 4.10 presenta el flujo original del modelo base.

Tabla 4.10: Flujo de instalación eléctrica del sistema fotovoltaico (3 kWp)

Entrada desde la tecnósfera	Cantidad	Ud.	DS ²
Photovoltaics, electric installation for 3 kWp module, at building {GLO} market for Cut-off, U	1	p	2.3912

b) Significado el valor original

En el inventario base de Ecoinvent, la cantidad asociada a este flujo es igual a 1 p. Este valor

representa una **unidad funcional agregada**, equivalente a la instalación eléctrica completa de un sistema fotovoltaico de 3 kWp bajo las condiciones tecnológicas y logísticas asumidas en el modelo de referencia.

El valor 1 p no corresponde a un número físico de componentes eléctricos individuales, sino a un conjunto normalizado de actividades y materiales necesarios para la integración eléctrica del sistema al edificio. En consecuencia, cualquier modificación en la capacidad instalada del sistema requiere un ajuste proporcional del flujo para preservar la equivalencia funcional del inventario [20, 81].

c) Adaptación al sistema fotovoltaico del invernadero

El sistema fotovoltaico evaluado en este estudio presenta una capacidad instalada de 4.31 kWp, superior a la del sistema de referencia de 3 kWp. Dado que el flujo de instalación eléctrica está definido explícitamente en función de la potencia nominal del sistema, la adaptación del inventario se realiza mediante un escalamiento lineal basado en la relación entre ambas capacidades.

El factor de escala se define como:

$$\alpha = \frac{4.31 \text{ kWp}}{3 \text{ kWp}} = 1.4366 \quad (4.16)$$

Aplicando este factor al flujo base, la cantidad ajustada se obtiene como:

$$\text{Cantidad}_{4.31} = 1 \times 1.4366 = 1.4366 \text{ p} \quad (4.17)$$

Este procedimiento asume que el incremento en la potencia instalada implica un aumento proporcional en los requerimientos de cableado, protecciones y demás elementos eléctricos, lo cual resulta metodológicamente coherente para este tipo de proceso agregado [79, 81].

Tabla 4.11: Escalamiento del flujo de instalación eléctrica del sistema fotovoltaico

Sistema base (3 kWp)			Sistema invernadero (4.31 kWp)	
Proceso	Cantidad	Ud.	Cálculo	Cantidad
Instalación eléctrica del sistema FV	1	p	1×1.4366	1.4366

d) Tratamiento de la incertidumbre

El flujo original presenta una incertidumbre asociada de $DS^2 = 2.3912$, correspondiente a una distribución normal, de acuerdo con la documentación de Ecoinvent y SimaPro [77, 81].

Dado que la cantidad del flujo se ha escalado mediante un factor constante α , la varianza asociada debe ajustarse conforme a la regla general de propagación de la incertidumbre:

$$\text{Var}(Y) = \alpha^2 \times \text{Var}(X) \quad (4.18)$$

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$DS_{4.31 \text{ kWp}}^2 = (1.4366)^2 \times 2.3912 = 4.9350 \quad (4.19)$$

Este ajuste garantiza que la incertidumbre relativa del proceso se mantenga coherente con la del modelo base, preservando la consistencia estadística del inventario adaptado.

Tabla 4.12: Variables y parámetros utilizados para la adaptación del flujo de instalación eléctrica del sistema fotovoltaico

Variable	Descripción	Base	Invernadero	Unidad	Criterio	Ref.
Tipo de flujo	Instalación eléctrica del sistema fotovoltaico	3	4.31	kWp	Equivalencia funcional	[79, 81]
Cantidad	Unidad funcional del proceso	1	1.4366	p	Escalamiento por capacidad nominal	[20, 81]
Potencia instalada	Capacidad nominal del sistema	3	4.31	kWp	Dato de diseño del sistema	[20]
Factor de escala	Relación de potencias (α)	–	1.4366	–	Cálculo directo	[81]
Distribución	Tipo estadístico del flujo	Normal	Normal	–	Se conserva del flujo base	[62, 77]
DS ²	Varianza del proceso	2.3912	4.9350	–	Escalamiento cuadrático	[62, 77]

4.2.2. Inventario adaptado

La siguiente tabla presenta los flujos de entrada, salida y emisiones adaptados para representar el suministro eléctrico anual de un invernadero conectado a la red nacional en México, con base en el flujo original de Ecoinvent y bajo un enfoque atribucional. Todos los valores han sido escalados proporcionalmente a una demanda total de 5,824.704 kWh, utilizando el principio de escalabilidad lineal que caracteriza a los procesos con unidad funcional energética (kWh) y sin umbrales tecnológicos. Asimismo, se incluye el tratamiento de incertidumbre (DS²) para cada flujo, calculado según la varianza escalada cuadráticamente, conforme a la metodología de Wernet [81].

Tabla 4.13: Inventario para instalación de 4.31 kWp

Productos			
Salidas conocidas a la tecnosfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Tipo de residuo
Invernadero Photovoltaic flat-roof installation, 4.31 kWp, single-Si, on roof {RoW} photovoltaic flat-roof installation, 4.31kWp, single-Si, on roof Cut-off, U	1	p	no definido
Entradas			
Entradas conocidas desde la tecnosfera (materiales/combustibles)	Cantidad	Ud.	DS ² o 2*DS
Inverter, 2.5kW GLO market for Cut-off, U (Microinversores Enphase IQ 8A (384 W AC))	4	p	15416
Photovoltaic panel, single-Si wafer GLO market for Cut-off, U Canadian Solar de 420 Wp	21.480228	m ²	1.256717633
Entradas			
Entradas conocidas desde la tecnosfera (electricidad/calor)	Cantidad	Ud.	DS ² o 2*DS
Electricity, low voltage MX market for Cut-off, U	0.0781748	kWh	1.2214
Electricity, low voltage MX market for Cut-off, U	1.387115716	kWh	2.520749211
Photovoltaic mounting system, for flat-roof installation GLO market for Cut-off, U	30.78633	m ²	1.3269
Photovoltaics, electric installation for 4.31kWp module, at building GLO market for photovoltaics, electric installation for 4.31kWp module, at building Cut-off, U	1.4366	p	4.935

4.2.3. Transporte

El transporte representa una fase intermedia clave dentro del ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos, al conectar los procesos de manufactura con la instalación y la operación del sistema final. Aunque su contribución al impacto global suele ser menor que la de la producción de materias semiconductores o estructuras metálicas, su representación es indispensable para reflejar las condiciones reales de suministro y las características geográficas de este caso de estudio [21, 22].

En este caso, el transporte se modeló como una etapa independiente dentro del sistema producto, siguiendo un enfoque atribucional y utilizando la base de datos Ecoinvent v3.8 bajo el sistema de asignación *Cut-off*. Esto permitió cuantificar las emisiones derivadas del traslado internacional y nacional de los componentes del sistema fotovoltaico hacia el sitio de instalación y garantizar la trazabilidad completa de las cargas ambientales [20, 83].

La representación inicial del transporte se basó en el proceso estándar de Ecoinvent (“Photovoltaics, electric installation for 3 kWp module, at building {RoW} | Cut-off, U”), perteneciente a la categoría *Transformation - Photovoltaic - Infrastructure*. Este proceso integra tanto los materiales eléctricos (por ejemplo, cableado de cobre, fusibles y dispositivos de protección) como los flujos de transporte asociados al desplazamiento de los componentes desde la planta de manufactura hasta el sitio de instalación.

El flujo original fue descompuesto en dos nuevos procesos derivados creados a partir de la función ‘Copiar’ dentro del entorno de SimaPro.

- (IEFV Photovoltaics, electric installation for 3kWp module, at building RoWtextbar photovoltaics, electric installation for 3kWp module, at building textbar Cut-off, U)

Representa únicamente la instalación eléctrica local, conservando los materiales eléctricos y eliminando líneas de transporte.

- (TSFV Photovoltaics, electric installation for 3kWp module, at building RoW textbar photovoltaics, electric installation for 3kWp module, at building textbar Cut-off, U)

En este proceso solo se conservaron las entradas de transporte, ya que representan los desplazamientos físicos que realmente ocurren cuando los componentes fotovoltaicos viajan desde China hasta el sitio de instalación en México. De forma sencilla, estos flujos incluyen el transporte marítimo en contenedor, el transporte por carretera en camiones de distintas capacidades y el transporte por tren, todos ellos necesarios para mover los equipos a lo largo de la cadena de suministro internacional.

Los flujos exactos conservados son:

- (“Transport, freight, sea, container ship {GLO} | transport, freight, sea, container ship | Cut-off, U”)
- (“Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RoW} | transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U”)

- (“Transport, freight, lorry 16–32 metric ton, EURO5 {RoW} | transport, freight, lorry 16–32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U”)
- (“Transport, freight train {RoW} | electricity | Cut-off, U”)

De este modo, se logró separar las cargas ambientales asociadas al transporte internacional (marítimo y ferroviario) y nacional (por carretera) evitando la doble contabilidad de los materiales facilitando el análisis de cada contribución [21] en los siguientes párrafos se habla acerca de la selección de esos medios de transporte.

Asignación de medios de transporte, distancias y escalamiento

Asignación:

1. Para el transporte ferroviario intermedio (fábrica → puerto de exportación en China) se seleccionó el proceso (**Transport, freight train {RoW} | electricity | Cut-off, U**) de la base de datos Ecoinvent 3 [83].

Este dataset representa el servicio de transporte de una tonelada-kilómetro (tkm) de carga mediante un tren de mercancías operado con tracción eléctrica en la región *Rest of World*. El alcance del proceso incluye la operación del tren eléctrico, así como la producción, mantenimiento y disposición final de la locomotora, los vagones de carga y la infraestructura ferroviaria, los cuales se modelan mediante enlaces a datasets globales de infraestructura y mantenimiento.

El consumo energético del proceso se basa en electricidad como fuente primaria de tracción, por lo que las emisiones directas asociadas a la combustión de combustibles fósiles durante la operación son nulas. En su lugar, los impactos ambientales del transporte se derivan principalmente de la generación de la electricidad utilizada, así como del desgaste de componentes ferroviarios y de las actividades de mantenimiento de la infraestructura y del material rodante.

Este enfoque resulta consistente con el modelado del transporte ferroviario moderno en corredores logísticos electrificados y permite representar de forma adecuada el tramo terrestre previo al transporte marítimo dentro de la fase de distribución del sistema fotovoltaico, manteniendo coherencia tecnológica con el uso de electricidad como vector energético en el análisis de ciclo de vida.

Cabe señalar que en el proceso, el consumo de electricidad no se reporta de forma desagregada como un valor unitario (kWh/tkm), sino que se encuentra implícitamente integrado en el inventario del proceso. En consecuencia, los impactos ambientales asociados al uso de energía eléctrica se reflejan directamente en los resultados del análisis a través de los flujos enlazados de generación eléctrica, operación del material rodante y mantenimiento de la infraestructura ferroviaria, de acuerdo con el enfoque *cut-off* de la base de datos Ecoinvent.

2. Para representar el transporte marítimo internacional de los componentes fotovoltaicos, se seleccionó el proceso (**Transport, freight, sea, container ship GLO | Cut-off, U**) de la base Ecoinvent 3 [63].

Este dataset describe la operación de un buque portacontenedores que utiliza fuelóleo pesado (HFO) como combustible, con un consumo promedio de $0.0035 \text{ kg HFO} \cdot \text{t}^{-1} \text{ km}^{-1}$. Incluye las emisiones directas de CO_2 , NO_x , SO_2 , CH_4 , N_2O y partículas finas derivadas de la combustión, así como el mantenimiento rutinario del motor y uso de lubricantes [83].

El flujo se define por tonelada-kilómetro ($\text{t} \cdot \text{km}$) y representa la fase de transporte físico de mercancías industriales en rutas transoceánicas globales. Este proceso es adecuado para modelar el traslado de los módulos, microinversores y estructuras metálicas desde China hasta los puertos mexicanos de Manzanillo o Veracruz, dentro del enfoque *Cut-off* del análisis de ciclo de vida. Su inclusión permite cuantificar el impacto ambiental del transporte marítimo internacional, contribuyendo a una evaluación integral de la fase logística del sistema fotovoltaico.

3. Para representar el transporte de carga pesada asociado al traslado de componentes fotovoltaicos desde el puerto de arribo hasta el sitio de instalación, se utilizó el proceso (**Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 RoW | Cut-off, U**) de la base de datos Ecoinvent 3 [63].

Este dataset describe la operación directa de un camión diésel de gran capacidad (superior a 32 toneladas) conforme a la normativa de emisiones EURO 5, bajo el modelo de sistema cut-off. Representa un servicio de transporte carretero típico en países fuera de Europa (Rest of World), lo que resulta adecuado para las condiciones de transporte por carretera en México.

El modelo incluye el consumo de combustible ($0.32\text{--}0.36 \text{ L diésel} \cdot \text{t}^{-1} \text{ km}^{-1}$) las emisiones directas de CO_2 , CO , NO_x , CH_4 , N_2O , SO_2 y partículas (PM_{10}), así como el desgaste de neumáticos, frenos y lubricantes. No considera la fabricación del vehículo ni la construcción de infraestructura vial [83].

Este proceso es idóneo para representar el tramo terrestre de media a larga distancia (450–600 km) desde los puertos mexicanos de Manzanillo hasta el internadero ubicado en el Estado de México, donde se realiza la instalación del sistema fotovoltaico, representa directamente el servicio de traslado ($\text{t} \cdot \text{km}$) de los módulos, microinversores y estructura desde el punto de entrada al país hasta el sitio de instalación. Su inclusión permite cuantificar de manera precisa la contribución ambiental del transporte carretero pesado dentro de la fase logística del ciclo de vida.

4. Se utilizó el proceso (**Transport, freight, lorry 16–32 t, EURO5 RoW | Cut-off, U**) de la base Ecoinvent 3 [63] para representar el transporte terrestre nacional de los componentes fotovoltaicos. Este dataset describe un camión diésel de carga media-pesada (16–32 t) bajo la norma de emisiones EURO 5, con un factor de carga promedio del 65 % y una eficiencia típica de 0.30 L de diésel por $\text{t} \cdot \text{km}$, compatibles con las características de la flota diésel latinoamericana.

Las emisiones incluidas corresponden a la fase de operación (combustión y desgaste de frenos, neumáticos y lubricantes), mientras que la infraestructura vial no se considera dentro del sistema *Cut-off*. Se seleccionó la región Rest of World (RoW) por ser más representativa de las condiciones vehiculares y normativas de transporte carretero en México y América Latina, evitando así los valores más estrictos de las flotas europeas modeladas en otras regiones de Ecoinvent [83]. Este proceso permite estimar de manera directa la contribución ambiental asociada a la logística terrestre dentro de la fase de transporte del sistema fotovoltaico.

Distancias y escalamiento:

Las distancias de transporte se establecieron con base en la ruta logística más probable entre los centros de producción en China y el sitio de instalación en México. Estas fueron estimadas de la siguiente manera:

Los valores fueron integrados en el subproceso TSFV manteniendo las unidades expresadas en toneladas-kilómetro (tkm), siguiendo las recomendaciones de modelado del Ecoinvent report No. 14 – Transport Services [78].

Para representar la capacidad real del sistema instalado (4.31 kWp), se aplicó un factor de escala de 1.4366, calculado a partir de la relación

$$f = \frac{4.31}{3} = 1.4366 \quad (4.20)$$

Todas las cantidades de los flujos de entrada en los subprocesos derivados fueron multiplicadas por este factor, garantizando consistencia con la unidad funcional del sistema principal.

Determinación de la masa transformada:

Para definir las cargas de transporte en los procesos tipo *freight transport* de Ecoinvent, fue necesario determinar la masa total asociada a los componentes trasladados, expresada en toneladas (t). El proceso base de Ecoinvent, (Photovoltaics, electric installation for 3 kWp module, at building RoW | Cut-off, U), considera una masa aproximada de 0.8 toneladas correspondiente a la instalación eléctrica y estructural de un sistema fotovoltaico de 3 kWp [21].

Es importante enfatizar que esta masa no es un valor fijo ni arbitrario: representa la suma total de materiales instalados en un sistema de 3 kWp (estructura, cableado, canalizaciones, cajas, elementos eléctricos y de soporte). Por ello, cuando la potencia del sistema cambia, la masa total también debe ajustarse en la misma proporción que los inventarios individuales de material. Un sistema de mayor capacidad requiere más cables, más estructura, más fijaciones y más elementos de montaje, de modo que su peso crece directamente con la potencia instalada.

Con base en este principio, la masa del sistema de 4.31 kWp se obtuvo aplicando el mismo factor de escala utilizado para los demás flujos de materiales:

$$M_{4.31} = M_{3.0} \times \frac{4.31}{3.0} = 0.8 \times 1.4366 = 1.149 t \quad (4.21)$$

Este procedimiento es coherente con la interpretación del dataset original, en el cual la masa está asociada al conjunto de materiales necesarios para un sistema de tamaño específico, y por tanto debe aumentar o disminuir proporcionalmente a la capacidad del sistema fotovoltaico considerado. El valor resultante se redondeó a 1.2 toneladas para incorporar el peso adicional típico de empaques, conectores, cableado complementario y elementos menores, que suelen representar entre un 3 y 5 % del peso total en sistemas fotovoltaicos de pequeña escala [22,81].

Esta masa ajustada se empleó como referencia para calcular las cargas de transporte (tkm) en los procesos marítimo, ferroviario y por carretera dentro del subproceso TSFV, según:

$$tkm = 1.2 t \times distancia \text{ (km)} \quad (4.22)$$

De esta forma, las entradas de transporte reflejan de manera consistente las condiciones logísticas reales asociadas al desplazamiento de un sistema fotovoltaico completo de 4.31 kWp desde China hasta el Estado de México, manteniendo coherencia con las prácticas de modelado recomendadas por Ecoinvent [21,81].

A manera de síntesis de esta información, ver la Tabla 4.14.

Tabla 4.14: Resumen de tramos de transporte modelados en SimaPro (Corte por clasificación).

Tipo de transporte	Nombre exacto del proceso en Ecoinvent	Representa	Distancia (km)	Masa transportada (t)	Entrada en SimaPro (t·km)	Incluir
Ferroviario (tramo China → puerto)	<i>Transport, freight train {RoW} electricity Cut-off, U</i>	Ecoinvent 3 – allocation, cut-off by classification – unit (Cut-off, U)	800	1.2	960	Tramo por tren dentro de China hasta el puerto.
Marítimo transoceánico (China → México)	<i>Water – Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U</i>	Ecoinvent 3 – allocation, cut-off by classification – unit (Cut-off, U)	12000	1.2	14400	Transporte de módulos/inversores por barco entre continentes.
Carretero pesado internacional o nacional (>32 t)	<i>Road – Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5, {RoW} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 Cut-off, U</i>	Ecoinvent 3 – allocation, cut-off by classification – unit (Cut-off, U)	400	1.2	480	Transporte terrestre principal desde puerto mexicano hasta el sitio (p. ej., Manzanillo → Estado de México).
Camión mediano o de distribución local	<i>Road – Transport, freight, lorry 16–32 metric ton, EURO5, {RoW} transport, freight, lorry 16–32 metric ton, EURO5 Cut-off, U</i>	Ecoinvent 3 – allocation, cut-off by classification – unit (Cut-off, U)	100	1.2	120	Tramos secundarios o distribución de estructuras y cableado.

Tratamiento de incertidumbre

El proceso base presentaba una desviación cuadrática media $DS^2 = 4.935$, correspondiente a la varianza del conjunto de datos de infraestructura fotovoltaica en Ecoinvent. Siguiendo el método propuesto por Weidema [81], la incertidumbre asociada al nuevo tamaño del sistema se ajustó en proporción cuadrática al factor de escala, según la ecuación:

$$DS_{4.31}^2 = f^2 \times DS_{3.0}^2 \quad (4.23)$$

Sustituyendo los valores específicos del caso de estudio:

$$DS_{4.31}^2 = (1.4366)^2 \times 4.935 = 10.184 \quad (4.24)$$

Este valor fue asignado a los campos DS^2 de ambos subprocesos (*IEFV* y *TSFV*), asegurando que el modelo propagara adecuadamente la incertidumbre durante las simulaciones de Monte Carlo.

Integración al sistema fotovoltaico y verificación

Los dos subprocesos ajustados se incorporaron como entradas conocidas desde la tecnósfera dentro del proceso principal (*Invernadero Photovoltaic flat-roof installation, 4.31 kWp*).

De este modo, el modelo final quedó conformado por seis flujos principales. En términos sencillos, estos flujos representan los elementos esenciales del sistema fotovoltaico: los módulos solares, el inversor central de referencia, la estructura de montaje, la electricidad utilizada durante la instalación, y dos procesos propios creados para reflejar la instalación eléctrica local y los transportes reales desde China hasta México. A continuación, se muestran los flujos exactos empleados en el inventario:

- *Photovoltaic panel, single-Si wafer {GLO}*
- *Inverter, 2.5 kW {GLO}*
- *Photovoltaic mounting system, flat-roof {GLO}*
- *Electricity, low voltage {MX}*
- *_IEFV_Photovoltaics...* (instalación eléctrica local)
- *_TSFV_Photovoltaics...* (transporte internacional y nacional)

La consistencia de la red se comprobó utilizando la herramienta "Ver energía proceso" y la visualización de red (*Network view*), verificándose que todos los nodos activos pertenecían al sistema y que no existían eliminaciones automáticas.

La verificación cuantitativa se efectuó a través de la ventana "Contribución de proceso" y posteriormente en "Evaluación del daño", confirmando que el proceso TSFV aportaba aproximadamente 397 kg CO₂-eq al potencial de calentamiento global (GWP₁₀₀), y el proceso IEFV 275 kg CO₂-eq, valores consistentes con inventarios de referencia de sistemas fotovoltaicos residenciales [21, 90].

La desagregación del flujo permitió una mayor transparencia en la estructura del inventario, reduciendo los errores de doble contabilidad y los conflictos de dependencia circular en SimaPro. Esta estrategia metodológica (basada en la división funcional de procesos de Ecoinvent) es especialmente útil cuando se requiere adaptar flujos genéricos a sistemas específicos o ajustar la escala de potencia de un caso real [83].

Además, el tratamiento estadístico de la incertidumbre garantiza la robustez del modelo y permite una propagación consistente durante el análisis de sensibilidad y el cálculo de intervalos de confianza en los resultados [81, 91]. La metodología aplicada aquí, sienta las bases para replicar el procedimiento en otros subsistemas del modelo.

4.3. Análisis económico del ciclo de vida

El análisis económico del ciclo de vida (AECV) complementa el ACV ambiental al incorporar dimensión financiera al sistema. Constituye una metodología que evalúa los costos totales que un sistema genera durante todo su ciclo de vida (desde la inversión inicial hasta operación, mantenimiento, reemplazos y disposición final) permitiendo así complementar el análisis ambiental del ACV con una dimensión económica [92, 93].

En el contexto de sistemas fotovoltaicos, los modelos de AECV permiten determinar el costo nivelado de energía (LCOE), el retorno económico, la viabilidad financiera y la relación con la reducción de impactos ambientales para una evaluación de sostenibilidad más integral [93].

4.3.1. Determinación del costo de la electricidad de red (tarifa CFE)

El costo de la electricidad de referencia se determinó a partir de la estructura tarifaria oficial publicada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para el esquema de *Riego Agrícola en Media Tensión* (RAMT), aplicable a usuarios agrícolas con suministro en media tensión, como es el caso del invernadero analizado. La información tarifaria fue consultada en el portal oficial de tarifas de la CFE para la región *Centro* y el periodo *Enero de 2026*.

La tarifa RAMT no se expresa como un único precio por kWh, sino que está compuesta

por: (i) un cargo fijo mensual (MXN/mes), (ii) un cargo variable por energía consumida (MXN/kWh), (iii) un cargo por distribución (MXN/kW·mes) y (iv) un cargo por capacidad (MXN/kW·mes). Por ello, el costo total de la electricidad depende tanto del consumo de energía (kWh) como de la demanda facturable (kW).

En sistemas existentes, la demanda facturable se obtiene directamente a partir de las mediciones del medidor de CFE, generalmente como la demanda máxima promedio en intervalos de 15 minutos. Sin embargo, dado que el sistema evaluado en este estudio corresponde a un *sistema propuesto*, no se dispone de mediciones reales de demanda. En estos casos, la literatura técnica y los manuales de evaluación energética recomiendan estimar la demanda facturable a partir del consumo anual de energía y un régimen de operación representativo del sistema analizado, empleando un enfoque de potencia media equivalente [13,94,95].

Siguiendo este criterio, la demanda facturable se estimó mediante la relación entre el consumo anual del invernadero ($E_{\text{anual}} = 5,824.70$ kWh/año) y un número de horas de operación equivalente típico para sistemas agrícolas tecnificados con cargas auxiliares (ventilación, control climático y riego), del orden de 1,400–1,600 h/año [94]. Considerando un valor intermedio de 1,500 h/año, la potencia media equivalente resulta:

$$P_{\text{dem}} \approx \frac{E_{\text{anual}}}{h_{\text{op}}} = \frac{5\,824.70}{1\,500} \approx 3.9 \text{ kW} \quad (4.25)$$

Con base en este resultado, se adoptó una demanda facturable representativa y conservadora de $P_{\text{dem}} = 4$ kW para el análisis económico.

A partir de lo anterior, se calculó una *tarifa efectiva promedio* (MXN/kWh), definida como el cociente entre el costo anual total estimado del suministro RAMT y el consumo anual de energía. Este valor permite una comparación directa y metodológicamente consistente con el Costo Nivelado de Energía (LCOE) del sistema fotovoltaico.

Tabla 4.15: Estructura tarifaria CFE para riego agrícola en media tensión (RAMT, región Centro)

Concepto	Unidad	Valor
Cargo fijo	MXN/mes	264.38
Cargo variable de energía	MXN/kWh	0.925
Cargo por distribución	MXN/kW·mes	221.09
Cargo por capacidad	MXN/kW·mes	154.18

Fuente: Comisión Federal de Electricidad (CFE), Portal de tarifas eléctricas, esquema RAMT, región Centro, Enero 2026.

4.3.2. Parámetros técnicos y económicos considerados

El sistema analizado corresponde a una instalación fotovoltaica aislada (*off-grid*) de 4.31 kWp, conformada por 11 módulos *Canadian Solar HiKu6 Mono PERC* de 410 Wp y 11 microinversores *Enphase IQ8A* de 384 W AC [96,97]. El conjunto está diseñado para abastecer de manera autónoma la demanda eléctrica del invernadero, reduciendo la dependencia de la red eléctrica y fortaleciendo su resiliencia energética.

Para el análisis económico se adoptó una tasa de descuento real del 8 %, una vida útil de 20 años y un costo anual de operación y mantenimiento equivalente al 2 % del CAPEX. El consumo anual del invernadero es de 5 824.70 kWh, y se consideró una irradiación promedio de 1 350 kWh/kWp·año para el Estado de México, con base en información del NREL y la IEA PVPS Task 1 [90].

El costo de referencia de la electricidad convencional se representó mediante una *tarifa efectiva promedio* (MXN/kWh), calculada previamente a partir de la estructura tarifaria oficial de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) correspondiente a riego agrícola en media tensión (RAMT), conforme a lo descrito en la Subsección 4.3.1. Dicha tarifa integra el efecto de los cargos fijos, los cargos asociados a la demanda facturable y el cargo variable por energía, y se emplea como parámetro de entrada en el análisis económico del sistema fotovoltaico.

Con base en esta estructura tarifaria y en una demanda facturable representativa del sistema propuesto de $P_{\text{dem}} = 4$ kW, se obtuvo un costo anual estimado del suministro eléctrico de la red, expresado como:

$$C_{\text{red, anual}} = 12F + c_E E_{\text{anual}} + 12(c_D + c_C) P_{\text{dem}} \quad (4.26)$$

donde F es el cargo fijo (MXN/mes), c_E el cargo variable de energía (MXN/kWh), c_D el cargo por distribución (MXN/kW·mes) y c_C el cargo por capacidad (MXN/kW·mes). El costo anual resultante fue $C_{\text{red, anual}} = 26,573.37$ MXN/año. A partir de este valor, la tarifa efectiva promedio se calculó como:

$$\text{Tarifa}_{\text{ef}} = \frac{C_{\text{red, anual}}}{E_{\text{anual}}} = \frac{26\,573.37}{5\,824.704} = 4.56 \text{ MXN/kWh} \quad (4.27)$$

Este valor se emplea como referencia para la comparación económica con el sistema fotovoltaico a lo largo de su ciclo de vida.

Tabla 4.16: Parámetros técnicos y económicos considerados en el análisis

Concepto	Unidad	Valor adoptado
Potencia instalada	kWp	4.31
Costo de inversión inicial (CAPEX)	MXN	184,788
Costo anual de operación y mantenimiento	% del CAPEX	2.0
Tasa de descuento real	%	8.0
Vida útil del sistema	años	20
Generación anual	kWh/año	5,824.70
Tarifa de electricidad de referencia (efectiva, RAMT)	MXN/kWh	4.56
Irradiación promedio	kWh/kWp·año	1,350

El análisis económico se integró con el ACV ambiental bajo el enfoque de Evaluación del Ciclo de Vida de la Sostenibilidad (*Life Cycle Sustainability Assessment*, LCSA), incorporando las dimensiones ambiental, económica y social [19, 20]. Este enfoque permite relacionar los beneficios ambientales obtenidos por la sustitución de electricidad convencional con la rentabilidad económica del sistema fotovoltaico autónomo, proporcionando una perspectiva integral de sostenibilidad.

En SimaPro, el flujo de electricidad de referencia fue sustituido por el correspondiente a la instalación fotovoltaica, ajustado a una generación anual de 5 824.70 kWh.

4.3.3. Desarrollo matemático del análisis económico

Estimación de la demanda energética anual

El cálculo del consumo energético anual del invernadero se basa en datos reales obtenidos a partir del recibo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). A partir de un consumo bimestral reportado de 970.784 kWh, el consumo anual se estimó mediante:

$$E_{\text{anual}} = 6 \times 970.784 = 5\,824.704 \text{ kWh/año} \quad (4.28)$$

Este valor representa la demanda eléctrica anual que el sistema fotovoltaico (SFV) debe sustituir en su totalidad para lograr la autonomía energética del invernadero.

Para el análisis económico se consideró una potencia fotovoltaica de referencia de 4.31 kWp, valor obtenido durante el proceso de dimensionamiento técnico del sistema con base en la energía anual requerida por el invernadero (5,824.704 kWh/año) y una productividad específica de 1,350 kWh/kWp·año para el Estado de México. No obstante, la configuración real

del sistema está conformada por 11 módulos *Canadian Solar HiKu6* de 420 Wp, lo que da como resultado una potencia instalada total de 4.62 kWp.

La diferencia entre la potencia fotovoltaica requerida y la potencia efectivamente instalada introduce una ligera sobrecapacidad deliberada, la cual contribuye a compensar pérdidas asociadas a efectos de temperatura, sombreados parciales, eficiencia de los microinversores y degradación anual de los módulos fotovoltaicos. En el análisis económico, ambos valores (potencia de referencia y potencia instalada) se consideran como parámetros de entrada, lo que permite representar de manera más realista el comportamiento operativo del sistema a lo largo de su vida útil.

Costos del sistema (CAPEX y OPEX)

Los costos considerados en el análisis económico reflejan los componentes efectivamente instalados en el sistema fotovoltaico, considerando únicamente los costos iniciales de inversión asociados a la adquisición e instalación de los equipos.

Tabla 4.17: Costos del sistema fotovoltaico sin baterías

Concepto	Costo unitario (MXN)	Cantidad	Costo total (MXN)
Módulos Canadian Solar HiKu6 420 Wp	4,300	11	47,300
Microinversores Enphase IQ8A	4,900	11	53,900
Estructura de montaje	—	—	26,200
Cableado y canalización	—	—	10,800
Protecciones AC/DC	—	—	18,500
Mano de obra e instalación	—	—	28,088
Total CAPEX	—	—	184,788

El costo anual de operación y mantenimiento (OPEX) se estimó como un porcentaje del costo de inversión inicial, siguiendo criterios ampliamente utilizados en la literatura y recomendados por IRENA (2023). En este estudio, el OPEX se fijó en el 2 % del CAPEX, de acuerdo con:

$$\text{O\&M} = 0.02 \times 184\,788 = 3\,695.76 \text{ MXN/año} \quad (4.29)$$

Estimación de energía útil generada

La energía eléctrica generada por el sistema fotovoltaico en cada año de operación se modeló considerando la degradación anual de los módulos fotovoltaicos y la eficiencia del sistema de conversión. En particular, se adoptó una tasa de degradación del módulo de 0.6 % anual, de

acuerdo con la ficha técnica del fabricante [97], y una eficiencia del microinversor del 97 %, conforme a las especificaciones del fabricante [96].

La energía útil generada en el año t se estimó mediante la siguiente expresión:

$$E_t = E_0(1 - d)^{t-1} \cdot \eta_{\text{inv}} \quad (4.30)$$

donde:

- $E_0 = 5,824.704$ kWh/año corresponde a la energía generada en el primer año de operación,
- $d = 0.006$ es la tasa de degradación anual del módulo fotovoltaico,
- $\eta_{\text{inv}} = 0.97$ es la eficiencia del microinversor,
- t es el año de operación del sistema, con $t = 1, 2, \dots, 20$.

Esta formulación permite representar la disminución progresiva de la energía generada a lo largo de la vida útil del sistema, como resultado de la degradación de los módulos fotovoltaicos, manteniendo constante la eficiencia del sistema de conversión.

Construcción del flujo de caja económico

El flujo de caja económico constituye la base para la evaluación financiera del sistema fotovoltaico, ya que permite representar de forma anual los costos y beneficios asociados al proyecto. En este estudio, el flujo neto anual F_t se definió como:

$$F_t = B_t - O\&M \quad (4.31)$$

donde:

- B_t es el beneficio económico por energía no comprada en el año t (MXN/año),
- $O\&M$ es el costo anual de operación y mantenimiento (MXN/año), considerado constante durante el horizonte de análisis,
- t es el año de operación del sistema, con $t = 1, 2, \dots, 20$.

El flujo correspondiente al año $t = 0$ está constituido exclusivamente por la inversión inicial del sistema fotovoltaico, es decir, el CAPEX total. A partir del año $t = 1$, el flujo neto anual

resulta del ahorro económico asociado a la energía eléctrica no comprada a la red, menos el costo anual de operación y mantenimiento.

Debido a la degradación anual de los módulos fotovoltaicos, la energía generada y, por ende, el beneficio económico B_t disminuyen progresivamente con el tiempo, lo que conduce a flujos netos anuales decrecientes a lo largo de la vida útil del sistema.

Estructura del flujo de caja

- **Año 0:** flujo negativo correspondiente a la inversión inicial del sistema (CAPEX).
- **Años 1–20:** flujos netos positivos, decrecientes en el tiempo debido a la degradación anual del sistema fotovoltaico.

Aunque la secuencia de flujos (un flujo negativo inicial seguido de flujos positivos) corresponde a un patrón convencional de inversión, la disminución progresiva de los flujos futuros tiene implicaciones relevantes en la selección de los indicadores financieros. En particular, la Tasa Interna de Retorno (TIR) convencional puede sobreestimar la rentabilidad real del proyecto, ya que asume implícitamente que todos los flujos positivos se reinvierten a la propia TIR, hipótesis que resulta poco realista en proyectos fotovoltaicos a pequeña escala [98].

Por esta razón, en el presente estudio se empleó la Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM), una métrica recomendada por organismos internacionales como IRENA y NREL para la evaluación de proyectos fotovoltaicos con flujos futuros variables [13]. La TIRM asume que los flujos positivos se reinvierten a la tasa de descuento del proyecto (8 %), lo que proporciona una estimación más conservadora y coherente con el comportamiento real del flujo de caja.

En este contexto, el flujo de caja definido en la ecuación (4.31) constituye la base para la aplicación de la TIRM y permite evaluar con mayor precisión la viabilidad económica del sistema fotovoltaico analizado.

TIRM (Tasa Interna de Retorno Modificada)

La Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM) se emplea como un indicador de rentabilidad más robusto que la Tasa Interna de Retorno (TIR) convencional, ya que incorpora una hipótesis de reinversión de los flujos de caja más realista y resulta especialmente adecuada para proyectos con flujos futuros variables, como es el caso de los sistemas fotovoltaicos sujetos a degradación anual [13, 98].

La TIRM se calcula a partir de la relación entre el valor futuro de los flujos positivos y el valor presente de los flujos negativos, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{TIRM} = \left(\frac{FV(F_t^+)}{PV(F_t^-)} \right)^{1/n} - 1 \quad (4.32)$$

donde:

- $FV(F_t^+)$ es el valor futuro de los flujos netos positivos (F_t^+), capitalizados hasta el final del horizonte de evaluación a la tasa de reinversión considerada, igual a la tasa de descuento del proyecto (8 %),
- $PV(F_t^-)$ es el valor presente de los flujos negativos (F_t^-), que en este caso corresponden a la inversión inicial del sistema fotovoltaico (CAPEX),
- n es el horizonte de evaluación del proyecto, en este estudio $n = 20$ años.

En el presente análisis, los flujos negativos se concentran en el año $t = 0$, correspondiente a la inversión inicial del sistema. Los flujos positivos están constituidos por los beneficios económicos netos anuales, definidos como el ahorro por energía eléctrica no comprada a la red menos los costos de operación y mantenimiento, desde el año $t = 1$ hasta el año $t = 20$. Cada flujo positivo se capitalizó a la tasa del 8 %, mientras que el CAPEX se consideró como el valor presente de los flujos negativos.

A partir de estos valores, la Tasa Interna de Retorno Modificada obtenida fue:

$$\text{TIRM} = 8.79\% \quad (4.33)$$

El valor de la TIRM es ligeramente superior a la tasa real de descuento adoptada (8 %), lo que indica que el proyecto genera una rentabilidad anual efectiva marginalmente mayor que el costo de oportunidad del capital. En términos prácticos, este resultado confirma la viabilidad económica del sistema fotovoltaico autónomo bajo condiciones realistas de operación y degradación, y complementa el resultado del Valor Actual Neto (VAN) positivo, proporcionando una medida adicional de la atractividad económica del proyecto para el productor agrícola.

Valor Actual Neto (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN) es uno de los indicadores más utilizados para evaluar la rentabilidad financiera de proyectos energéticos, ya que permite comparar el valor presente de los beneficios económicos futuros con la inversión inicial requerida. En sistemas fotovoltaicos, donde los flujos económicos están dominados por el ahorro anual asociado a la electricidad no comprada y por costos de operación relativamente estables, el VAN constituye una herramienta robusta para determinar si el proyecto recupera su inversión a lo largo de su vida útil [13].

El VAN se calculó a partir del flujo económico neto anual F_t , definido previamente en la ecuación (4.31). Su formulación general es:

$$VAN = \sum_{t=1}^{20} \frac{F_t}{(1+r)^t} - CAPEX \quad (4.34)$$

donde:

- F_t es el flujo económico neto del año t (MXN/año), que incorpora el ahorro por energía eléctrica no comprada menos los costos de operación y mantenimiento,
- r es la tasa real de descuento del proyecto, adoptada como 8 %,
- $CAPEX$ es la inversión inicial total del sistema fotovoltaico.

Cada flujo anual se descuenta a la tasa real del proyecto, lo que refleja el principio financiero del valor temporal del dinero, según el cual los beneficios futuros tienen un valor menor que un beneficio equivalente en el presente. Este procedimiento permite incorporar tanto la degradación anual de los módulos fotovoltaicos —que reduce progresivamente los beneficios económicos— como la estabilidad de los costos de operación y mantenimiento a lo largo del horizonte de análisis.

El resultado del Valor Actual Neto obtenido para el sistema fotovoltaico analizado fue positivo:

$$VAN = +29,023.29 \text{ MXN} \quad (4.35)$$

Un VAN positivo indica que los beneficios económicos actualizados superan el monto de la inversión inicial, por lo que el proyecto es financieramente viable bajo los supuestos considerados. Asimismo, este resultado es coherente con la Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM) ligeramente superior a la tasa de descuento adoptada, confirmando la viabilidad económica del sistema fotovoltaico autónomo bajo condiciones realistas de operación y degradación.

El concepto de Valor Actual Neto se deriva directamente del principio financiero del valor temporal del dinero, ampliamente documentado en la literatura clásica de finanzas corporativas y economía de la ingeniería [98–100]. De acuerdo con este principio, los flujos económicos futuros deben descontarse a una tasa real de interés para reflejar su pérdida de valor en el tiempo. La formulación empleada en este estudio corresponde a la utilizada de manera estándar en la evaluación económica de proyectos energéticos y es consistente con las recomendaciones de organismos internacionales como IRENA [13].

Costo Nivelado de Energía (LCOE)

El Costo Nivelado de Energía (LCOE, por sus siglas en inglés) es un indicador que permite estimar el costo real por kWh generado por un sistema fotovoltaico a lo largo de toda su vida útil. Su principal fortaleza radica en que integra, en una única métrica, todos los costos asociados al proyecto (inversión inicial y costos de operación y mantenimiento) y toda la energía producida, actualizando ambos componentes a valor presente mediante una tasa de descuento. Por esta razón, el LCOE es ampliamente utilizado por organismos internacionales como IRENA y la IEA PVPS para comparar la competitividad de distintas tecnologías de generación eléctrica [13, 22].

El LCOE se define formalmente como la razón entre el valor presente de los costos totales del proyecto (C_t) y el valor presente de la energía generada en cada año de operación (E_t), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{20} \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{20} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (4.36)$$

donde:

- C_0 corresponde a la inversión inicial total del sistema fotovoltaico (CAPEX),
- C_t (para $t \geq 1$) representa los costos anuales de operación y mantenimiento (O&M),
- E_t es la energía generada en el año t , considerando la degradación anual del módulo fotovoltaico,
- r es la tasa real de descuento, adoptada como 8 %,
- t es el año dentro del horizonte de análisis, con $t = 0, 1, \dots, 20$.

Esta formulación permite capturar adecuadamente el efecto del valor temporal del dinero, la reducción progresiva de la energía generada debido a la degradación del sistema fotovoltaico, la importancia del CAPEX como inversión inicial significativa y la estabilidad de los costos de operación y mantenimiento durante la etapa de operación.

Sustituyendo los costos del proyecto (CAPEX y O&M) y la energía generada en cada uno de los 20 años del horizonte de análisis, se obtuvo un Costo Nivelado de Energía de:

$$LCOE = 2.64 \text{ MXN/kWh} \quad (4.37)$$

Este valor es inferior a la tarifa efectiva promedio de la electricidad de red estimada para el invernadero bajo el esquema RAMT de la CFE (4.56 MXN/kWh), lo que indica que el sistema fotovoltaico permite generar energía eléctrica a un menor costo unitario que el suministro convencional de la red. En términos prácticos, el LCOE obtenido representa un ahorro aproximado del 42 % en el costo por kWh a lo largo de la vida útil del sistema, reforzando la viabilidad económica del proyecto bajo condiciones realistas de operación.

Periodo de recuperación de la inversión

El periodo de recuperación de la inversión (PRI) se determinó a partir del flujo económico neto anual F_t (ecuación (4.31)), siguiendo prácticas recientes de evaluación económica aplicadas a sistemas fotovoltaicos distribuidos [94, 101, 102]. Este indicador permite estimar el tiempo necesario para que los ahorros acumulados por la energía eléctrica no comprada igualen la inversión inicial del proyecto (CAPEX).

El periodo de recuperación simple se calculó acumulando los flujos netos anuales hasta que el valor acumulado igualó o superó el monto de la inversión inicial, de acuerdo con:

$$PRI_{\text{simple}} = \min \left\{ t \mid \sum_{i=1}^t F_i \geq CAPEX \right\} \quad (4.38)$$

Para el sistema fotovoltaico autónomo analizado (CAPEX de 184,788 MXN, costos de operación y mantenimiento equivalentes al 2 % del CAPEX y ahorros derivados de la energía no comprada bajo la tarifa efectiva promedio estimada), el flujo acumulado se vuelve positivo en el año 9. Por tanto:

$$PRI_{\text{simple}} \approx 9 \text{ años} \quad (4.39)$$

Si bien el PRI simple es una métrica intuitiva y de fácil interpretación, no considera el valor temporal del dinero y tiende a subestimar el tiempo real de recuperación en proyectos con horizontes de análisis largos. Por esta razón, la literatura especializada recomienda complementar este indicador con el periodo de recuperación descontado [94, 103].

El periodo de recuperación descontado se calculó como:

$$PRI_{\text{descontado}} = \min \left\{ t \mid \sum_{i=1}^t \frac{F_i}{(1+r)^i} \geq CAPEX \right\} \quad (4.40)$$

donde r es la tasa real de descuento adoptada en el análisis, igual al 8 %. Al incorporar el efecto del descuento y la degradación anual de los módulos fotovoltaicos sobre la generación eléctrica

y los beneficios económicos, el flujo acumulado descontado se vuelve positivo alrededor del año 15:

$$PRI_{\text{descontado}} \approx 15 \text{ años} \quad (4.41)$$

Los resultados del periodo de recuperación son coherentes con los demás indicadores financieros obtenidos. En particular, el Valor Actual Neto (VAN) positivo (ecuación (4.35)) y la Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM) ligeramente superior a la tasa de descuento (ecuación (4.33)) confirman que el sistema fotovoltaico es económicamente viable bajo los supuestos considerados. En conjunto, estos indicadores muestran que la inversión se recupera dentro de la vida útil del sistema (20 años), en concordancia con valores reportados recientemente para sistemas fotovoltaicos residenciales y agrícolas en México y Latinoamérica [94, 102].

4.3.4. Beneficio económico por energía no comprada

El beneficio económico derivado de la energía no comprada se fundamenta en un principio ampliamente empleado en evaluaciones económicas de sistemas fotovoltaicos: cada kWh generado por el sistema y consumido por el invernadero sustituye un kWh que, de otro modo, habría sido adquirido de la red eléctrica.

Este enfoque, conocido como método de costos evitados, es utilizado de manera consistente por organismos internacionales como IRENA, la IEA PVPS y el NREL para evaluar la rentabilidad económica de sistemas solares [13, 22, 104].

Bajo esta lógica, el beneficio económico anual depende directamente de:

- la energía generada por el sistema fotovoltaico en el año t , denotada como E_t , y
- la tarifa eléctrica por kWh aplicable al usuario agrícola, reportada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Por lo tanto, el beneficio económico anual puede expresarse mediante la siguiente relación general:

$$B_t = E_t \cdot \text{Tarifa}_{\text{ef}} \quad (4.42)$$

En el presente estudio se empleó como referencia una *tarifa efectiva promedio* de la electricidad de red, calculada a partir de la estructura tarifaria oficial de la CFE correspondiente a riego agrícola en media tensión (RAMT), conforme a lo descrito en la Subsección 4.3.1. El valor obtenido fue $\text{Tarifa}_{\text{ef}} = 4.56 \text{ MXN/kWh}$. Sustituyendo este valor en la ecuación (4.42), se obtiene la expresión utilizada en el análisis económico:

$$B_t = E_t \cdot 4.56 \quad (4.43)$$

Esta ecuación indica que el beneficio económico anual es directamente proporcional a la energía generada por el sistema fotovoltaico: a mayor generación eléctrica, mayor ahorro económico; mientras que una disminución progresiva de la generación, debida principalmente a la degradación anual de los módulos fotovoltaicos, conduce a una reducción gradual del beneficio económico. Este comportamiento es coherente con los criterios metodológicos establecidos en estudios económicos de proyectos solares [13, 105, 106].

Ejemplo para el primer año

La energía generada en el primer año de operación del sistema fotovoltaico se estimó como:

$$E_1 = 5,824.704 \text{ kWh/año}$$

Aplicando la ecuación (4.43), el beneficio económico correspondiente al primer año es:

$$B_1 = 5,824.704 \times 4.56 = 26,560.65 \text{ MXN} \quad (4.44)$$

Este valor representa el ahorro directo que el productor agrícola obtiene por dejar de pagar electricidad a la Comisión Federal de Electricidad durante el primer año de operación del sistema fotovoltaico.

4.3.5. Integración con el ACV

El análisis económico se integró con el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ambiental bajo el enfoque de Evaluación del Ciclo de Vida de la Sostenibilidad (*Life Cycle Sustainability Assessment*, LCSA), incorporando de manera conjunta las dimensiones ambiental, económica y social, conforme a los principios establecidos en las normas ISO 14040 e ISO 14044 [19, 20]. Este enfoque permite relacionar los beneficios ambientales derivados de la sustitución de electricidad convencional con el desempeño económico del sistema fotovoltaico autónomo, proporcionando una perspectiva integral de sostenibilidad.

En el software SimaPro, el flujo de electricidad de referencia correspondiente al suministro de la red eléctrica fue sustituido por el flujo asociado a la generación del sistema fotovoltaico, ajustado a una producción anual de 5,824.70 kWh. De este modo, los impactos ambientales se expresaron por unidad de energía generada y consumida en el invernadero.

El Costo Nivelado de Energía (LCOE) se empleó como costo económico por unidad funcional (MXN/kWh), lo que permitió comparar directamente los resultados económicos con

los impactos ambientales expresados en kg CO₂ eq/kWh [13,90]. Esta integración permitió cuantificar la relación entre la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y los beneficios económicos asociados, mostrando que la disminución de impactos ambientales se acompaña de una mejora en la eficiencia económica del sistema.

El sistema fotovoltaico autónomo de 4.31 kWp se presenta, por tanto, como una alternativa viable y sostenible para el abastecimiento energético del invernadero en el Estado de México. El LCOE obtenido, igual a 2.64 MXN/kWh, resulta inferior a la tarifa efectiva promedio de la electricidad de red bajo el esquema RAMT de la CFE (4.56 MXN/kWh), lo que indica un menor costo unitario de generación a lo largo del ciclo de vida del sistema. Asimismo, el Valor Actual Neto (VAN) positivo de \$29,023 MXN y la Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM) de 8.79 %, ligeramente superior a la tasa real de descuento adoptada (8 %), confirman la viabilidad económica del proyecto bajo supuestos realistas de operación y degradación.

En conjunto, la aplicación integrada de ACV y Costo del Ciclo de Vida (LCC) muestra que la implementación del sistema fotovoltaico no sólo contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también fortalece la resiliencia económica y la independencia energética del sector agrícola, en concordancia con los principios de sostenibilidad evaluados en este estudio.

Capítulo 5

Capítulo 5

Resultados por categoría de impacto y comparación de escenarios

Con base en los datos de inventario adaptados y modelados en SimaPro 9.5, y utilizando el método de evaluación ReCiPe Midpoint (H) 2016, complementado con IPCC 2021 GWP100, se obtuvieron los resultados por categoría de impacto correspondientes al suministro eléctrico de un invernadero cenital ubicado en el Estado de México. La unidad funcional establecida fue una tonelada de tomate producido, lo cual permite una comparación normalizada entre tecnologías, independiente de la capacidad instalada o de la duración del sistema.

El sistema de cultivo bajo invernadero estudiado tiene un consumo energético anual estimado en 5,824.704 kWh, el cual fue distribuido proporcionalmente en función del rendimiento anual del cultivo, para expresar los impactos por tonelada de tomate. El análisis contempló dos escenarios energéticos:

Escenario 1 (Scn-1): Abastecimiento energético a partir de la red eléctrica nacional mexicana, utilizando el flujo Electricity, medium voltage MX |market for |Cut-off, U de Ecoinvent v3.8.

Escenario 2 (Scn-2): Generación fotovoltaica mediante un sistema de 4.31 kWp instalado sobre la cubierta del invernadero, integrado por 11 módulos monocristalinos de 410 Wp y 11 microinversores Enphase IQ 8A.

5.1. Resultados por categoría de impacto obtenidos mediante el método IPCC 2021 GWP100

5.1.1. Potencial de calentamiento global

El potencial de calentamiento global a 100 años (GWP100) muestra diferencias marcadas entre escenarios: Scn-1 45.97 kg CO₂-eq/t de tomate y Scn-2 4.77 kg CO₂-eq/t de tomate, lo que equivale a una reducción relativa cercana al 90.599 % al pasar de un escenario a otro. Estos valores se calcularon con factores de caracterización GWP100 del IPCC, actualmente recomendados por el GHG Protocol, lo que garantiza coherencia con metodologías de referencia en evaluaciones de gases de efecto invernadero [107]. En el plano comparativo, los valores reportados en este estudio se encuentran muy por debajo de lo documentado en otros contextos de producción intensiva. Por ejemplo, en China se ha estimado un impacto de 354 kg CO₂-eq/t de tomate protegido bajo condiciones de fuerte consumo energético [108]. Asimismo, análisis de diferentes sistemas confirman que el uso de calefacción y la matriz eléctrica son los factores que disparan la huella de carbono en la agricultura bajo invernadero [109].

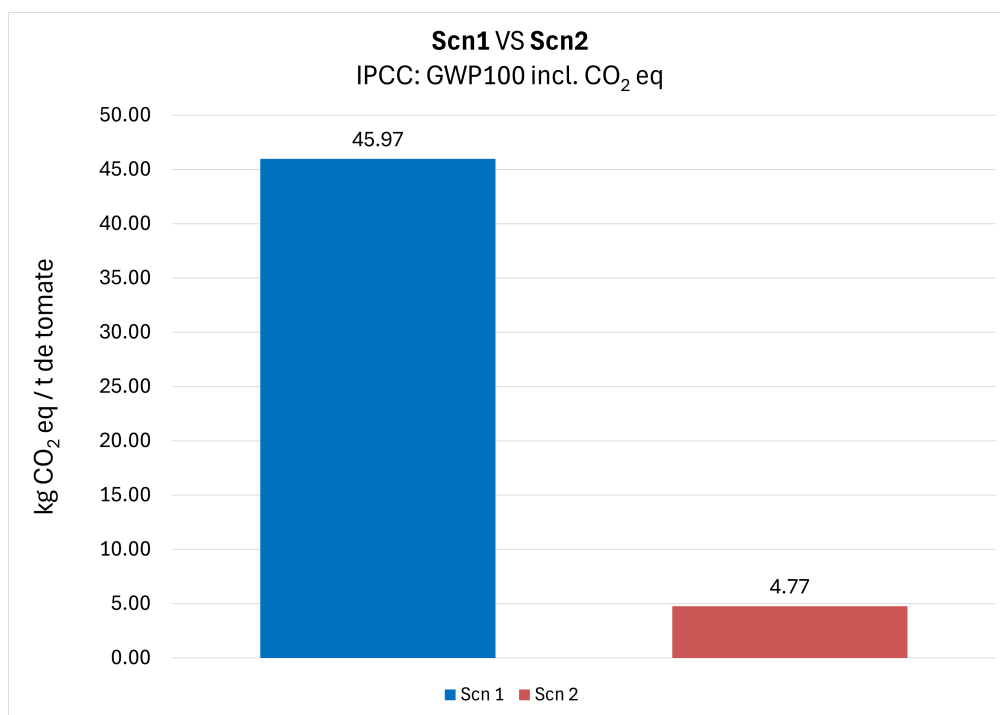


Figura 5.1: Comparación de escenarios en contribución al potencial de calentamiento global

Tabla 5.1: Potencial de calentamiento global/t de tomate

Categoría de impacto	Unidad	Scn-1	Scn-2
Potencial de calentamiento global	kg CO ₂ -eq	45.97	4.77

Distribución por fases del ciclo de vida

La Figura 5.2 integra simultáneamente la contribución por fases del ciclo de vida (producción, instalación y transporte) y el desglose de los subcomponentes que conforman cada etapa, lo que permite identificar con mayor claridad los procesos decisivos en el potencial de calentamiento global del Scn-2.

En este escenario, la fase de producción concentra la mayor parte del impacto, con 3.6 kg CO₂-eq/t de tomate (76 %). Esta contribución proviene casi en su totalidad de los procesos de *paneles fotovoltaicos* y *microinversores*, cuyos inventarios están dominados por la purificación y cristalización del silicio grado solar, así como por la metalurgia primaria del aluminio y cobre utilizados en encapsulados, marcos y electrónica de potencia. Estas etapas presentan alta dependencia de matrices energéticas fósiles, lo que incrementa su huella incorporada [21,34].

La fase de instalación aporta 0.8 kg CO₂-eq/t de tomate (18 %), derivada del impacto de la *estructura de montaje* (aluminio y acero), la *instalación eléctrica* y el consumo puntual de *energía eléctrica* empleado en actividades preparatorias. El impacto de esta etapa no se asocia a emisiones directas en sitio, sino al historial energético y la producción de materiales, en concordancia con lo documentado en la literatura para sistemas fotovoltaicos de pequeña escala [110].

Finalmente, la fase de transporte representa 0.2 kg CO₂-eq/t de tomate (4 %). Este valor se atribuye principalmente al tramo marítimo intercontinental dentro de la cadena logística internacional, que continúa siendo el segmento dominante en emisiones de GEI para equipos fotovoltaicos [12].

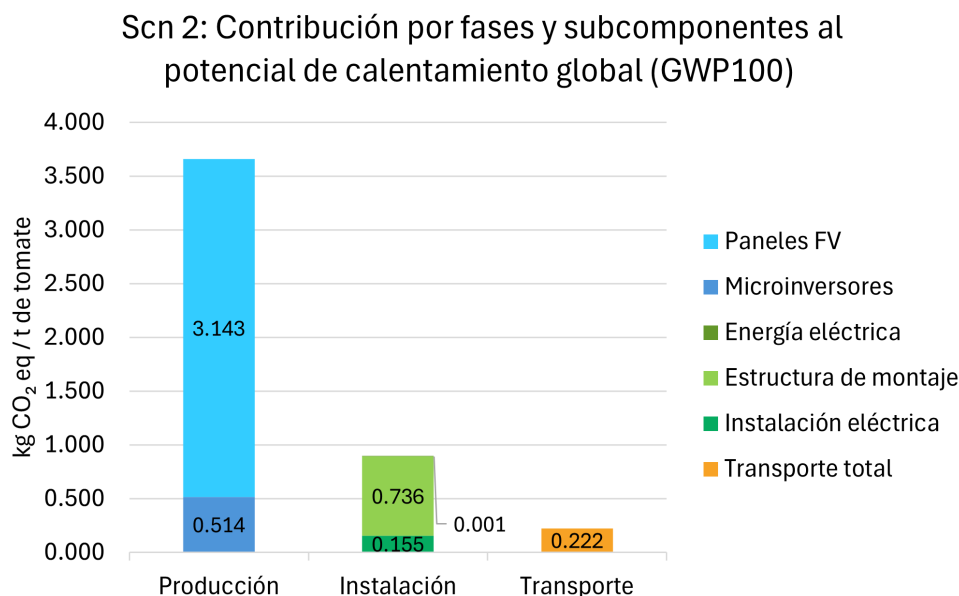


Figura 5.2: Scn-2 Contribución por fases y subcomponentes al potencial de calentamiento global (GWP100).

Estudios de análisis de ciclo de vida aplicados a invernaderos fotovoltaicos han documentado reducciones significativas en el GWP cuando la electricidad solar desplaza consumos de red, lo cual coincide con la brecha observada entre escenarios [111]. No obstante, para que el valor de 4.8 kg CO₂-eq/t de tomate sea defendible, es necesario confirmar: (I) que la fabricación y fin de vida de módulos e inversores estén incluidos, ya que la mayor parte de las emisiones de la fotovoltaica se concentran en estas etapas; (II) que los factores de red y perfiles de consumo horario/estacional estén debidamente fundamentados; y (III) que quede explícito el carácter atribucional o consecuencial del análisis, dado que ello afecta la interpretación de resultados. Las estimaciones globales de la IEA-PVPS sitúan a la electricidad fotovoltaica en rangos de 20–80 g CO₂/kWh dependiendo del mix de fabricación y de la tecnología, lo cual metodológicamente respalda una brecha amplia respecto a la red mexicana [104, 112].

5.2. Resultados por categoría de impacto obtenidos mediante el método ReCiPe Midpoint (H) 2016

Selección de categorías de impacto

Considerando que el propósito principal de este estudio es evaluar las diferencias ambientales asociadas al cambio en la fuente de abastecimiento energético del invernadero, se priorizaron las categorías más directamente relacionadas con las emisiones atmosféricas y el uso de recursos energéticos, dado su impacto determinante en sistemas eléctricos y de generación de

energía.

En consecuencia, únicamente las categorías clasificadas como de alta relevancia se presentan y discuten en la sección principal de resultados. Estas categorías muestran diferencias significativas entre los escenarios evaluados, presentan alta sensibilidad frente al tipo de fuente energética utilizada y son ampliamente reconocidas como indicadores clave en la evaluación ambiental de sistemas fotovoltaicos y agroproductivos [21,34,113].

Las categorías seleccionadas como alta relevancia son Acidificación terrestre (kg SO₂ eq/t de tomate), Toxicidad para humanos (kg 1,4 DB eq/t de tomate), Formación de partículas (kg PM₁₀ eq/t de tomate), Agotamiento de recursos hídricos (kg m³ eq/t de tomate), Agotamiento de metales (kg Fe eq/t de tomate), Agotamiento de combustibles fósiles (kg petróleo eq/t de tomate).

Estas categorías permiten caracterizar impactos estrechamente asociados a la combustión de combustibles fósiles, procesos industriales y a la generación convencional de electricidad, lo cual es central en la comparación entre los escenarios evaluados.

Por otro lado, categorías como *eutrofización*, *ecotoxicidades*, *formación de oxidantes fotoquímicos* fueron clasificadas como relevantes secundarias. Aunque su inclusión es necesaria para mantener la exhaustividad metodológica, su contribución relativa en los perfiles de impacto y su capacidad diferenciadora entre escenarios es menor. Por este motivo, dichas categorías no se discuten en el cuerpo principal del documento, pero sí se reportan de manera íntegra en el Anexo 3, asegurando transparencia y trazabilidad del análisis, conforme a las recomendaciones de mejores prácticas en ACV [91].

A continuación, se presentan los resultados del análisis de ciclo de vida mediante el método ReCiPe, comparando los impactos ambientales por tonelada de producción entre el uso de electricidad de red y un sistema fotovoltaico.

I. Acidificación terrestre

Resultados y comparación cuantitativa

La categoría de acidificación terrestre evalúa el potencial de deposición ácida sobre ecosistemas terrestres derivado de emisiones atmosféricas acidificantes, principalmente dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y, en menor medida, amoníaco (NH_3). Al comparar los escenarios analizados, el Scn-1 presenta un impacto de 0.165 kg SO_2 eq/t de tomate, mientras que el Scn-2 reduce este valor a 0.033 kg SO_2 eq/t de tomate. Esto corresponde a una reducción absoluta de 0.132 kg SO_2 eq/t y a una disminución relativa cercana al 80 %.

De acuerdo con el método ReCiPe 2016 Midpoint (H), el indicador expresado en kg SO_2 eq no representa una emisión directa de dióxido de azufre en el sitio de estudio, sino un potencial caracterizado de acidificación terrestre que integra distintos precursores bajo una métrica común [33]. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como una comparación relativa del potencial de impacto entre escenarios energéticos.

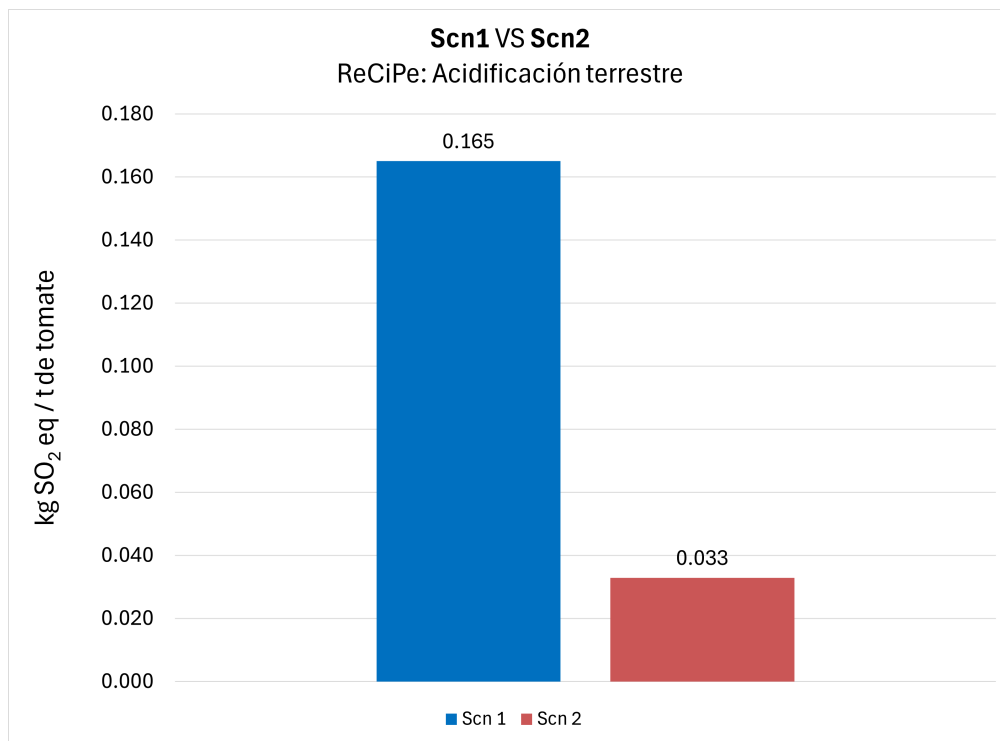


Figura 5.3: Comparación del potencial de acidificación terrestre entre Scn-1 y Scn-2 (ReCiPe 2016 Midpoint (H)).

Tabla 5.2: Acidificación terrestre por tonelada de tomate

Categoría de impacto	Unidad	Scn-1	Scn-2
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	0.165	0.033

Conversión de la reducción a magnitud acumulada

Considerando una producción acumulada estimada de 1,800 t de tomate a lo largo de 25 años (equivalente a 72 t/año), la reducción acumulada del indicador caracterizado asociada al Scn-2 se calcula como:

$$\Delta_{\text{acid, acumulado}} = 0.132 \frac{\text{kg SO}_2 \text{ eq}}{\text{t}} \times 1,800 \text{ t} = 237.6 \text{ kg SO}_2 \text{ eq} \quad (5.1)$$

Este valor representa una disminución agregada del potencial de acidificación terrestre atribuible a la sustitución del suministro eléctrico convencional por generación fotovoltaica, y no una eliminación total de emisiones acidificantes a lo largo del ciclo de vida [19,33].

Origen del impacto y lectura desde el ACV

En el Scn-1, la acidificación terrestre está dominada por el suministro eléctrico convencional y su cadena de suministro, donde la combustión de combustibles fósiles y los procesos asociados a la extracción y refinación liberan emisiones recurrentes de SO₂ y NO_x. Estas emisiones ocurren de manera continua durante la fase operativa del sistema agrícola y explican la elevada contribución observada en este escenario [76,114].

La reducción observada en el Scn-2 se explica por la sustitución de electricidad de red por generación fotovoltaica durante la fase de uso del invernadero, lo que elimina una fracción significativa de las emisiones acidificantes operativas. No obstante, desde la lógica del ACV, el impacto no desaparece por completo, sino que se desplaza hacia etapas upstream del ciclo de vida. En particular, la manufactura del sistema fotovoltaico (incluyendo la producción de módulos, microinversores y estructuras metálicas) concentra el impacto residual debido a procesos metalúrgicos y termoquímicos que generan emisiones precursoras de acidificación [63,112].

Distribución por fases del ciclo de vida en Scn-2

La Figura 5.4 presenta la contribución por fases del ciclo de vida y subcomponentes al potencial de acidificación terrestre en el Scn-2. La fase de producción concentra aproximadamente el 58.3 % del impacto total (0.021 kg SO₂ eq/t de tomate), asociada principalmente a los procesos de purificación del silicio, oxidación de precursores minerales y fundición primaria de metales como aluminio y cobre utilizados en los módulos fotovoltaicos y microinversores [21,34].

La fase de instalación aporta alrededor del 33.3 % del impacto total (0.012 kg SO₂ eq/t de tomate), impulsada por la huella incorporada en la estructura de montaje, el cableado eléctrico y el uso marginal de energía eléctrica. Al igual que en otras categorías, este impacto

no se origina en emisiones locales en el sitio del invernadero, sino en el historial energético e industrial de los materiales empleados [110].

Por último, la fase de transporte contribuye aproximadamente con el 8.3 % del impacto total (0.003 kg SO₂ eq/t de tomate), dominada por el consumo energético del tramo marítimo dentro de la cadena logística internacional.

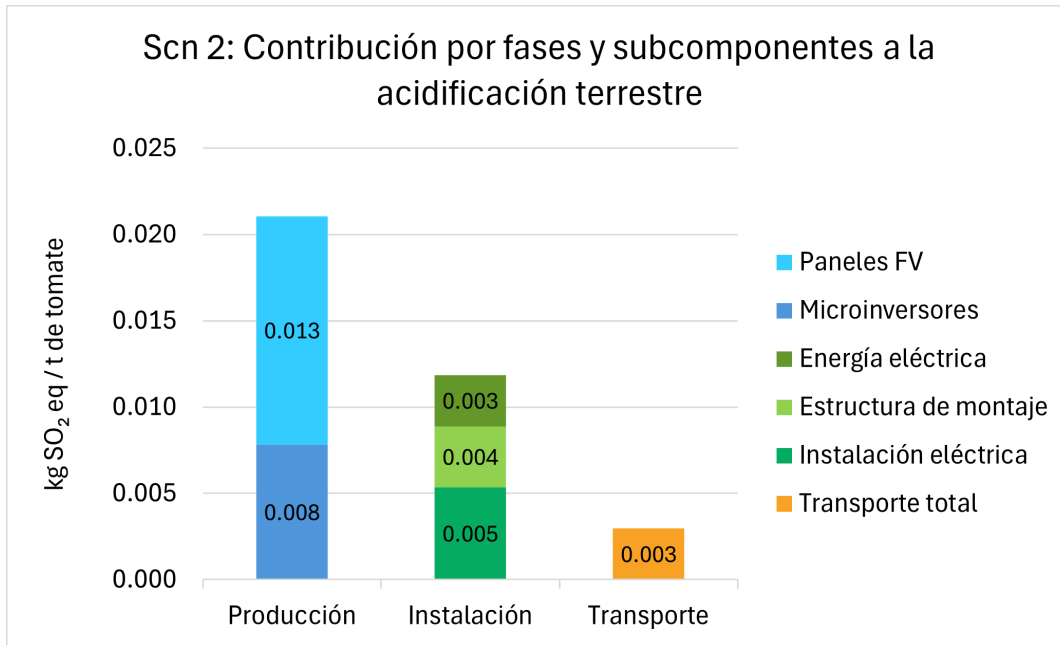


Figura 5.4: Contribución por fases y subcomponentes al potencial de acidificación terrestre en el Scn-2.

Implicaciones y oportunidades de mejora

Los resultados muestran que la integración del sistema fotovoltaico reduce de manera sustancial el potencial de acidificación terrestre durante la fase operativa, lo que constituye un beneficio ambiental relevante asociado a la sustitución de electricidad de origen fósil. Sin embargo, el impacto residual se desplaza hacia la cadena de suministro, donde la manufactura de componentes fotovoltaicos continúa siendo un punto crítico.

Desde una perspectiva de mejora, las principales oportunidades para reducir aún más esta categoría se localizan en: (i) la selección de proveedores con menor intensidad de emisiones acidificantes en procesos industriales, (ii) el incremento del contenido reciclado en aluminio, acero y cobre, reduciendo la necesidad de producción primaria, (iii) la optimización de la masa estructural y del cableado, y (iv) la extensión de la vida útil del sistema fotovoltaico, lo que permite diluir los impactos incorporados por unidad de servicio energético generado. Estas estrategias son coherentes con recomendaciones de la literatura especializada en ACV de sistemas fotovoltaicos y con los objetivos de transición energética a largo plazo [13, 112].

II. Toxicidad humana

Resultados y comparación cuantitativa

La categoría de toxicidad humana evalúa el potencial de efectos adversos sobre la salud humana derivados de la liberación de sustancias tóxicas al aire, agua y suelo a lo largo del ciclo de vida del sistema. Al comparar los escenarios analizados, el Scn-1 presenta un impacto de 12.240 kg 1,4-diclorobenceno equivalente (1,4-DCB eq) por tonelada de tomate, mientras que el Scn-2 reduce este valor a 6.101 kg 1,4-DCB eq/t de tomate. Esto corresponde a una reducción absoluta de 6.139 kg 1,4-DCB eq/t y a una disminución relativa aproximada del 50 %.

De acuerdo con el método ReCiPe 2016 Midpoint (H), el indicador expresado en kg 1,4-DCB eq no representa la emisión directa de una sustancia específica, sino un potencial caracterizado de toxicidad humana que integra sustancias con distintos perfiles toxicológicos mediante factores de caracterización comunes [33, 77]. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como una comparación relativa de presiones ambientales y no como una estimación directa de riesgo sanitario local.

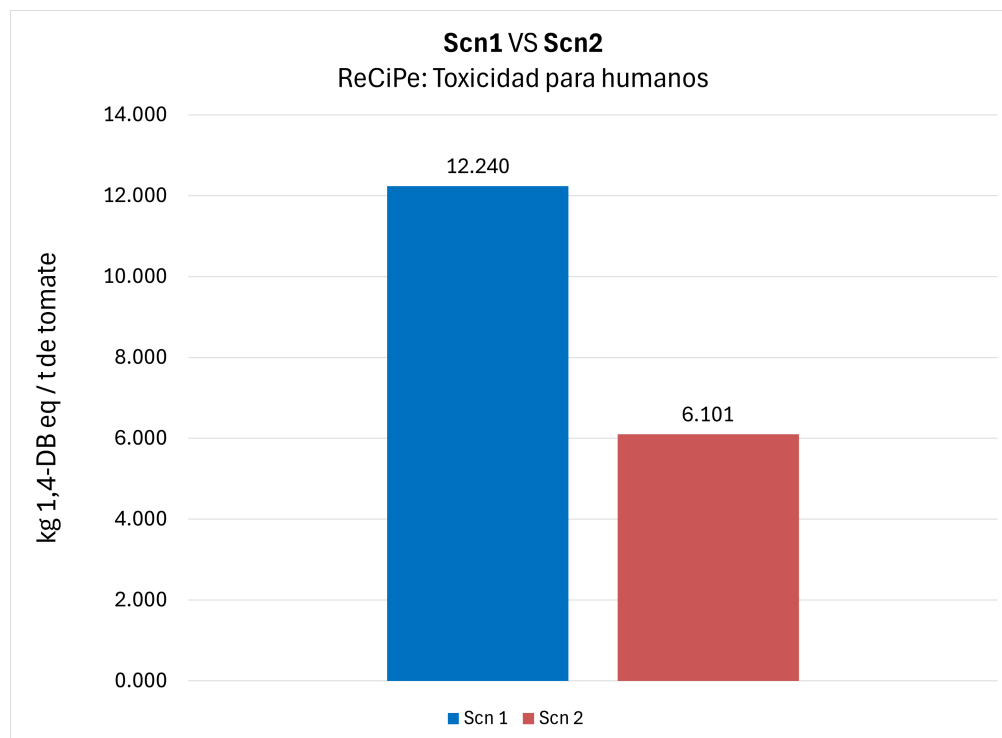


Figura 5.5: Comparación del impacto de toxicidad humana entre Scn-1 y Scn-2 (ReCiPe 2016 Midpoint (H)).

Tabla 5.3: Toxicidad humana por tonelada de tomate

Categoría de impacto	Unidad	Scn-1	Scn-2
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB eq	12.240	6.101

Conversión de la reducción a magnitud acumulada

Considerando una producción acumulada estimada de 1,800 t de tomate a lo largo de 25 años (equivalente a 72 t/año), la reducción acumulada del indicador caracterizado asociada al Scn-2 se calcula como:

$$\Delta_{\text{tox, acumulado}} = 6.139 \frac{\text{kg 1,4-DCB eq}}{\text{t}} \times 1,800 \text{ t} = 11,050 \text{ kg 1,4-DCB eq} \quad (5.2)$$

Este valor representa una disminución agregada del potencial de toxicidad humana atribuible al cambio de escenario energético, y no una eliminación total de sustancias peligrosas a lo largo del ciclo de vida del sistema [19, 33].

Origen del impacto y lectura desde el ACV

En el Scn-1, la toxicidad humana está dominada por el suministro eléctrico convencional y su cadena de suministro, donde la extracción, procesamiento y combustión de combustibles fósiles generan emisiones de compuestos orgánicos volátiles, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y metales pesados con potencial tóxico directo e indirecto sobre la salud humana. Estas emisiones ocurren de forma continua durante la fase operativa del sistema agrícola [12, 26].

La reducción observada en el Scn-2 se explica por la sustitución de electricidad de red por generación fotovoltaica durante la fase de uso del invernadero, lo que elimina una fracción significativa de las emisiones operativas asociadas a la combustión fósil. No obstante, desde la lógica del ACV, el impacto no desaparece por completo, sino que se desplaza hacia etapas upstream del ciclo de vida. En particular, la manufactura del sistema fotovoltaico (especialmente la electrónica de potencia (microinversores), los módulos fotovoltaicos y la producción de metales) concentra el impacto residual en esta categoría [63, 112].

Distribución por fases del ciclo de vida en Scn-2

La Figura 5.6 presenta la contribución por fases del ciclo de vida y subcomponentes a la toxicidad humana en el Scn-2. La fase de producción concentra la mayor parte del impacto, con aproximadamente 4.134 kg 1,4-DCB eq/t de tomate (67.3 %). Este resultado se asocia

principalmente a los módulos fotovoltaicos y microinversores, cuyas cadenas de suministro incorporan solventes orgánicos, agentes de limpieza, grabadores químicos y compuestos halogenados utilizados en la fabricación de obleas de silicio, celdas fotovoltaicas y tarjetas electrónicas. Aunque estos compuestos se emplean en cantidades relativamente pequeñas, presentan factores de caracterización elevados debido a su potencial toxicológico [34,35].

La fase de instalación aporta alrededor de 1.968 kg 1,4-DCB eq/t de tomate (32.0 %), impulsada principalmente por la estructura de montaje (acero y aluminio), el cableado eléctrico y el consumo indirecto de energía asociado a la producción primaria de metales, donde los procesos de reducción y calcinación liberan sustancias con elevado potencial tóxico [21].

Por su parte, la fase de transporte contribuye de manera marginal, con aproximadamente 0.045 kg 1,4-DCB eq/t de tomate (0.73 %). Este impacto se origina principalmente en la logística internacional, particularmente en el transporte marítimo, y no en la operación vehicular directa en el sitio de estudio.

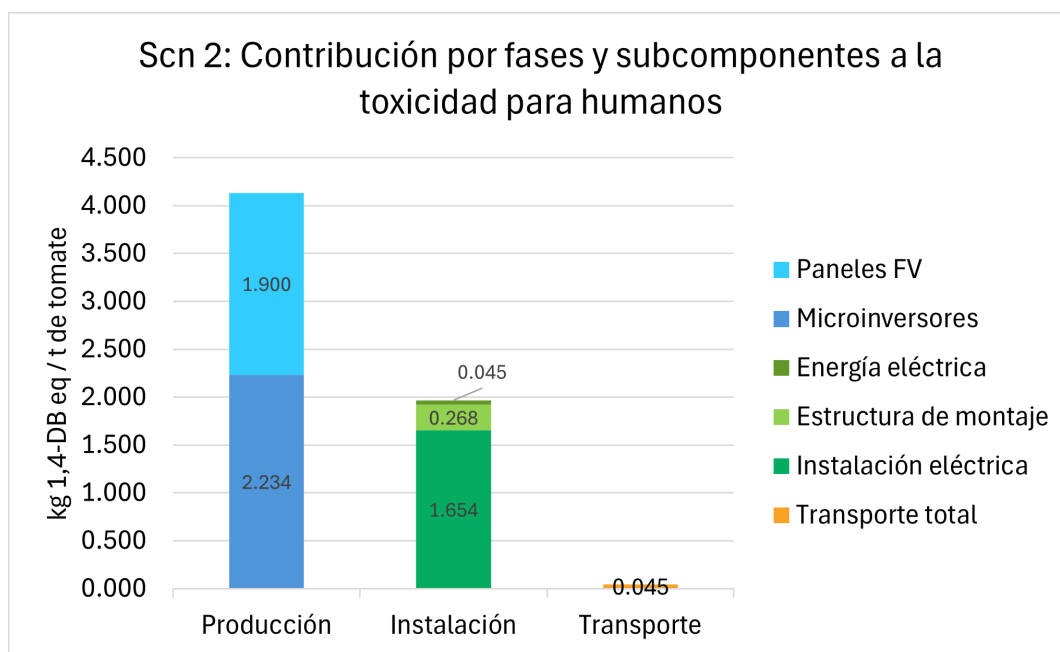


Figura 5.6: Contribución por fases y subcomponentes a la toxicidad humana en el Scn-2.

Implicaciones y oportunidades de mejora

Los resultados muestran que la integración del sistema fotovoltaico reduce de manera significativa el potencial de toxicidad humana durante la fase operativa, lo que constituye un beneficio relevante desde una perspectiva de salud ambiental. Sin embargo, el impacto residual se desplaza hacia la cadena de suministro, donde la manufactura de componentes fotovoltaicos y electrónicos continúa siendo un punto crítico.

Desde una perspectiva de mejora, las principales oportunidades para reducir aún más esta

categoría se localizan en: (i) la extensión de la vida útil y reducción de reemplazos de micro-inversores, (ii) el ecodiseño orientado al desmontaje, reparación y reciclaje de componentes electrónicos, (iii) la gestión adecuada de residuos electrónicos al final de la vida útil, (iv) el incremento del contenido reciclado en metales conductores y estructuras, y (v) la selección de proveedores con mejores prácticas ambientales y químicas en procesos industriales. Estas estrategias permiten disminuir los impactos upstream sin comprometer los beneficios alcanzados en la fase de uso del sistema fotovoltaico [13,90,91].

III. Formación de partículas

Resultados y comparación cuantitativa

La categoría de formación de partículas evalúa la contribución potencial a la generación de material particulado inhalable con diámetros aerodinámicos menores a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}), considerando tanto emisiones directas como emisiones de precursores atmosféricos (principalmente SO_2 , NO_x y NH_3) que pueden dar lugar a partículas secundarias. Al comparar los escenarios analizados, el Scn-1 presenta un impacto de $0.093\ \text{kg PM}_{10}\ \text{eq/t}$ de tomate, mientras que el Scn-2 reduce este valor a $0.015\ \text{kg PM}_{10}\ \text{eq/t}$ de tomate. Esto corresponde a una reducción absoluta de $0.078\ \text{kg PM}_{10}\ \text{eq/t}$ y a una disminución relativa aproximada del 84 %.

De acuerdo con el método ReCiPe 2016 Midpoint (H), el indicador expresado en $\text{kg PM}_{10}\ \text{eq}$ no representa una masa física directa de partículas emitidas en el sitio de estudio, sino un potencial caracterizado de formación de partículas a lo largo del ciclo de vida del sistema [33]. En consecuencia, la reducción observada refleja principalmente cambios en el origen de la energía utilizada y no una medición directa de calidad del aire local.

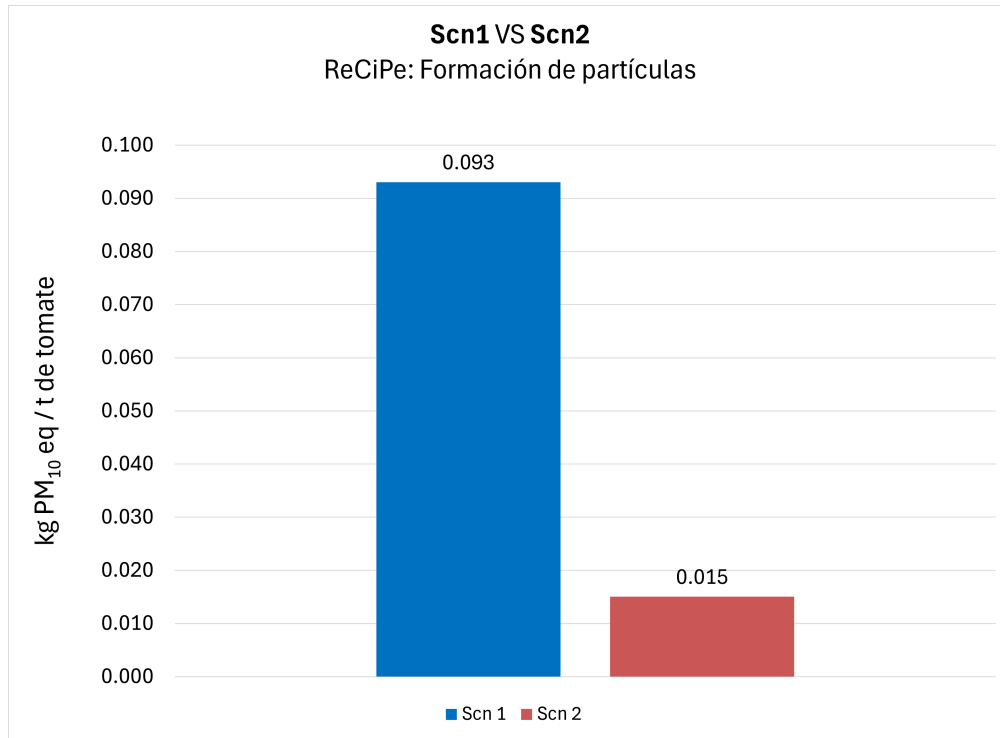


Figura 5.7: Comparación del potencial de formación de partículas entre Scn-1 y Scn-2 (ReCiPe 2016 Midpoint (H)).

Tabla 5.4: Formación de partículas por tonelada de tomate

Categoría de impacto	Unidad	Scn-1	Scn-2
Formación de partículas	kg PM ₁₀ eq	0.093	0.015

Conversión de la reducción a magnitud acumulada

Considerando una producción acumulada estimada de 1,800 t de tomate a lo largo de 25 años (equivalente a 72 t/año), la reducción acumulada del indicador caracterizado asociada al Scn-2 se calcula como:

$$\Delta_{PM, \text{acumulado}} = 0.078 \frac{\text{kg PM}_{10} \text{ eq}}{\text{t}} \times 1,800 \text{ t} = 140.4 \text{ kg PM}_{10} \text{ eq} \quad (5.3)$$

Este valor representa una disminución agregada del potencial de formación de partículas atribuible al cambio de escenario energético, y no una reducción directa y localizada de emisiones de PM₁₀ en el sitio del invernadero [19, 33].

Origen del impacto y lectura desde el ACV

En el Scn-1, el suministro eléctrico convencional constituye el proceso dominante en esta categoría, debido a las emisiones continuas de material particulado primario y de precursores atmosféricos asociadas a la generación termoeléctrica y a la cadena de suministro de combustibles fósiles. Estas emisiones ocurren de forma recurrente durante toda la fase de operación del sistema agrícola.

La reducción observada en el Scn-2 se explica por la sustitución de electricidad de red por generación fotovoltaica durante la fase de uso del invernadero, lo que elimina una fracción significativa de las emisiones operativas asociadas a la combustión fósil. Desde la lógica del ACV, este resultado refleja un desplazamiento del impacto desde la fase de uso hacia etapas upstream del ciclo de vida. El impacto residual del Scn-2 se concentra principalmente en procesos energointensivos y metalúrgicos asociados a la fabricación de módulos fotovoltaicos, microinversores y estructuras de soporte, así como en la logística internacional de los componentes [63, 112].

Distribución por fases del ciclo de vida en Scn-2

La Figura 5.8 presenta la contribución por fases del ciclo de vida y subcomponentes a la formación de partículas en el Scn-2. El impacto total del escenario asciende a aproximadamente 0.015–0.016 kg PM₁₀ eq/t de tomate y se concentra principalmente en la fase de producción, que representa alrededor del 62.5 % del total. Esta contribución se asocia a los procesos de fabricación de módulos fotovoltaicos y microinversores, donde la fundición y refinado de metales (aluminio, cobre y plata) generan emisiones primarias de partículas y de precursores atmosféricos. Asimismo, la producción de silicio grado solar incluye etapas de reducción y recristalización que liberan NO_x y SO₂, los cuales pueden transformarse en partículas secundarias en la atmósfera [34, 113].

La fase de instalación aporta aproximadamente el 31.25 % del impacto total (alrededor de 0.005 kg PM₁₀ eq/t de tomate). Este aporte se relaciona principalmente con la estructura de montaje (acero y aluminio) y con procesos mecánicos asociados a la infraestructura eléctrica. Aunque las emisiones directas en sitio son mínimas, la contribución refleja la carga ambiental incorporada en los materiales utilizados.

Por su parte, la fase de transporte contribuye cerca del 6.25 % del impacto total (aproximadamente 0.001 kg PM₁₀ eq/t de tomate). Este impacto se origina principalmente en la cadena logística internacional, donde el transporte ferroviario eléctrico en regiones con mix eléctrico intensivo en carbón y el transporte marítimo intercontinental con combustibles pesados generan emisiones indirectas de precursores de partículas [22, 26].

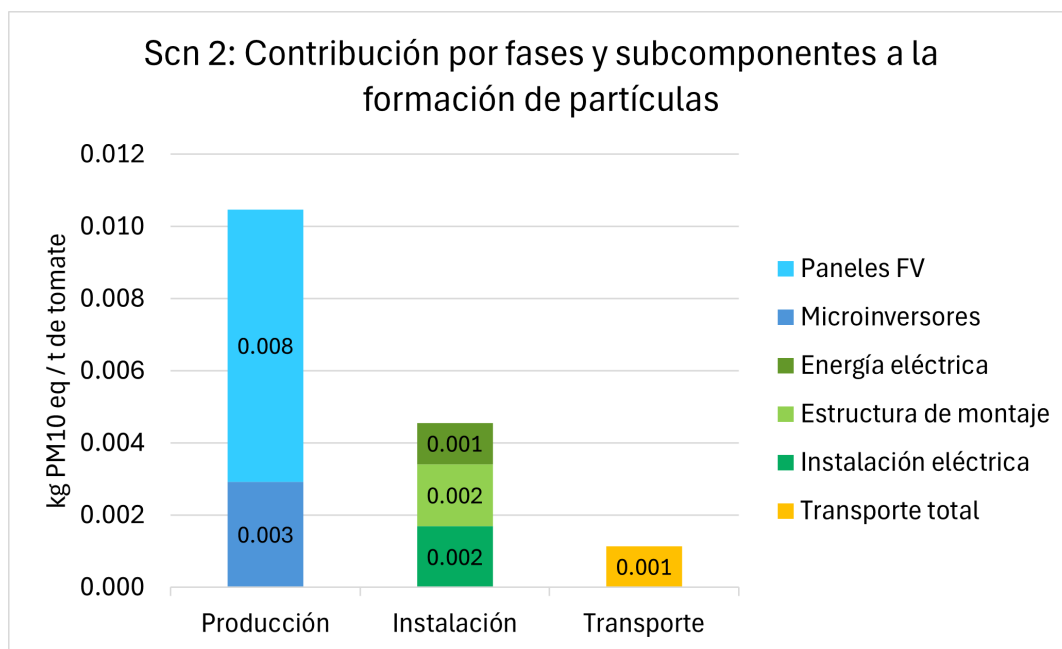


Figura 5.8: Contribución por fases y subcomponentes a la formación de partículas en el Scn-2.

Implicaciones y oportunidades de mejora

Los resultados muestran que la integración del sistema fotovoltaico reduce de manera significativa el potencial de formación de partículas durante la fase operativa, lo que constituye un beneficio relevante en términos de calidad del aire asociada al uso del sistema energético. No obstante, el impacto residual se desplaza hacia la cadena de suministro, donde los procesos metalúrgicos y la purificación del silicio siguen siendo puntos críticos.

Desde una perspectiva de mejora, las principales oportunidades para reducir aún más esta categoría se localizan en: (i) la selección de proveedores con menores emisiones atmosféricas en procesos industriales, (ii) el incremento del contenido reciclado de aluminio y cobre, reduciendo la necesidad de producción primaria, (iii) la optimización de la masa estructural y del cableado, y (iv) la adopción de rutas logísticas y modos de transporte con menor contribución a emisiones de partículas. Estas estrategias permiten disminuir los impactos upstream sin comprometer los beneficios alcanzados en la fase de uso del sistema fotovoltaico [104,112].

IV. Agotamiento de recursos hídricos

Resultados y comparación cuantitativa

La categoría de agotamiento de recursos hídricos cuantifica la presión potencial asociada al uso de agua a lo largo del ciclo de vida del sistema evaluado. Al comparar los escenarios analizados, el Scn-1 presenta un valor de $0.090 \text{ m}^3/\text{t}$ de tomate, mientras que el Scn-2 alcanza $0.102 \text{ m}^3/\text{t}$ de tomate. Este comportamiento corresponde a un incremento absoluto de $0.012 \text{ m}^3/\text{t}$ y a un aumento relativo aproximado del 13.3 %.

De acuerdo con el método ReCiPe 2016 Midpoint (H), el indicador expresado en m^3 representa un volumen caracterizado de uso de recursos hídricos y no debe interpretarse como consumo directo de agua en la fase operativa del invernadero [33]. En consecuencia, el incremento observado en el Scn-2 refleja cambios en la cadena de suministro del sistema energético y no un aumento del consumo hídrico local durante la producción agrícola.

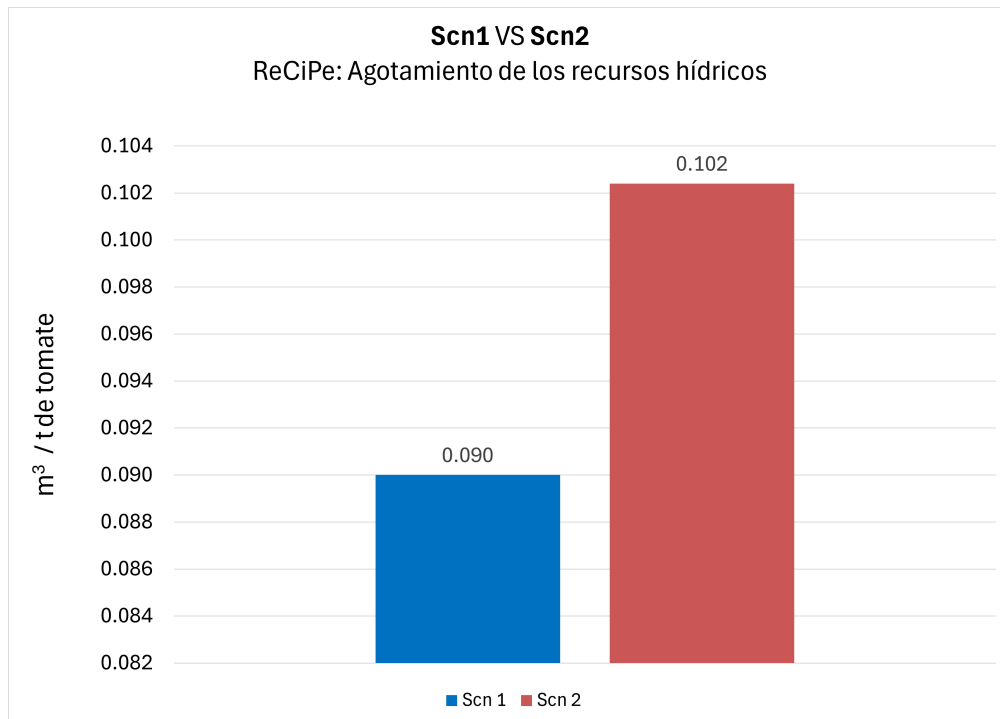


Figura 5.9: Comparación del agotamiento de recursos hídricos entre Scn-1 y Scn-2 (ReCiPe 2016 Midpoint (H)).

Tabla 5.5: Agotamiento de recursos hídricos por tonelada de tomate

Categoría de impacto	Unidad	Scn-1	Scn-2
Agotamiento de recursos hídricos	m ³	0.090	0.102

Conversión del incremento a magnitud acumulada

Considerando una producción acumulada estimada de 1,800 t de tomate a lo largo de 25 años (equivalente a 72 t/año), el incremento absoluto acumulado del indicador caracterizado asociado al Scn-2 se calcula como:

$$\Delta_{\text{agua, acumulado}} = 0.012 \frac{\text{m}^3}{\text{t}} \times 1,800 \text{ t} = 21.6 \text{ m}^3 \quad (5.4)$$

Este valor representa una magnitud agregada de uso potencial de recursos hídricos incorporados en la cadena de suministro del sistema fotovoltaico y no corresponde a un consumo operativo continuo de agua durante la vida útil del invernadero [19,33].

Origen del impacto y lectura desde el ACV

El incremento observado en el Scn-2 se explica por la incorporación de procesos industriales intensivos en agua asociados a la manufactura de sistemas fotovoltaicos de silicio cristalino. En particular, los inventarios de ACV identifican como procesos dominantes: (i) la producción de polisilicio y la cristalización, que requieren etapas de purificación química, enfriamiento y lavado; (ii) la fabricación de obleas y celdas, donde se emplea agua, incluida agua ultrapura (*ultrapure water*, UPW), para limpieza y control de contaminación; y (iii) la fabricación de vidrio templado y encapsulantes utilizados en los módulos fotovoltaicos [63,90,104].

Desde la lógica del ACV, este comportamiento refleja un desplazamiento tanto temporal como geográfico del uso de recursos hídricos. Mientras que en el Scn-1 el consumo de agua asociado a la electricidad de red se encuentra implícito en la infraestructura nacional de generación, en el Scn-2 el uso hídrico se concentra en las etapas iniciales del ciclo de vida y ocurre principalmente en los países productores de componentes fotovoltaicos, como China y el sudeste asiático. La relevancia ambiental de este impacto depende, por tanto, del contexto local de disponibilidad y estrés hídrico en dichas regiones [19,90,115].

Distribución por fases del ciclo de vida en Scn-2

La Figura 5.10 presenta la contribución por fases del ciclo de vida y subcomponentes al agotamiento de recursos hídricos en el Scn-2. El impacto total asciende a 0.102 m³/t de tomate y se concentra marcadamente en la fase de producción, que representa el 91.262 % del total (0.094 m³/t de tomate). Esta etapa está dominada por los procesos asociados a los módulos fotovoltaicos y microinversores, donde la purificación del silicio grado solar constituye la principal fuente de uso hídrico debido a la utilización de múltiples baños químicos, sistemas de enfriamiento y agua ultrapura.

La fase de instalación contribuye con el 7.766 % del impacto total (0.008 m³/t de tomate),

asociada principalmente a la fabricación de la estructura de montaje (acero y aluminio), cuyos procesos de colado, corte, temple y acabado superficial requieren agua industrial [21]. Finalmente, la fase de transporte aporta únicamente el 0.970 % del impacto total ($0.001 \text{ m}^3/\text{t}$ de tomate), debido al uso predominante de transporte ferroviario eléctrico en los tramos terrestres, lo que reduce el uso indirecto de agua asociado a combustibles fósiles [117].

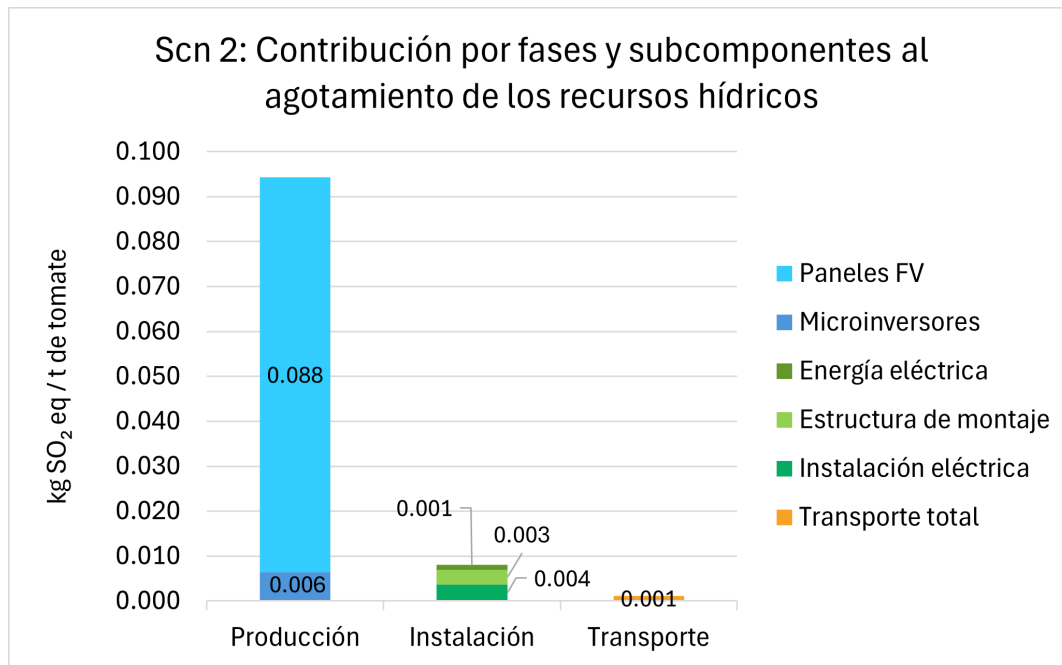


Figura 5.10: Contribución por fases y subcomponentes al agotamiento de recursos hídricos en el Scn-2.

Implicaciones y oportunidades de mejora

Los resultados indican que el incremento en el agotamiento de recursos hídricos es una consecuencia esperada de la materialización de la infraestructura fotovoltaica y se concentra en la fase de producción de componentes. Desde una perspectiva de sostenibilidad, las principales oportunidades de mejora se localizan en la cadena de suministro, incluyendo: (i) la implementación de sistemas de recirculación y eficiencia en el uso de agua ultrapura durante la fabricación de celdas y módulos, (ii) la selección de proveedores con prácticas avanzadas de gestión hídrica, (iii) la optimización de procesos de limpieza y enfriamiento, y (iv) la extensión de la vida útil del sistema fotovoltaico, lo que permite diluir el uso hídrico incorporado por unidad de energía eléctrica generada.

Estas estrategias son consistentes con las recomendaciones de la literatura especializada en ACV de sistemas fotovoltaicos y permiten reducir la presión sobre recursos hídricos sin comprometer el desempeño funcional del sistema [90, 104].

V. Agotamiento de metales

Resultados y comparación cuantitativa

La categoría de agotamiento de metales evalúa la presión potencial sobre recursos minerales no renovables asociada a la extracción, refinado y procesamiento de metales a lo largo del ciclo de vida del sistema. Al comparar los escenarios analizados, el Scn-1 presenta un impacto de 0.463 kg Fe eq/t de tomate, mientras que el Scn-2 alcanza 1.804 kg Fe eq/t de tomate. Este comportamiento corresponde a un incremento absoluto de 1.341 kg Fe eq/t y a un aumento relativo aproximado del 289–290 %.

Desde la perspectiva del método ReCiPe 2016 Midpoint (H), el indicador expresado en kg Fe equivalente no representa una masa física directa de hierro u otros metales extraídos, sino una medida caracterizada de la presión potencial sobre reservas minerales, utilizada para comparar alternativas tecnológicas dentro de un marco de ACV consistente [19,33]. Por tanto, la interpretación de este resultado debe priorizar la magnitud absoluta del cambio y su relación con la función del sistema, evitando conclusiones basadas exclusivamente en porcentajes relativos.

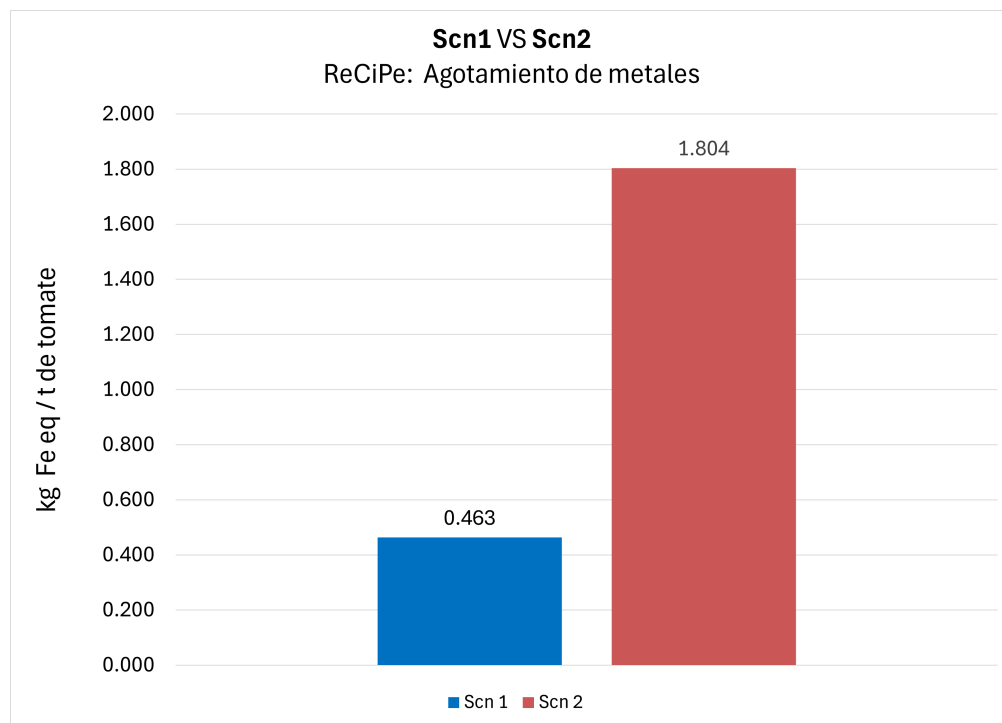


Figura 5.11: Comparación del agotamiento de metales entre Scn-1 y Scn-2 (ReCiPe 2016 Midpoint (H)).

Tabla 5.6: Agotamiento de metales por tonelada de tomate

Categoría de impacto	Unidad	Scn-1	Scn-2
Agotamiento de metales	kg Fe eq	0.463	1.804

Conversión del incremento a magnitud acumulada

Considerando una producción acumulada estimada de 1,800 t de tomate a lo largo de 25 años (equivalente a 72 t/año), el incremento absoluto acumulado del indicador caracterizado asociado al Scn-2 se calcula como:

$$\Delta_{\text{acumulado}} = 1.341 \frac{\text{kg Fe eq}}{\text{t}} \times 1,800 \text{ t} = 2,414 \text{ kg Fe eq} \quad (5.5)$$

Este valor debe interpretarse como una medida agregada de presión potencial sobre recursos minerales a lo largo de la vida útil del sistema, y no como una extracción física directa de metales. Su utilidad radica en permitir comparaciones coherentes entre escenarios dentro del marco metodológico del ACV [67].

Origen del impacto y lectura desde el ACV

El incremento observado en el Scn-2 se explica por la incorporación explícita de materiales metálicos asociados al sistema fotovoltaico. En particular, los procesos que dominan esta categoría incluyen: (i) la extracción y refinado de aluminio y acero para la estructura de montaje, (ii) la producción y refinado de cobre para cableado y conexiones eléctricas, y (iii) la manufactura de componentes electrónicos en los microinversores, que integran tarjetas electrónicas, semiconductores, soldaduras y conectores. Adicionalmente, pequeñas fracciones de metales de alta relevancia tecnológica, como la plata utilizada en contactos eléctricos, pueden contribuir de manera significativa al indicador caracterizado [63, 112].

Desde la lógica del ACV, este resultado refleja un desplazamiento de la presión sobre recursos minerales hacia las etapas iniciales del ciclo de vida. Mientras que en el Scn-1 el uso de metales permanece implícito en la infraestructura del sistema eléctrico nacional y se distribuye de manera continua durante la operación, en el Scn-2 el consumo de recursos minerales se concentra principalmente en las fases de producción e instalación del sistema fotovoltaico, sin requerimientos adicionales de metales durante la fase de uso. Este patrón ha sido ampliamente documentado en evaluaciones de tecnologías fotovoltaicas en distintos contextos geográficos [112, 113, 116].

Distribución por fases del ciclo de vida en Scn-2

La Figura 5.12 presenta la contribución por fases del ciclo de vida y subcomponentes al agotamiento de metales en el Scn-2. La fase de producción concentra el 68.832 % del impacto total, atribuible principalmente a los módulos fotovoltaicos y microinversores. Esta contribución se relaciona con la elevada demanda de aluminio, cobre y plata, así como con los insumos necesarios para el procesamiento del silicio cristalino. Aunque el silicio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, su purificación a grado solar requiere procesos termoquímicos de alta temperatura, reactivos químicos y catalizadores, lo que genera impactos indirectos en esta categoría [22,114].

La fase de instalación aporta el 30.506 % del impacto total y está dominada por la estructura de montaje (acero y aluminio) y por el uso intensivo de cobre en el cableado y las conexiones eléctricas. Este comportamiento es consistente con estudios que muestran que el *Balance of System* (BOS) puede representar una fracción significativa del consumo de metales en instalaciones fotovoltaicas en invernaderos y zonas rurales [113].

Finalmente, la fase de transporte contribuye únicamente con el 0.660 % del impacto total. Su participación reducida se asocia al uso de transporte ferroviario eléctrico en los tramos terrestres, lo que disminuye la energía primaria requerida en la logística y, de manera indirecta, la presión sobre recursos minerales en comparación con modos de transporte basados en combustibles fósiles [117].

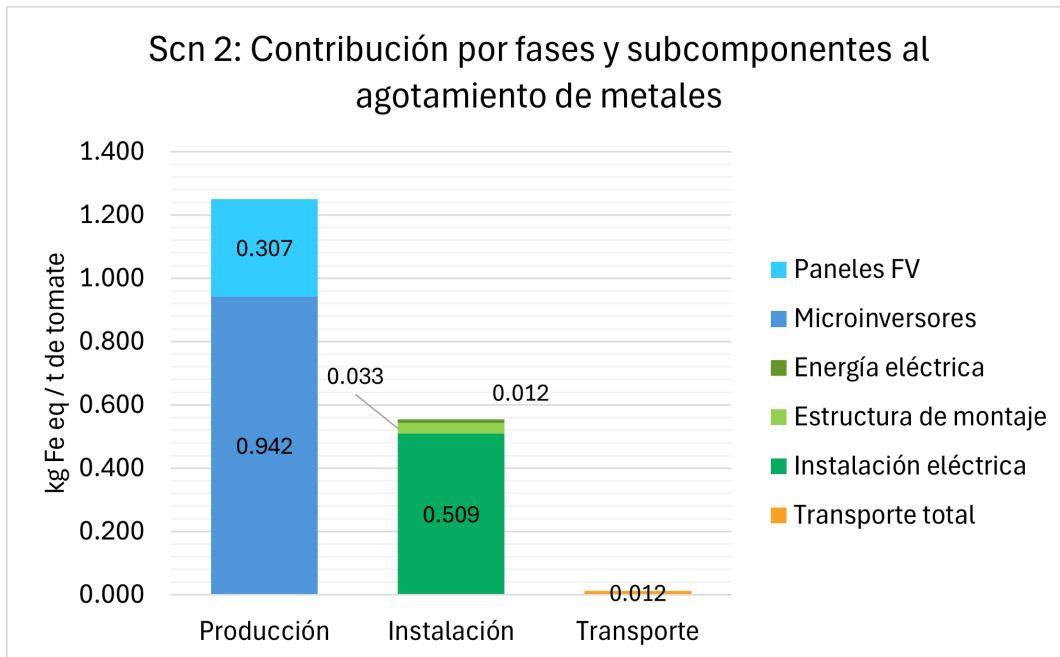


Figura 5.12: Contribución por fases y subcomponentes al agotamiento de metales en el Scn-2.

Implicaciones y oportunidades de mejora

Los resultados indican que el incremento en el agotamiento de metales es una consecuencia esperada de la materialización de la infraestructura fotovoltaica y no un efecto adverso aislado. Desde una perspectiva de sostenibilidad, las principales oportunidades de mejora se concentran en la cadena de suministro y en el fin de vida del sistema, incluyendo: (i) el incremento del contenido reciclado de aluminio, cobre y acero, (ii) la recuperación de metales al final de la vida útil, particularmente en residuos electrónicos de microinversores, (iii) el ecodiseño orientado al desmontaje y la reparabilidad, (iv) la optimización de la masa estructural y de las longitudes de cableado, y (v) la extensión de la vida útil del sistema y de sus componentes electrónicos.

Estas estrategias permiten mitigar la presión sobre recursos minerales sin comprometer la función principal del sistema fotovoltaico, reforzando la coherencia del Scn-2 con los principios de transición energética y sostenibilidad a largo plazo [13,90].

VI. Agotamiento de combustibles fósiles

Resultados y comparación cuantitativa

El agotamiento de combustibles fósiles muestra una de las reducciones más significativas entre las categorías de impacto analizadas. El Scn-1, correspondiente al suministro eléctrico convencional de la red, registra un valor de 14.455 kg petróleo eq/t de tomate, mientras que el Scn-2, basado en la generación fotovoltaica en sitio, reduce este indicador a 1.311 kg petróleo eq/t de tomate. Esta diferencia representa una reducción absoluta de 13.144 kg petróleo eq/t y una reducción relativa del 91.684 %, evidenciando una disminución sustancial en la dependencia de recursos energéticos fósiles no renovables.

Desde la perspectiva del método ReCiPe 2016 Midpoint (H), el indicador expresado en kg petróleo equivalente no representa un consumo físico directo de petróleo, sino una medida caracterizada de la demanda acumulada de energía primaria fósil (petróleo, gas natural y carbón) asociada a lo largo del ciclo de vida del sistema evaluado [33]. En este sentido, los resultados reflejan una menor presión sobre los recursos fósiles como consecuencia directa del cambio en el origen de la energía utilizada.

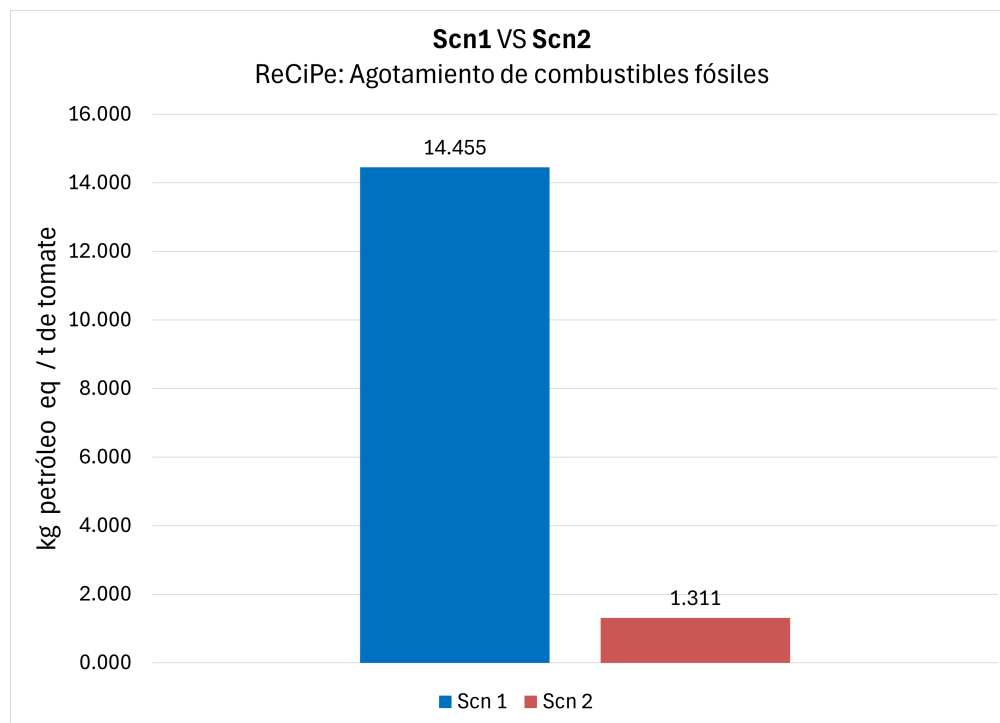


Figura 5.13: Comparación del agotamiento de combustibles fósiles entre Scn-1 y Scn-2 (ReCiPe 2016 Midpoint (H)).

Tabla 5.7: Agotamiento de combustibles fósiles por tonelada de tomate

Categoría de impacto	Unidad	Scn-1	Scn-2
Agotamiento de combustibles fósiles	kg petróleo eq	14.455	1.311

Interpretación desde el enfoque de ACV: desplazamiento energético

La reducción observada se explica principalmente por la sustitución del suministro eléctrico de la red por generación fotovoltaica en el sitio del invernadero. En el sistema propuesto, la generación anual del sistema FV alcanza 5,824.70 kWh/año, lo que implica que una fracción equivalente de la demanda eléctrica deja de ser abastecida por el mix eléctrico nacional, caracterizado por una participación relevante de combustibles fósiles.

Desde la lógica del ACV, este resultado debe interpretarse como un desplazamiento de la demanda de energía primaria fósil asociada a la fase de uso del sistema, y no como la eliminación total del uso de combustibles fósiles en el ciclo de vida [19,20]. Este comportamiento es consistente con los principios metodológicos del ACV y con evaluaciones previas de sistemas fotovoltaicos reportadas en la literatura [112].

Distribución por fases del ciclo de vida en Scn-2

La Figura 5.14 presenta la contribución por fases del ciclo de vida (producción, instalación y transporte) y por subcomponentes al agotamiento de combustibles fósiles en el Scn-2. La fase de producción concentra el 73.104 % del impacto total, equivalente a 1.003 kg petróleo eq/t de tomate. Este resultado se asocia principalmente a los procesos intensivos en energía involucrados en la fabricación de módulos fotovoltaicos y microinversores, incluyendo la purificación del silicio, la cristalización, la deposición de capas conductoras y el ensamblaje de celdas y componentes electrónicos [90].

Adicionalmente, la elevada intensidad fósil del mix eléctrico industrial en los países productores (particularmente en regiones donde predomina la generación a partir de carbón) amplifica el impacto incorporado en los materiales y componentes fotovoltaicos [13].

La fase de instalación aporta el 22.448 % del impacto total (0.308 kg petróleo eq/t de tomate), impulsada principalmente por la fabricación de la estructura de montaje (acero y aluminio) y por el consumo energético asociado a las actividades de instalación eléctrica. Aunque la electricidad utilizada en sitio presenta una menor intensidad fósil que la empleada en procesos industriales, la producción primaria de metales continúa dependiendo de combustibles fósiles en las etapas de fundición, reducción y transformación [21].

Por su parte, la fase de transporte contribuye con el 4.446 % del impacto total (0.061 kg petróleo eq/t de tomate). Este aporte se origina principalmente en la logística internacional de

los componentes, donde el transporte marítimo intercontinental, a pesar de su eficiencia relativa por tonelada-kilómetro, mantiene una dependencia significativa de combustibles fósiles pesados [118].

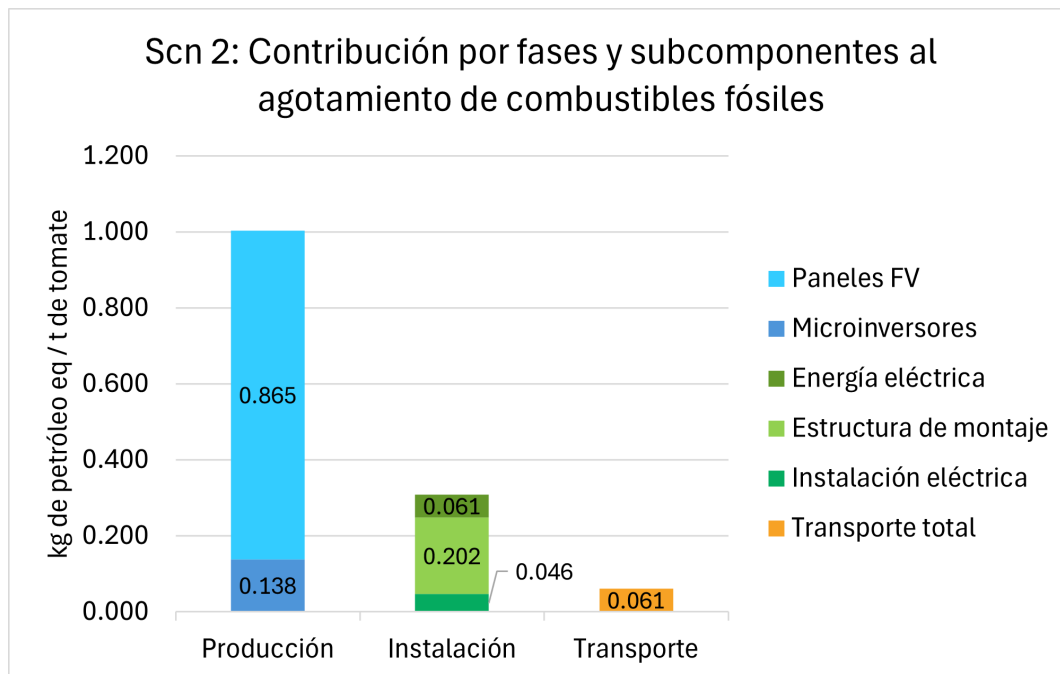


Figura 5.14: Contribución por fases y subcomponentes al agotamiento de combustibles fósiles en el Scn-2.

Implicaciones y oportunidades de mejora

Los resultados confirman que, en sistemas fotovoltaicos, el agotamiento de combustibles fósiles se concentra mayoritariamente en las etapas previas a la operación, mientras que la fase de uso contribuye de manera marginal. Esto refuerza la necesidad de orientar las estrategias de mejora hacia la cadena de suministro, mediante: (i) la selección de proveedores con menor intensidad fósil en su mix eléctrico, (ii) el incremento del contenido reciclado en metales como aluminio y cobre, (iii) la optimización del diseño estructural y del cableado, (iv) la extensión de la vida útil y reparabilidad de los microinversores, y (v) la implementación de esquemas de reciclaje y recuperación al final de la vida útil.

Estas medidas permitirían reducir aún más la demanda de energía primaria fósil incorporada por unidad funcional, fortaleciendo la coherencia del sistema fotovoltaico con los objetivos de transición energética y sostenibilidad a largo plazo [112, 119].

5.3. Resultados del análisis económico del ciclo de vida del sistema fotovoltaico propuesto

El análisis económico del sistema fotovoltaico se desarrolló con el objetivo de evaluar su viabilidad financiera dentro de un enfoque de sostenibilidad integral, complementando el análisis ambiental realizado mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), conforme a las normas ISO 14040 e ISO 14044 [19, 20]. Esta integración permite vincular los beneficios ambientales derivados de la reducción de impactos con indicadores económicos de rentabilidad, proporcionando una evaluación coherente desde la perspectiva de la Evaluación del Ciclo de Vida de la Sostenibilidad (LCSA).

Los resultados del análisis económico se resumen en la Tabla 5.8. El Costo Nivelado de Energía (LCOE) del sistema fotovoltaico propuesto fue de 2.64 MXN/kWh, valor inferior a la tarifa efectiva de la electricidad suministrada por la red eléctrica convencional para el invernadero, calculada en 4.56 MXN/kWh a partir del cociente entre el costo anual de electricidad y el consumo energético anual. Asimismo, el Valor Actual Neto (VAN), calculado con una tasa de descuento real del 8 %, alcanzó un valor positivo de \$150 811.04 MXN, mientras que la Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM) fue de 10.80 %, lo que confirma la rentabilidad del sistema fotovoltaico autónomo [13].

Tabla 5.8: Indicadores económicos del sistema fotovoltaico autónomo

Indicador	Valor	Interpretación
LCOE (8 %)	2.64 MXN/kWh	Costo medio de generación durante el ciclo de vida del sistema
Tarifa eléctrica efectiva	4.56 MXN/kWh	Costo real promedio de la electricidad suministrada por la red
VAN	+150 811.04 MXN	Flujo neto de efectivo actualizado positivo
TIRM	10.80 %	Rentabilidad superior a la tasa de descuento

El LCOE se expresó en MXN/kWh, lo que permitió establecer una comparación directa entre los resultados económicos y los impactos ambientales expresados por unidad funcional (kg CO₂ eq/kWh), facilitando la integración del análisis económico con el ACV ambiental [13, 90]. Esta consistencia metodológica es fundamental para evaluar de forma simultánea la eficiencia económica y la eficiencia ambiental del sistema energético propuesto.

El sistema fotovoltaico de 4.31 kWp se presenta como una alternativa económicamente viable para el abastecimiento energético autónomo del invernadero ubicado en el Estado de México. El LCOE de 2.64 MXN/kWh es aproximadamente 42 % menor que la tarifa eléctrica efectiva de la red (4.56 MXN/kWh), lo que se traduce en un ahorro significativo en costos energéticos

a lo largo de la vida útil del sistema. Este diferencial de costos explica el valor positivo del VAN, indicando que la inversión inicial no solo se recupera, sino que genera beneficios económicos netos adicionales durante el periodo de análisis.

Por su parte, la Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM) de 10.80 % supera la tasa de descuento asumida del 8 %, lo cual indica que el proyecto es financieramente atractivo y competitivo frente a otras alternativas de inversión con niveles de riesgo comparables. En conjunto, la aplicación combinada del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y del Costo del Ciclo de Vida (LCC) demuestra que la integración del sistema fotovoltaico permite reducir impactos ambientales, mejorar la rentabilidad económica y fortalecer la autonomía energética del invernadero, contribuyendo al desarrollo de un modelo de producción agrícola más resiliente y sustentable.

Discusión y conclusiones

La interpretación de los resultados obtenidos mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) permite identificar con claridad los principales mecanismos que explican las diferencias ambientales entre el escenario convencional (Scn-1) y el escenario con integración fotovoltaica (Scn-2). En términos generales, los impactos ambientales del sistema fotovoltaico se concentran predominantemente en la **fase de producción**, mientras que la **fase de uso** muestra reducciones sustanciales en categorías asociadas a la combustión de combustibles fósiles. Este comportamiento es consistente con la literatura especializada en ACV de tecnologías fotovoltaicas y responde a la elevada intensidad material y energética de la manufactura de módulos y componentes electrónicos, frente a una operación prácticamente libre de emisiones directas [35,90].

Las categorías de **agotamiento de combustibles fósiles**, **formación de partículas** y **acidificación terrestre** presentan reducciones significativas en el Scn-2. En particular, el agotamiento de combustibles fósiles disminuye en más del 90 % respecto al escenario convencional, como resultado directo de la sustitución parcial de electricidad de la red por generación fotovoltaica in situ. De forma análoga, la formación de partículas y la acidificación terrestre muestran reducciones superiores al 80 %, asociadas a la eliminación de emisiones operativas de SO_2 , NO_x y material particulado derivadas de la generación termoeléctrica. Estos resultados confirman que la integración fotovoltaica constituye una estrategia eficaz para reducir impactos atmosféricos y climáticos en sistemas agrícolas intensivos en energía [90,120].

En contraste, el análisis revela incrementos en categorías como **agotamiento de metales** y **agotamiento de recursos hídricos**, los cuales requieren una interpretación detallada desde la lógica del ACV. El agotamiento de metales presenta un incremento relativo cercano al 290 %; sin embargo, este valor debe contextualizarse a partir de su magnitud absoluta. La diferencia entre escenarios corresponde a 1.341 kg Fe eq por tonelada de tomate, lo que equivale a aproximadamente 2.4 t Fe eq acumuladas durante los 25 años de vida útil del sistema. Este incremento se explica por la incorporación explícita de materiales metálicos asociados a la estructura de montaje, el cableado y, de manera relevante, a la electrónica de potencia distribuida (microinversores). Desde la perspectiva del ACV, este resultado refleja un desplazamiento de la presión sobre recursos minerales hacia la fase de producción, característico de tecnologías de baja huella operativa, y pone de manifiesto la importancia de estrategias de reciclaje, ecodiseño y extensión de vida útil para mitigar dichos impactos [13,90].

El **agotamiento de recursos hídricos** también muestra un incremento moderado en el escenario fotovoltaico, asociado principalmente a los procesos industriales de fabricación de módulos de silicio cristalino. La producción de polisilicio, obleas y celdas requiere el uso de agua (incluida agua ultrapura) para limpieza, enfriamiento y control de contaminación, lo que explica el aumento observado. No obstante, este consumo se concentra en etapas upstream y se localiza mayoritariamente fuera del sitio de estudio, por lo que su relevancia ambiental depende del contexto hídrico de las regiones productoras. Este resultado subraya la necesidad de evaluar la sostenibilidad de los sistemas fotovoltaicos no solo desde su desempeño energético, sino también desde la gestión hídrica de su cadena de suministro [35,90].

En las categorías de **toxicidad humana y ecotoxicidades**, el Scn-2 presenta incrementos relativos vinculados a la manufactura de componentes eléctricos y electrónicos, donde se emplean metales, solventes y compuestos químicos con potencial tóxico. En particular, los microinversores contribuyen a estas categorías debido a la mayor densidad de electrónica por kWp instalado. Sin embargo, estos impactos se concentran en la fase de producción y no se incrementan durante la operación del sistema. Además, el uso de microinversores permite mejorar el desempeño energético a nivel módulo, reducir pérdidas por desajuste y maximizar la generación eléctrica útil, lo que contribuye a disminuir los impactos por unidad de servicio energético entregado a lo largo del ciclo de vida [90].

Desde una perspectiva integrada, los resultados confirman que la sostenibilidad ambiental del sistema fotovoltaico depende en gran medida de la transformación de su cadena de suministro. La descarbonización de los procesos industriales, el uso de aluminio y cobre reciclados, la optimización del diseño estructural y la implementación de esquemas efectivos de reciclaje de residuos electrónicos emergen como estrategias clave para reducir los impactos remanentes identificados en este estudio. En este sentido, el sistema fotovoltaico no elimina los impactos ambientales, sino que modifica su distribución temporal y espacial, desplazándolos desde la fase operativa hacia etapas previas del ciclo de vida.

El análisis económico del ciclo de vida refuerza las conclusiones ambientales. El sistema fotovoltaico evaluado presenta un **LCOE de 2.64 MXN/kWh**, inferior a la **tarifa eléctrica efectiva de la red (4.56 MXN/kWh)**, lo que representa un ahorro aproximado del 42 % en costos energéticos. Este diferencial explica el **Valor Actual Neto positivo de 150 811 MXN** y la **Tasa Interna de Retorno Modificada de 10.8 %**, superior a la tasa de descuento asumida del 8 %. En conjunto, estos indicadores confirman que la reducción de impactos ambientales se acompaña de una mejora en la eficiencia económica, fortaleciendo la viabilidad del sistema desde la perspectiva de la evaluación del ciclo de vida.

Finalmente, los resultados permiten confirmar la hipótesis planteada en este estudio: la implementación de un sistema fotovoltaico en un invernadero tipo cenital reduce de manera efectiva las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad funcional, al tiempo que resulta económicamente viable bajo las condiciones locales del Estado de México. Si bien se identifican incrementos en categorías específicas asociadas a la manufactura de componentes, el balance global de impactos favorece al escenario fotovoltaico, consolidándolo como una alternativa compatible con los objetivos de transición energética, mitigación del cambio

climático y fortalecimiento de la resiliencia del sector agrícola mexicano.

Recomendaciones y trabajos futuros

Los resultados del presente estudio evidencian la pertinencia de evaluar la incorporación de sistemas fotovoltaicos en invernaderos agrícolas mediante un enfoque de ciclo de vida, lo que permite identificar beneficios ambientales potenciales y evitar la transferencia de impactos entre fases del sistema. En este sentido, se recomienda que la aplicación de este tipo de tecnologías sea acompañada por evaluaciones integrales desde etapas tempranas de diseño, considerando de manera conjunta la infraestructura energética y el sistema productivo.

Como una extensión metodológica relevante, se identifica la incorporación del Análisis de Ciclo de Vida Social (ACV-S) como una línea de trabajo futura que permitiría complementar la evaluación ambiental realizada. Este enfoque posibilitaría analizar aspectos relacionados con condiciones laborales, salud y seguridad ocupacional, así como efectos socioeconómicos asociados a la cadena de suministro de los componentes fotovoltaicos y a la operación del sistema agrícola, contribuyendo a una visión más integral de la sostenibilidad.

Asimismo, se recomienda ampliar los límites del sistema de la cuna a la tumba para incluir el fin de ciclo de vida de los componentes del sistema fotovoltaico, particularmente módulos y microinversores. La evaluación de escenarios de reutilización, reciclaje y disposición final permitiría una caracterización más completa de los impactos ambientales a largo plazo y aportaría información relevante para el análisis de estrategias de economía circular aplicables al contexto nacional.

Otra línea de profundización consiste en la integración explícita de los insumos agroquímicos utilizados en la producción bajo invernadero dentro del inventario de ciclo de vida. La consideración de fertilizantes, plaguicidas y otros insumos agrícolas resulta especialmente relevante debido a su potencial contribución en categorías de impacto como toxicidad humana, ecotoxicidad y eutrofización, lo que permitiría una representación más exhaustiva del sistema productivo y una mejor identificación de puntos críticos ambientales.

Finalmente, se reconoce la oportunidad de analizar el potencial de replicabilidad y adopción del sistema desde una perspectiva de emprendimiento, evaluando su viabilidad ambiental y económica en unidades productivas de pequeña y mediana escala. Este enfoque permitiría explorar el papel de la tecnología fotovoltaica como elemento habilitador de modelos productivos sostenibles, contribuyendo a la transición energética del sector agrícola y al desarrollo de estrategias de innovación basadas en criterios ambientales, sociales y económicos.

Anexos

Anexos

Anexo 1. Encuestas aplicadas a productores

San Antonio Albarranes

1. ¿Qué tipo de invernadero es?

- ☐ Tipo Venlo (vidrio - holandés)
- ☐ Tipo Parral (carpa con pilares)
- ☒ Tipo Cenital
- ☐ Tipo Gótico (doble ventana super cenit)
- ☐ Tipo Asimétrico
- ☐ Tipo Túnel

2. ¿De qué material es la estructura del invernadero?

- ☐ Madera
- ☒ Metálica
- ☐ Plástica
- ☐ Metálica robusta
- ☐ Metálica de alta resistencia

3. ¿De qué material es la cubierta del invernadero?

- ☐ Plástico sencillo (Polietileno)
- ☒ Plástico de mayor calidad (Polietileno reforzado)
- ☐ Vidrio

4. ¿Como se ventila el invernadero?

- ☐ Manual, a través de puertas o ventanas

- ☒ Sistemas pasivos
- ☐ Uso de ventiladores automáticos
- ☐ Uso de sistemas automatizados de ventilación, calefacción y refrigeración

5. ¿Cada cuanto se ventila y por cuánto tiempo?

Las paredes están cubiertas con maya anti-áfidos por lo que la ventilación es un sistema pasivo de 24 horas con el cual mantienen el control de la temperatura.

6. ¿Como se controla la temperatura del invernadero?

- ☐ Mediante apertura manual de ventanas
- ☐ Uso de ventiladores automáticos activos a partir de sensores
- ☐ Uso de sistemas automatizados de ventilación, calefacción y refrigeración
- ☒ No se controla

No se controla, solo se siembra un ciclo productivo en el que la temperatura del lugar es óptima para el desempeño agrícola.

7. ¿Cómo se riega el invernadero?

- ☐ Mangueras
- ☐ Sistemas básicos
- ☒ Mangueras con emisores de goteo
- ☐ Hidroponía
- ☐ Aspersión controlada por temporizadores
- ☐ Sistemas de riego inteligentes basados en demanda hídrica

8. ¿Cada cuántos son los riegos y por cuánto tiempo?

El riego se realiza a través de un sistema de riego por goteo, donde cintas con emisores de agua pasan por cada línea y llegan a cada planta. El tiempo que tarda en llegar el agua a la primera y última planta es de 2 minutos. El riego no requiere de bombear agua, debido a que en la ubicación geográfica hay una corriente de agua con presión suficiente para suministrar agua a las plantas.

9. ¿Qué tipo de iluminación tiene el invernadero?

- ☒ Iluminación natural
- ☐ Iluminación suplementaria con lámparas LED o fluorescentes
- ☐ Iluminación artificial controlada por fotoperiodo y espectro

En caso de ser suplementaria/ artificial ¿Cada cuanto se prenden la iluminación y por cuánto tiempo?

- ☒ N/A

10. ¿El invernadero cuenta con sensores de humedad?

☐ Si

☒ No

11. ¿El invernadero cuenta con sensores de temperatura?

☐ Si

☒ No

12. ¿El invernadero cuenta con termostatos para control de sistemas de calefacción?

☐ Si

☒ No

13. ¿El invernadero cuenta con sensores para monitoreo de CO₂?

☐ Si

☒ No

14. ¿El invernadero cuenta con sensores de luz?

☐ Si

☒ No

15. ¿Es posible monitorear el invernadero de manera remota?

☐ Si

☒ No

16. ¿Es posible controlar el invernadero de manera remota?

☐ Si

☒ No

17. ¿Usa algún software de gestión agrícola?

☐ Si

☒ No

18. ¿Cómo se aplican los agroquímicos?

- ☐ Manual
- ☐ Aspersores manuales
- ☐ Mochilas fumigadoras
- ☒ Sistemas de riego con dosificadores de fertilizantes, plaguicidas y otros agroquímicos
- ☐ Equipos con dosificadores para fumigar
- ☐ Sistemas computarizados para aplicación de fertilizantes, plaguicidas y agroquímicos
- ☐ Sistemas de fertirriego con dosificación preparada manualmente en cubetas

En caso de ser aplicación con gasto energético, ¿Cada cuanto aplican agroquímicos y cuánto tiempo toma esa tarea?

- ☒ N/A

20. ¿Hay implementación de algún tipo de energía renovable?

- ☐ Si, ¿Cuál?
- ☒ No

21. ¿Existe alguna técnica de ahorro energético?

- ☐ Especiales para controlar radiación solar (Placas o films)
- ☐ Paredes
- ☐ Micro
- ☐ Hermeticidad en el invernadero
- ☐ Compartimentación
- ☐ Corta vientos y orientación
- ☒ Ninguna

22. ¿Cuántos ciclos de cultivo al año se dan en el invernadero?

Ciclo de producción de tomate saladette al año (de marzo a noviembre).

23. ¿Se tiene algún sistema de almacenamiento de agua?

- ☐ Tanque elevado
- ☐ Tanque nivel del suelo
- ☐ Cisterna
- ☒ Caída natural de agua

San Miguel Caltepanitla

1. ¿Qué tipo de invernadero es?

- ☐ Tipo Venlo (vidrio - holandés)
- ☐ Tipo Parral (carpa con pilares)
- ☒ Tipo Cenital
- ☐ Tipo Gótico (doble ventana super cenit)
- ☐ Tipo Asimétrico
- ☐ Tipo Túnel

2. ¿De qué material es la estructura del invernadero?

- ☐ Madera
- ☒ Metálica
- ☐ Plástica
- ☐ Metálica robusta
- ☐ Metálica de alta resistencia

3. ¿De qué material es la cubierta del invernadero?

- ☐ Plástico sencillo (Polietileno)
- ☒ Plástico de mayor calidad (Polietileno reforzado)
- ☐ Vidrio

4. ¿Como se ventila el invernadero?

- ☒ Manual, a través de puertas o ventanas
- ☐ Sistemas pasivos
- ☐ Uso de ventiladores automáticos
- ☐ Uso de sistemas automatizados de ventilación, calefacción y refrigeración

5. ¿Cada cuanto se ventila y por cuánto tiempo?

- ☒ El invernadero se ventila todo el día

6. ¿Como se controla la temperatura del invernadero?

- ☒ Mediante apertura manual de ventanas
- ☐ Uso de ventiladores automáticos activos a partir de sensores
- ☐ Uso de sistemas automatizados de ventilación, calefacción y refrigeración

☐ No se controla

7. ¿Cómo se riega el invernadero?

☐ Mangueras

☐ Sistemas básicos

☒ Mangueras con emisores de goteo

☐ Hidroponía

☐ Aspersión controlada por temporizadores

☐ Sistemas de riego inteligentes basados en demanda hídrica

8. ¿Cada cuántos son los riegos y por cuánto tiempo?

(Se presenta una tabla con el horario de cada riego y fertirriego).

Tabla 5.9: Horarios de riego y fertirriego (Datos primarios proporcionados por el productor)

Horario del día	Método	Tiempo de operación (Min)
07:00 am	Fertirriego	3
07:30 am	Fertirriego	3
08:15 am	Bombeo sistema de riego/agua	3
09:00 am	Fertirriego	3
09:15 am	Bombeo sistema de riego/agua	3
10:30 am	Bombeo sistema de riego/agua	3
11:00 am	Bombeo sistema de riego/agua	3
11:40 am	Bombeo sistema de riego/agua	2
12:20 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
01:00 pm	Fertirriego	2
01:30 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
02:00 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
02:30 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
03:00 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
03:40 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
04:20 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2
04:45 pm	Bombeo sistema de riego/agua	2

9. ¿Qué tipo de iluminación tiene el invernadero?

☒ Iluminación natural

- ☐ Iluminación suplementaria con lámparas LED o fluorescentes
- ☐ Iluminación artificial controlada por fotoperiodo y espectro

En caso de ser suplementaria/ artificial ¿Cada cuanto se prenden la iluminación y por cuánto tiempo?

☒ N/A

10. ¿El invernadero cuenta con sensores de humedad?

☒ Si

☐ No

11. ¿El invernadero cuenta con sensores de temperatura?

☒ Si

☐ No

12. ¿El invernadero cuenta con termostatos para control de sistemas de calefacción?

☐ Si

☒ No

13. ¿El invernadero cuenta con sensores para monitoreo de CO₂?

☐ Si

☒ No

14. ¿El invernadero cuenta con sensores de luz?

☐ Si

☒ No

15. ¿Es posible monitorear el invernadero de manera remota?

☒ Si

☐ No

16. ¿Es posible controlar el invernadero de manera remota?

☒ Si

☐ No

17. ¿Usa algún software de gestión agrícola?

☐ Si

☒ No

18. ¿Cómo se aplican los agroquímicos?

☐ Manual

☐ Aspersores manuales

☒ Mochilas fumigadoras

☐ Sistemas de riego con dosificadores de fertilizantes, plaguicidas y otros agroquímicos

☐ Equipos con dosificadores para fumigar

☐ Sistemas computarizados para aplicación de fertilizantes, plaguicidas y agroquímicos

☒ Sistemas de fertirriego con dosificación preparada manualmente en cubetas

19. En caso de ser aplicación con gasto energético, ¿Cada cuanto aplican agroquímicos y cuánto tiempo toma esa tarea?

☒ N/A

20. ¿Hay implementación de algún tipo de energía renovable?

☐ Si, ¿Cuál?

☒ No

21. ¿Existe alguna técnica de ahorro energético?

☐ Especiales para controlar radiación solar (Placas o films)

☐ Paredes

☐ Micro

☐ Hermeticidad en el invernadero

☐ Compartimentación

☐ Corta vientos y orientación

☒ Ninguna

22. ¿Cuántos ciclos de cultivo al año se dan en el invernadero?

☒ 2 ciclos

23. ¿Se tiene algún sistema de almacenamiento de agua?

- ☒ Tanque elevado
- ☐ Tanque nivel del suelo
- ☐ Cisterna
- ☐ Caída natural de agua

Amanalco de Becerra

1. ¿Qué tipo de invernadero es?

- ☐ Tipo Venlo (vidrio - holandés)
- ☐ Tipo Parral (carpa con pilares)
- ☒ Tipo Cenital
- ☐ Tipo Gótico (doble ventana super cenit)
- ☐ Tipo Asimétrico
- ☐ Tipo Túnel

2. ¿De qué material es la estructura del invernadero?

- ☐ Madera
- ☒ Metálica
- ☐ Plástica
- ☐ Metálica robusta
- ☐ Metálica de alta resistencia

3. ¿De qué material es la cubierta del invernadero?

- ☒ Plástico sencillo (Polietileno)
- ☐ Plástico de mayor calidad (Polietileno reforzado)
- ☐ Vidrio

4. ¿Como se ventila el invernadero?

- ☒ Manual, a través de puertas o ventanas
- ☐ Sistemas pasivos
- ☐ Uso de ventiladores automáticos
- ☐ Uso de sistemas automatizados de ventilación, calefacción y refrigeración

5. ¿Cada cuanto se ventila y por cuánto tiempo?

- ☒ El invernadero se ventila todo el día

6. ¿Como se controla la temperatura del invernadero?

- ☒ Mediante apertura manual de ventanas
- ☐ Uso de ventiladores automáticos activos a partir de sensores
- ☐ Uso de sistemas automatizados de ventilación, calefacción y refrigeración

☐ No se controla

7. ¿Cómo se riega el invernadero?

☐ Mangueras

☐ Sistemas básicos

☒ Mangueras con emisores de Goteo

☐ Hidroponía

☐ Aspersión controlada por temporizadores

☐ Sistemas de riego inteligentes basado en demanda hídrica

8. ¿Cada cuántos son los riegos y por cuánto tiempo?

☒ Diario, el tiempo que tarda en llegar el agua a la primera y última planta es de 4 minutos.

9. ¿Qué tipo de iluminación tiene el invernadero?

☒ Iluminación natural

☐ Iluminación suplementaria con lámparas LED o fluorescentes

☐ Iluminación artificial controlada por fotoperiodo y espectro

En caso de ser suplementaria/ artificial ¿Cada cuanto se prenden la iluminación y por cuánto tiempo?

☒ N/A

10. ¿El invernadero cuenta con sensores de humedad?

☐ Si

☒ No

11. ¿El invernadero cuenta con sensores de temperatura?

☐ Si

☒ No

12. ¿El invernadero cuenta con termostatos para control de sistemas de calefacción?

☐ Si

☒ No

13. ¿El invernadero cuenta con sensores para monitoreo de CO₂?

☐ Si

☒ No

14. ¿El invernadero cuenta con sensores de luz?

☐ Si

☒ No

15. ¿Es posible monitorear el invernadero de manera remota?

☐ Si

☒ No

16. ¿Es posible controlar el invernadero de manera remota?

☐ Si

☒ No

17. ¿Usa algún software de gestión agrícola?

☐ Si

☒ No

18. ¿Cómo se aplican los agroquímicos?

☐ Manual

☐ Aspersores manuales

☒ Mochilas fumigadoras

☐ Sistemas de riego con dosificadores de fertilizantes, plaguicidas y otros agroquímicos

☐ Equipos con dosificadores para fumigar

☐ Sistemas computarizados para aplicación de fertilizantes, plaguicidas y agroquímicos

☒ Sistemas de fertirriego con dosificación preparada manualmente en cubetas

19. En caso de ser aplicación con gasto energético, ¿Cada cuanto aplican agroquímicos y cuánto tiempo toma esa tarea?

☒ N/A

20. ¿Hay implementación de algún tipo de energía renovable?

☐ Si, ¿Cuál?

☒ No

21. ¿Existe alguna técnica de ahorro energético?

☐ Especiales para controlar radiación solar (Placas o films)

☐ Paredes

☐ Micro

☐ Hermeticidad en el invernadero

☐ Compartimentación

☐ Corta vientos y orientación

☒ Ninguna

22. ¿Cuántos ciclos de cultivo al año se dan en el invernadero?

☒ 2 ciclos

23. ¿Se tiene algún sistema de almacenamiento de agua?

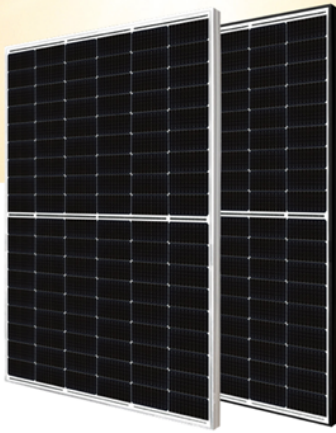
☐ Tanque elevado

☒ Tanque nivel del suelo

☐ Cisterna

☐ Caída natural de agua

Anexo 2. Fichas técnicas de componentes que integran el sistema fotovoltaico



HiKu6 Mono PERC

395 W ~ 420 W
CS6R-395 | 400 | 405 | 410 | 415 | 420MS

MORE POWER

-  Module power up to 420 W
Module efficiency up to 21.5 %
-  Lower LCOE & system cost
-  Comprehensive LID / LeTID mitigation technology, up to 50% lower degradation
-  Better shading tolerance

MORE RELIABLE

-  Minimizes micro-crack impacts
-  Heavy snow load up to 5400 Pa, wind load up to 2400 Pa*

*Black frame product can be provided upon request.

12 Years Enhanced Product Warranty on Materials and Workmanship*

25 Years Linear Power Performance Warranty*

1st year power degradation no more than 2%
Subsequent annual power degradation no more than 0.55%

*According to the applicable Canadian Solar Limited Warranty Statement.

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

ISO 9001 : 2015 / Quality management system
ISO 14001 : 2015 / Standards for environmental management system
ISO 45001 : 2018 / International standards for occupational health & safety
IEC62941 : 2019 / Photovoltaic module manufacturing quality system

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730 / CE / MCS / UKCA
UL 61730 / IEC 61701 / IEC 62716 / IEC 63126 Level1 / IEC 60068-2-68
UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1 / Take-e-way



* The specific certificates applicable to different module types and markets will vary, and therefore not all of the certifications listed herein will simultaneously apply to the products you order or use. Please contact your local Canadian Solar sales representative to confirm the specific certificates available for your Product and applicable in the regions in which the products will be used.

CSI Solar Co., Ltd. is committed to providing high quality solar photovoltaic modules, solar energy and battery storage solutions to customers. The company was recognized as the No. 1 module supplier for quality and performance/price ratio in the IHS Module Customer Insight Survey. Over the past 22 years, it has successfully delivered over 110 GW of premium-quality solar modules across the world.

Figura 5.15: Ficha técnica de módulo Canadian Solar



IQ8 Series Microinverters

Our newest IQ8 Microinverters are software-defined microinverters with split-phase power conversion capability to convert DC power to AC power efficiently. The brain of the semiconductor-based microinverter is our proprietary application-specific integrated circuit (ASIC), which enables the microinverter to operate in grid-tied mode. This chip is built in advanced 55-nm technology with high-speed digital logic and has superfast response times to changing loads and grid events.



Part of the Enphase Energy System, IQ8 Series Microinverters integrates with the Enphase IQ Gateway and the Enphase App monitoring and analysis software.



IQ8 Series Microinverters redefine reliability standards with more than one million cumulative hours of power-on testing, enabling an industry-leading limited warranty of up to 25 years.



Connect PV modules quickly and easily to the IQ8 Series Microinverters that have integrated MC4 connectors.



IQ8 Series Microinverters are UL Listed as PV rapid shutdown equipment and conform with various regulations, when installed according to the manufacturer's instructions.

Easy to install

- Lightweight and compact with plug-and-play connectors
- Power line communication (PLC) between components
- Faster installation with simple two-wire cabling

High productivity and reliability

- More than one million cumulative hours of testing
- Class II double-insulated enclosure
- Optimized for the latest high-powered PV modules

Smart grid-ready*

- Meets CA Rule 21 (UL 1741-SA) and IEEE 1547:2018 (UL 1741-SB)
- Remote automatic updates for the latest grid requirements
- Configurable to support a wide range of grid profiles

NOTE:

IQ8 Microinverters cannot be mixed with previous generations of Enphase microinverters (IQ7 Series, IQ6 Series, and so on) in the same system.

* IQ8 Series Microinverters support split-phase, 240 V. In addition, IQ8HC supports single-phase 208 V and 220 V.

© 2024 Enphase Energy. All rights reserved. Enphase, the e and CC logos, IQ, and certain other marks listed at <https://enphase.com/trademark-usage-guidelines> are trademarks of Enphase Energy, Inc. in the U.S. and other countries. Data subject to change.

IQ8SE-MC4-DSH-00412-3.0-EN-LAC-2024-07-29

Figura 5.16: Ficha técnica de microinversor Enphase IQ8

Anexo 3. Análisis de categorías de impacto con relevancia secundaria

Formación de oxidantes fotoquímicos

El Scn-1 presenta un impacto de 0.102 kg NMVOC (82.258 %), mientras que el Scn-2 registra 0.022 kg NMVOC (17.741 %). La diferencia no responde únicamente a la sustitución de la fuente de energía en operación, sino a un cambio en la fase del ciclo de vida en la que se concentran los procesos emisores: en el Scn-1 las emisiones son continuas y asociadas a una demanda operativa sostenida, mientras que en el Scn-2 se localizan en etapas industriales previas [26,34].

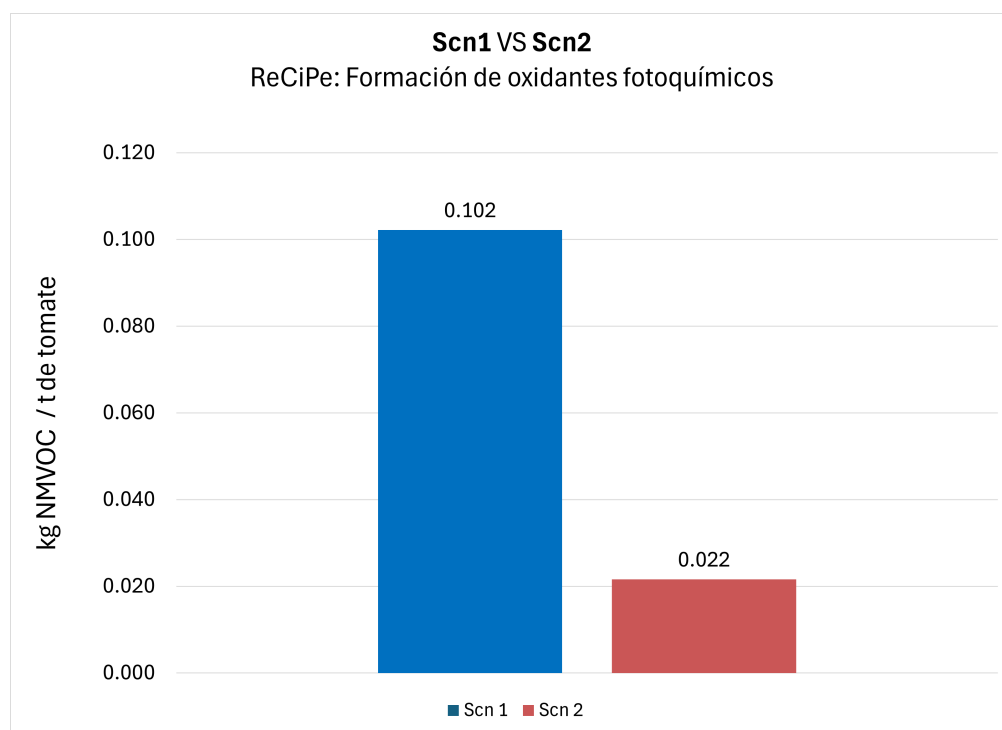


Figura 5.17: Comparación de escenarios en contribución a la formación de oxidantes fotoquímicos.

Tabla 5.10: Formación de oxidantes fotoquímicos/t de tomate

Categoría de impacto	Unidad	Scn-1	Scn-2
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	0.102	0.022

Distribución por fases del ciclo de vida

La Figura 5.18 integra la contribución por fases del ciclo de vida (producción, instalación y transporte) y el desglose de los subcomponentes asociados a cada etapa, permitiendo identificar los procesos responsables de la formación de oxidantes fotoquímicos expresada en kg NMVOC. En el Scn-2, la fase de producción aporta 0.015 kg NMVOC/t de tomate, lo que corresponde al 60.882 % del impacto total. Este resultado está dominado por los procesos involucrados en la fabricación de *paneles fotovoltaicos* y *microinversores*, en los cuales convergen operaciones de alta temperatura, tratamientos de superficie, recubrimientos y manipulación de insumos reactivos. Aunque las cantidades emitidas no son elevadas, los compuestos liberados presentan altos factores de caracterización debido a su potencial para participar en reacciones fotoquímicas en la atmósfera [21].

La fase de instalación contribuye con 0.007 kg NMVOC/t (27.454 %). Esta contribución proviene principalmente de la *estructura de montaje* (acero y aluminio) y del *cableado eléctrico*, dado que la fabricación de metales estructurales incorpora emisiones asociadas a recubrimientos, protección anticorrosiva y procesos de fundición. En esta fase, como en otras categorías, el impacto deriva mayormente del historial industrial de los materiales utilizados, no de actividades directas de montaje en el sitio.

Por su parte, la fase de transporte representa 0.003 kg NMVOC/t (11.663 %). Su impacto se asocia a los consumos energéticos indirectos de la cadena logística internacional (especialmente la generada durante la producción de electricidad usada por el transporte ferroviario y las emisiones del transporte marítimo) y no a emisiones directas locales [110].

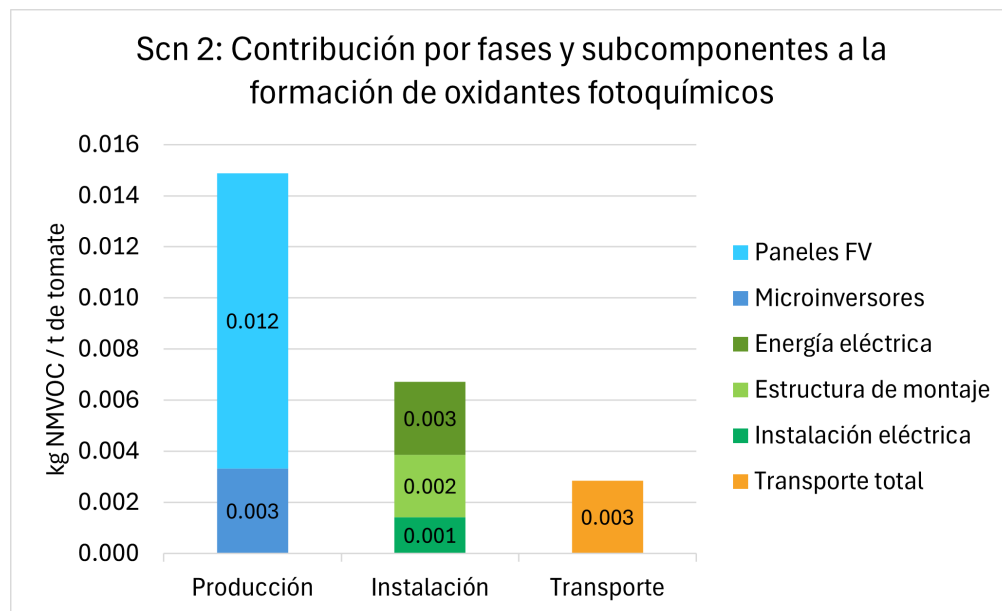


Figura 5.18: Scn-2 Contribución por fases y subcomponentes a la formación de oxidantes fotoquímicos.

En conjunto, los resultados muestran que, aunque el Scn-2 reduce la exposición local durante la operación, el impacto atmosférico se concentra aguas arriba, en los procesos industriales donde la composición química de los insumos y las condiciones de proceso determinan el perfil de emisión más que el consumo energético. Esto evidencia la necesidad de optimizar el uso de solventes, recubrimientos y agentes reactivos en la cadena de suministro fotovoltaica para reducir la formación de oxidantes fotoquímicos.

Eutrofización de agua dulce

La eutrofización de agua dulce cuantifica el potencial de liberación de nutrientes que promueven la proliferación de biomasa en sistemas acuáticos. Los resultados muestran que el Scn-1 alcanza un impacto total de 0.016 kg P eq (84.210 %), mientras que el Scn-2 registra 0.003 kg P eq (15.789 %). Esta diferencia evidencia una reducción significativa en el potencial de eutrofización al sustituir parcialmente el suministro eléctrico convencional por generación fotovoltaica distribuida.

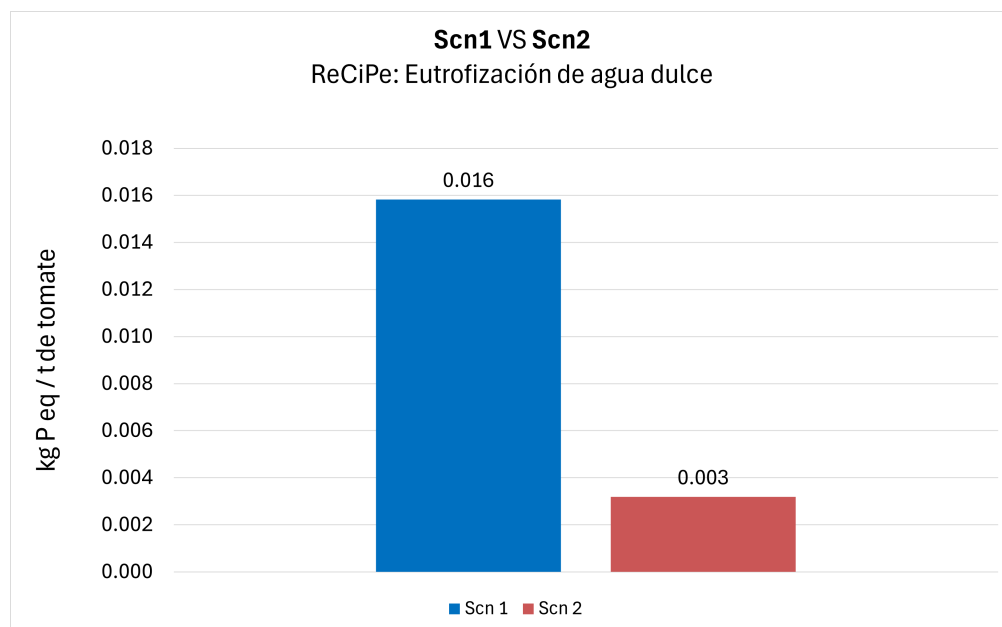


Figura 5.19: Comparación de escenarios en contribución a la eutrofización de agua dulce

Tabla 5.11: Eutrofización de agua dulce/t de tomate

Categoría de impacto	Unidad	Scn-1	Scn-2
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.016	0.003

Distribución por fases del ciclo de vida

La Figura 5.20 integra la contribución por fases del ciclo de vida (producción, instalación y transporte) y el desglose de los subcomponentes que conforman cada etapa, permitiendo identificar con claridad los procesos responsables de la eutrofización en agua dulce expresada en kg P eq. En el Scn-2, la fase de producción domina el impacto con un 74.283 % del total (0.002 kg P eq/t de tomate). Esta contribución se relaciona con los procesos de refinación de silicio y la metalurgia primaria de aluminio y cobre, en los cuales los efluentes industriales pueden contener compuestos fosforados, tensioactivos y otras sustancias empleadas en la

limpieza de obleas, vidrio y estructuras metálicas [21]. El diseño químico de estos insumos explica su relevancia en la categoría, más allá de su volumen absoluto.

La fase de instalación aporta el 25.036 % del impacto total (0.001 kg P eq/t), principalmente debido a la *estructura de montaje* (acero y aluminio) y al *cableado eléctrico*. La fabricación de estos materiales incorpora emisiones asociadas a descargas líquidas, uso de reactivos y consumo energético en procesos térmicos e hidrometalúrgicos. Como en otras categorías, el impacto proviene mayormente del historial industrial de los materiales y no de actividades directas en sitio.

Por último, la fase de transporte contribuye con apenas un 0.679 %, reflejando su incidencia mínima en esta categoría. Esto se explica por el uso de transporte ferroviario eléctrico en los tramos terrestres, que reduce descargas indirectas asociadas al movimiento de materiales, y por la baja contribución relativa del transporte marítimo en términos de fósforo y agentes eutrofizantes.

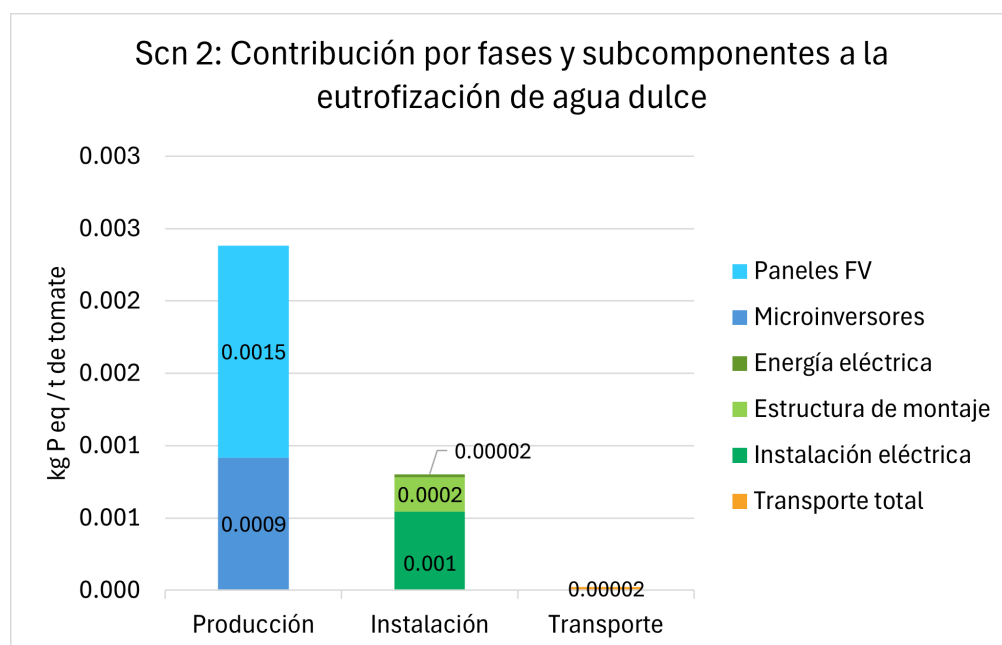


Figura 5.20: Scn-2 Contribución por fases y subcomponentes a la eutrofización en agua dulce.

Desde una perspectiva comparativa, los valores obtenidos coinciden con estudios latinoamericanos recientes de análisis de ciclo de vida aplicados a sistemas fotovoltaicos, los cuales muestran que la eutrofización está dominada por las etapas de manufactura y procesamiento de materias primas, mientras que la fase operativa presenta contribuciones prácticamente nulas [90,120]. En particular, Guzmán et al. (2023) identifican la gestión de efluentes y el uso de productos químicos en la industria del silicio como los principales contribuyentes a esta categoría, lo que coincide con los resultados observados en este estudio.

En conjunto, estos hallazgos indican que la mitigación del impacto por eutrofización depende más de la sostenibilidad y eficiencia de los procesos industriales en la cadena de suministro

que de la etapa operativa del sistema. Ello subraya la importancia de incorporar prácticas de recirculación y tratamiento de agua, así como la sustitución de insumos químicos por alternativas menos persistentes y con menor potencial eutrofizante en ecosistemas de agua dulce.

Ecotoxicidad de agua dulce

La ecotoxicidad en agua dulce mide el potencial de daño a los ecosistemas acuáticos por la liberación de sustancias químicas tóxicas e inorgánicas a lo largo del ciclo de vida del sistema fotovoltaico. Los resultados muestran que el Scn-1 presenta un impacto total de 0.644 kg 1,4-DB eq (21.059 %), mientras que el Scn-2 alcanza 2.414 kg 1,4-DB eq (78.940 %), indicando una intensificación del potencial ecotóxico vinculada a la mayor complejidad material y tecnológica del sistema fotovoltaico implementado.

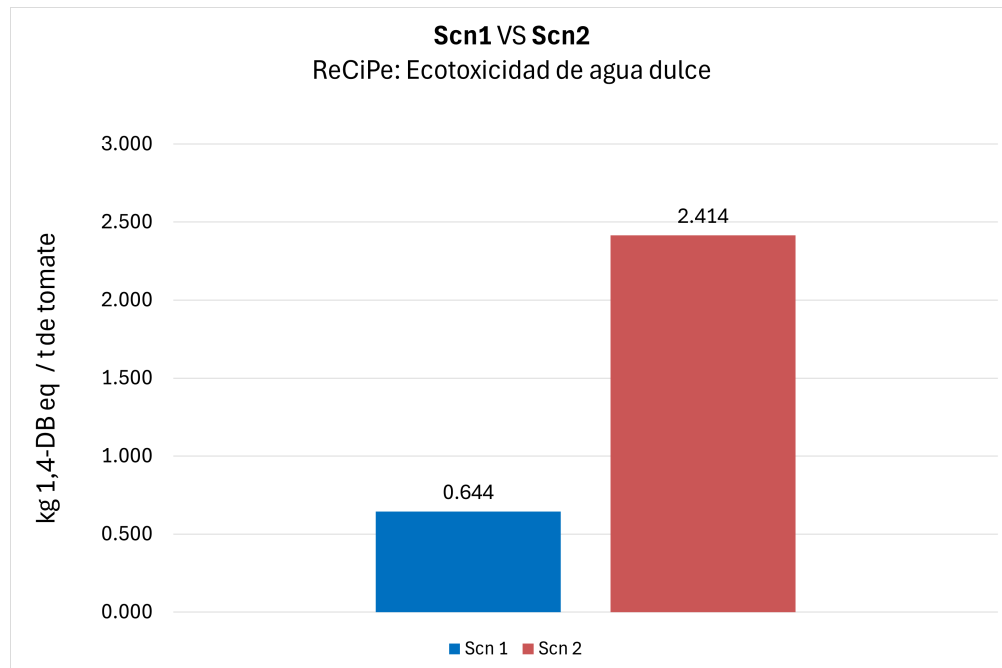


Figura 5.21: Comparación de escenarios en contribución a la ecotoxicidad de agua dulce

Tabla 5.12: Ecotoxicidad de agua dulce/t de tomate

Categoría de impacto	Unidad	Scn-1	Scn-2
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	0.644	2.414

Distribución por fases del ciclo de vida

La Figura 5.22 integra la contribución por fases del ciclo de vida (producción, instalación y transporte) junto con el desglose de los subcomponentes que conforman cada etapa, permitiendo identificar los procesos responsables de la ecotoxicidad en agua dulce expresada en kg 1,4-DB eq. En el Scn-2, la fase de instalación constituye la contribución dominante, con 1.854 kg 1,4-DB eq/t de tomate (58.161 %). Este impacto está asociado principalmente a la *estructura de montaje* (acero y aluminio), el *cableado eléctrico* y los *aislamientos*

poliméricos. La manufactura de estos componentes incluye el uso de retardantes de flama bromados, compuestos organoclorados y solventes persistentes, todos ellos con alto potencial de bioacumulación y ecotoxicidad acuática [35].

La fase de transporte representa 0.774 kg 1,4-DB eq/t (24.288 %). Su contribución inusualmente elevada se explica por el uso intensivo de embalajes multicapa, adhesivos y materiales protectores en la cadena logística internacional, más que por el propio desplazamiento ferroviario, que es energéticamente eficiente. Las emisiones indirectas derivadas del almacenamiento, manipulación y preparación de carga incrementan la contribución de esta fase en comparación con categorías donde los precursores químicos no juegan un papel tan significativo [21].

La fase de producción aporta 0.560 kg 1,4-DB eq/t (17.550 %). Aunque su magnitud relativa es menor respecto a otras categorías, sigue siendo relevante. Su contribución proviene de la refinación del silicio, el procesamiento metalúrgico de aluminio y cobre, y la fabricación de componentes electrónicos, donde se generan efluentes con iones metálicos y restos de solventes. A pesar de que las plantas modernas incorporan sistemas cerrados de recirculación de agua y recuperación de residuos, estos procesos no eliminan completamente las trazas de metales pesados ni los compuestos orgánicos con persistencia ambiental [90]. Estudios latinoamericanos muestran patrones similares, con una fuerte correlación entre ecotoxicidad y la intensidad industrial de las cadenas de suministro en manufactura e instalación [120].

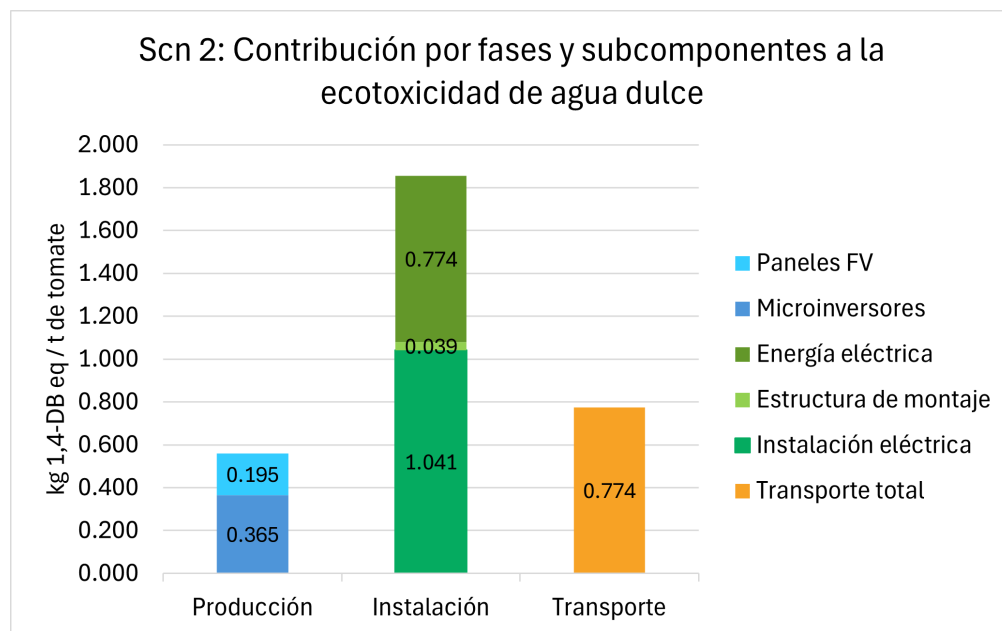


Figura 5.22: Scn-2 Contribución por fases y subcomponentes a la ecotoxicidad en agua dulce.

Estos resultados evidencian que la ecotoxicidad acuática en sistemas fotovoltaicos no depende de su etapa operativa, sino de la calidad ambiental de sus insumos y de las prácticas industriales que los generan. La mitigación de este impacto requiere estrategias de sustitución de sustancias peligrosas, reciclaje controlado de metales, mejora de los tratamientos de

efluentes y la adopción de estándares ambientales más estrictos en la manufactura electrónica vinculada a la transición energética.

Ecotoxicidad terrestre

Esta categoría refleja el potencial de acumulación de compuestos tóxicos en suelos y ecosistemas terrestres a lo largo del ciclo de vida del sistema fotovoltaico. Los resultados muestran que el Scn-1 alcanza un valor total de 0.003 kg 1,4-DB eq (30 %), mientras que el Scn-2 registra un incremento hasta 0.007 kg 1,4-DB eq (70 %). Este comportamiento indica una mayor carga ecotóxica en el escenario con integración fotovoltaica, asociada principalmente a los materiales metálicos y electrónicos incorporados en la fase de producción.

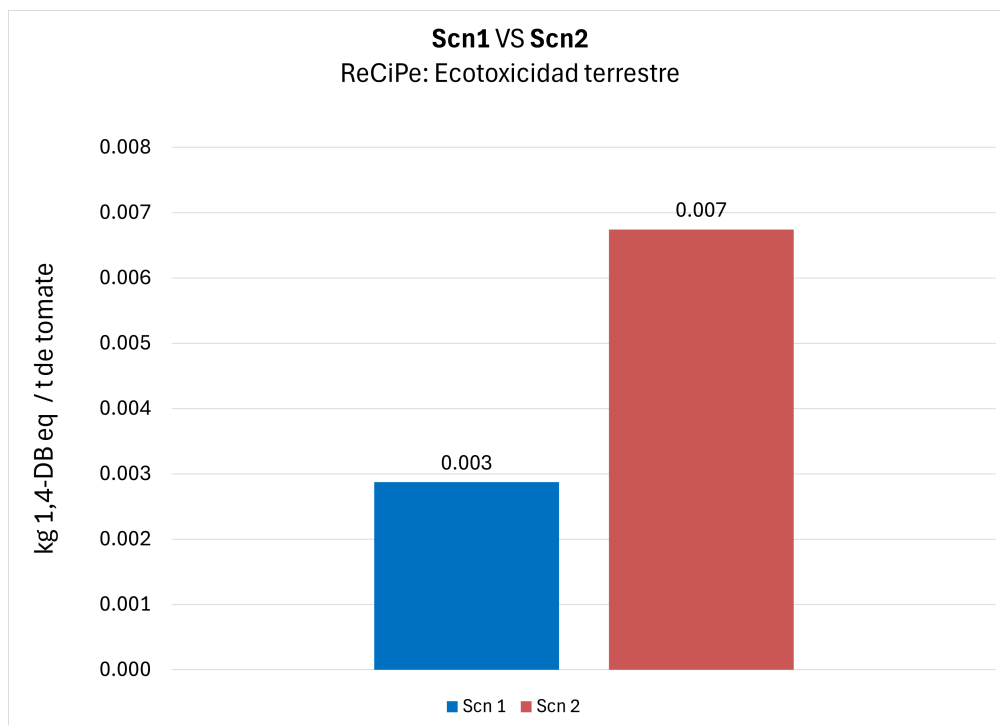


Figura 5.23: Comparación de escenarios en contribución a la ecotoxicidad terrestre

Tabla 5.13: Ecotoxicidad terrestre/t de tomate

Categoría de impacto	Unidad	Scn-1	Scn-2
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0.003	0.007

Distribución por fases del ciclo de vida

La Figura 5.24 integra la contribución por fases del ciclo de vida (producción, instalación y transporte) y el desglose de los subcomponentes que intervienen en cada etapa, permitiendo identificar los procesos responsables de la ecotoxicidad terrestre expresada en kg 1,4-DB eq. En el Scn-2, la fase de producción domina ampliamente la categoría, con 0.006 kg 1,4-DB eq/t de tomate (94.105 %). Este resultado se asocia a las emisiones difusas de metales pesados como

cobre, zinc, plomo y níquel durante la minería, refinación y procesamiento del silicio, aluminio y cobre empleados en los *paneles fotovoltaicos* y *microinversores* [21]. Estas sustancias pueden depositarse en suelos agrícolas o zonas periurbanas cercanas a las plantas de manufactura, afectando la biota edáfica y los procesos de mineralización y descomposición del suelo.

La fase de instalación aporta 0.0003 kg 1,4-DB eq/t (5.270 %), asociada principalmente al uso de *recubrimientos protectores*, *adhesivos*, *solventes* y trazas metálicas presentes en componentes eléctricos y mecánicos. Aunque las cantidades absolutas son reducidas, su liberación localizada durante actividades de ensamblaje puede resultar ambientalmente relevante según la composición química de los materiales empleados [35].

Por su parte, la fase de transporte contribuye con apenas 0.00004 kg 1,4-DB eq/t (0.623 %). Si bien su magnitud es marginal, su relevancia radica en la dispersión indirecta de partículas metálicas, residuos logísticos y materiales particulados generados en actividades previas al transporte ferroviario y marítimo dentro de la cadena logística internacional [90].

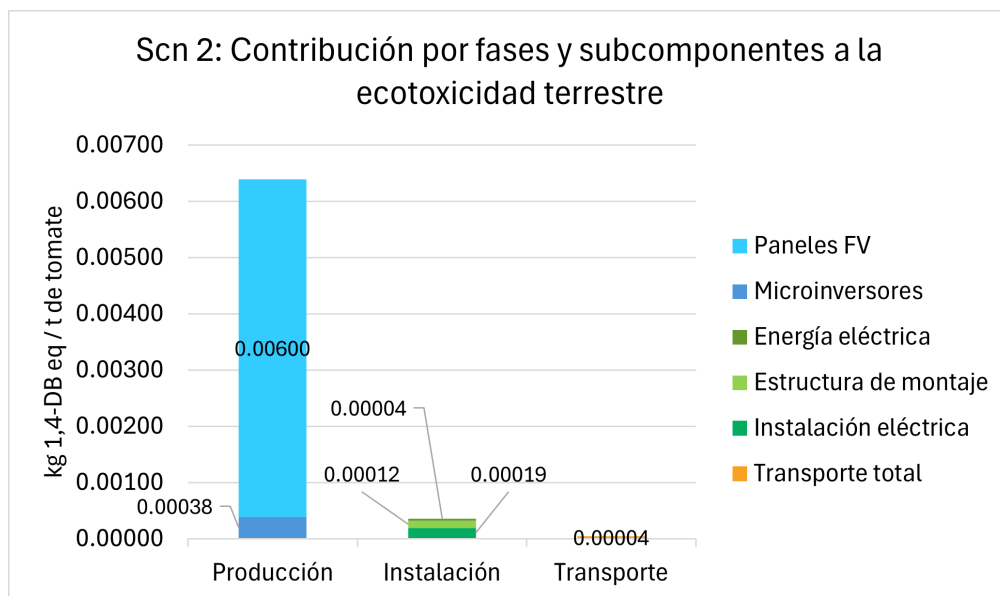


Figura 5.24: Scn-2 Contribución por fases y subcomponentes a la ecotoxicidad terrestre.

Los resultados son coherentes con los patrones descritos por Guzmán et al. (2023) para sistemas fotovoltaicos latinoamericanos, en los que la fase de manufactura concentra la mayor parte de la carga ecotóxica terrestre debido al uso intensivo de metales y a la generación de efluentes con trazas persistentes, mientras que la operación del sistema presenta contribuciones insignificantes [120]. Esto sugiere que la reducción del impacto debe centrarse en el control de emisiones durante la producción de metales, la gestión adecuada de residuos industriales y la implementación de tecnologías de recuperación y reciclaje de subproductos en la cadena de suministro fotovoltaica.

Ecotoxicidad marina

La ecotoxicidad marina evalúa el potencial de daño a los organismos acuáticos marinos causado por la liberación de sustancias tóxicas persistentes y metales pesados a lo largo del ciclo de vida del sistema fotovoltaico. Los resultados muestran que el Scn-1 presenta un impacto total de 0.541 kg 1,4-DB eq (20.346 %, mientras que el Scn-2 alcanza 2.118 kg 1,4-DB eq (79.654 %), lo que sugiere una intensificación del potencial ecotóxico marino en el escenario con generación fotovoltaica integrada. Este incremento no se asocia a la fase operativa, sino al uso de materiales y procesos industriales más complejos en las etapas previas del ciclo de vida.

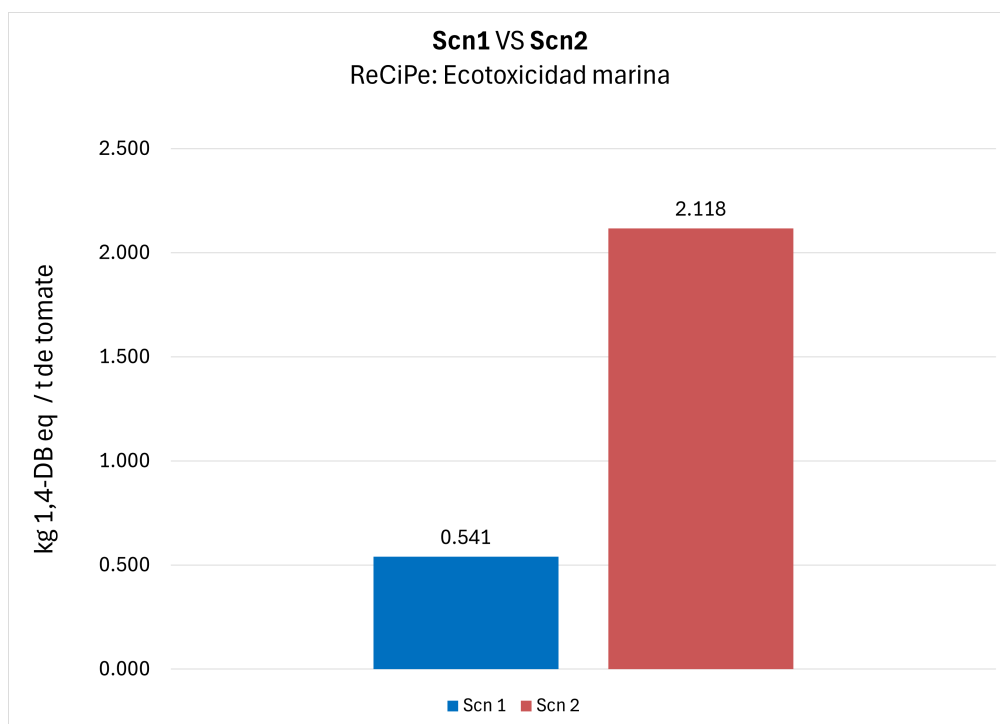


Figura 5.25: Comparación de escenarios en contribución a la ecotoxicidad marina

Tabla 5.14: Ecotoxicidad marina/t de tomate

Categoría de impacto	Unidad	Scn-1	Scn-2
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	0.541	2.118

Distribución por fases del ciclo de vida

La Figura 5.26 integra la contribución por fases del ciclo de vida (producción, instalación y transporte) junto con el desglose de los subcomponentes que intervienen en cada una, permitiendo identificar los procesos responsables de la ecotoxicidad marina expresada en

kg 1,4-DB eq. En el Scn-2, la fase de instalación constituye la mayor contribución, con 1.600 kg 1,4-DB eq/t de tomate (57.523 %). Este impacto se asocia a la *estructura de montaje*, el *cableado eléctrico* y a materiales poliméricos que contienen compuestos halogenados, plastificantes y solventes orgánicos. Aunque sus emisiones ocurren en pequeñas concentraciones, estos compuestos presentan alta persistencia y potencial de bioacumulación en ecosistemas marinos [35].

La fase de transporte representa una contribución relevante, con 0.663 kg 1,4-DB eq/t (23.849 %). Este aporte no proviene del desplazamiento ferroviario (que es energéticamente eficiente), sino de actividades logísticas dentro de la cadena internacional: embalajes multicapa, manipulación de carga, operaciones portuarias y transporte marítimo. Durante estos procesos se generan residuos, abrasivos, compuestos químicos lixiviables y pérdidas accidentales de materiales con potencial de toxicidad acuática [21].

Por su parte, la fase de producción aporta 0.518 kg 1,4-DB eq/t (18.627 %). Los impactos se originan en los efluentes industriales asociados a la refinación del silicio, la fabricación de celdas y la metalurgia primaria de cobre, aluminio y níquel. Estos procesos pueden liberar trazas de iones metálicos y compuestos organometálicos persistentes en ambientes salinos, lo que contribuye de manera significativa a la ecotoxicidad marina. Estudios recientes confirman que los procesos metalúrgicos y de purificación del silicio son determinantes en esta categoría cuando los materiales provienen de cadenas de suministro con controles ambientales limitados [90, 120].

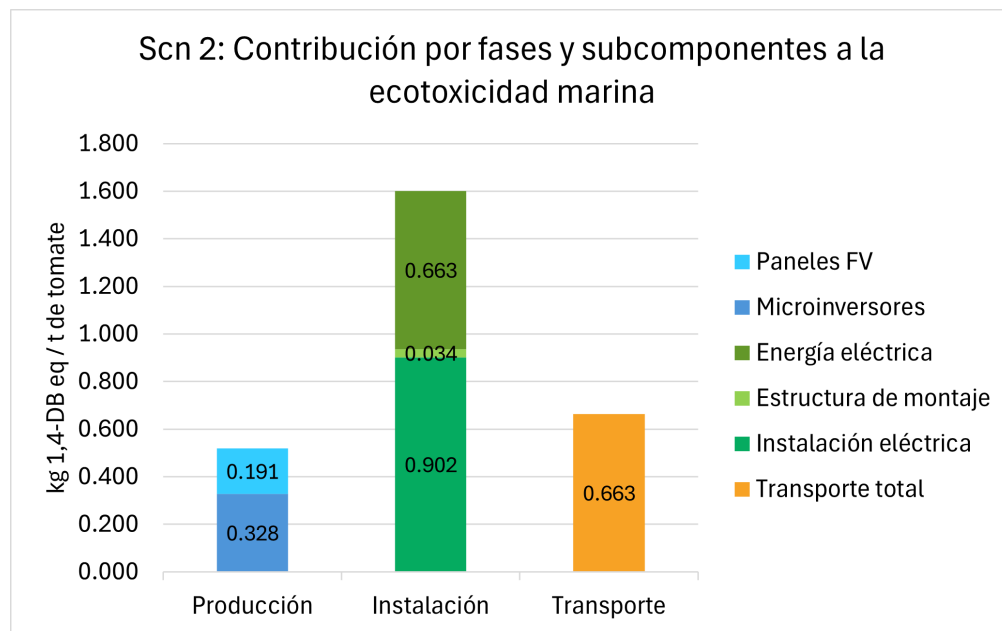


Figura 5.26: Scn-2 Contribución por fases y subcomponentes a la ecotoxicidad marina.

En conjunto, los resultados muestran que la ecotoxicidad marina no se deriva de la etapa operativa del sistema fotovoltaico, sino de los procesos industriales asociados a su producción, instalación y logística internacional. Esto refuerza la necesidad de implementar mecanismos

de control de emisiones, tratamiento de efluentes industriales y el desarrollo de materiales alternativos con menor toxicidad intrínseca, con el fin de reducir la presión ambiental sobre los ecosistemas marinos.

Bibliografía

- [1] FAO, “Faostat statistical database,” Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022, accessed: 2022. [Online]. Available: <https://www.fao.org/faostat>
- [2] INEGI, “Encuesta nacional agropecuaria 2017,” [Online], México, 2017, disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2017/>.
- [3] N. Unidas, “Conferencia de las naciones unidas sobre el medio humano,” 1972, accedido el 24 de septiembre de 2025. [Online]. Available: <https://www.un.org/es/conferences/environment/stockholm1972>
- [4] —, “Comisión mundial sobre el medio ambiente y desarrollo, creación de la comisión,” 1983, establecida por la ONU para preparar el Informe Brundtland.
- [5] C. M. sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, *Nuestro Futuro Común*. Naciones Unidas, 1987, disponible en <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>.
- [6] N. Unidas, “Conferencia de las naciones unidas sobre el medio ambiente y desarrollo (cnumad), río de janeiro,” 1992, accedido el 24 de septiembre de 2025. [Online]. Available: <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/riodeclaration.htm>
- [7] —, “Agenda 2030 para el desarrollo sostenible,” 2015, accedido el 24 de septiembre de 2025. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [8] —, “Cumbre sobre los objetivos de desarrollo sostenible (ods), nueva york,” 2023, accedido el 24 de septiembre de 2025. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- [9] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, “Anuario estadístico de la producción agrícola,” SIAP, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Ciudad de México, México, Tech. Rep., 2023. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/siap>
- [10] M. M. L. Lu Wang, Lars Oberbeck and P. Perez-Lopez2, “Modelling recycling for the life cycle assessment of perovskite/silicon tandem modules,” *EPJ Photovoltaics*, vol. 15, p. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.epj-pv.org/articles/epjpv/full_html/2024/01/pv230054/pv230054.html

- [11] S. E. Hosseini and M. A. Wahid, “Renewable energy systems: A review of energy, environmental and economic analysis,” *Energy Conversion and Management*, vol. 199, p. 111973, 2019.
- [12] International Energy Agency, “Electricity market report 2023,” IEA, Paris, Tech. Rep., 2023.
- [13] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Renewable power generation costs in 2023,” International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Tech. Rep., 2023, iSBN 978-92-9260-565-4. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications>
- [14] T. Wang, G. Wu, J. Chen, P. Cui, Z. Chen, Y. Yan, Y. Zhang, M. Li, D. Niu, B. Li, and H. Chen, “Integration of solar technology to modern greenhouse in china: Current status, challenges and prospect,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 1178–1188, 2017.
- [15] G. Clandestino, R. Testa, M. Foderà, and F. Sgroi, “Agrovoltaica: Una revisión del estado del arte y perspectivas de desarrollo,” *Sustainability*, vol. 12, no. 19, p. 8035, 2020.
- [16] S. Gorjian, F. Calise, A. Buonomano, M. Shafiee, P. Ranjbaran, and I. D’Adamo, “A review on agrovoltaic systems: Renewable energy integration with agricultural production,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, p. 110806, 2021.
- [17] M. U. Sajid and Y. Bicer, “Comparative life cycle cost analysis of various solar energy-based integrated systems for self-sufficient greenhouses,” *Sustainable Production and Consumption*, vol. 27, pp. 609–621, 2021.
- [18] M. Massaoudi, H. Abu-Rub, S. S. Refaat, I. Chihi, and F. S. Oueslati, “Deep learning in smart grid technology: A review of recent advancements and future prospects,” *IEEE Access*, vol. 9, p. 54558–54578, 2021.
- [19] ISO, “ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework,” <https://www.iso.org/standard/23152.html>, 1997.
- [20] “Iso 14044:2006 environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines,” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, Standard ISO 14044:2006, 2006.
- [21] M. Frischknecht *et al.*, “Life cycle inventories of photovoltaic systems (ecoinvent v3.8 dataset documentation),” Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Tech. Rep., 2022.
- [22] IEA PVPS Task 1, “Trends in Photovoltaic Applications 2024,” International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS), Paris, Tech. Rep., 2024.
- [23] ACCIONA, “Informe integrado 2019,” Informe corporativo, 2019, [Online]. Available: <https://www.acciona.com/content/dam/accionacom/media/pkhnexxm/informe-integrado-2019.pdf> [Accessed: Aug. 25, 2025].

- [24] M. Z. Hauschild, M. Huijbregts, O. Joliet, M. MacLeod, M. Margni, D. van de Meent, R. K. Rosenbaum, and T. E. McKone, "Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, no. 3, pp. 683–697, Mar. 2013.
- [25] B. Steen, "Environmental costs and benefits in life cycle costing," *Management of Environmental Quality: An International Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 107–118, April 2005.
- [26] IRENA, "Renewable energy and air quality," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Tech. Rep., 2021.
- [27] R. Brinkmann, *Environmental Sustainability in a Time of Change*. Palgrave, 2020.
- [28] J. Caradonna, *Sustainability: A History*. Oxford University Press, 2014.
- [29] M. Olalla-Tárraga, "A conceptual framework to assess sustainability in urban ecological systems," *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, vol. 13, no. 1, pp. 1–15, Feb. 2006.
- [30] J. Olivo, "La protección de la biodiversidad en el derecho ambiental mexicano: un análisis de la legislación desde el enfoque de especies amenazadas y su hábitat crítico," *Boletín mexicano de derecho comparado*, vol. 49, no. 147, pp. 347–371, 2016, recuperado en 11 de junio de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S004186332016000300347&lng=es&tlng=es.
- [31] D. Gloria María Aponte Figueroa, "Innovación verde: Indicadores y principales tendencias," 2021.
- [32] United Nations, "Sustainable development goals," <https://sdgs.un.org/goals>, 2015, accessed: 2025-11-13.
- [33] M. Goedkoop, M. Huijbregts, A. d. Schryver, J. Struijs, and R. v. Zelm, "Recipe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level," RIVM National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands, Report RIVM Report 2016-0104, 2016, accessed: 2025-11-13. [Online]. Available: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>
- [34] G. A. Heath, P. Sinha *et al.*, "Harmonization of life cycle greenhouse gas emission estimates for photovoltaic (PV) electricity generation technologies," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 24, no. 1, pp. 140–152, 2020.
- [35] S. Castellani *et al.*, "Toxicity pathways in renewable system supply chains," *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 204, p. 107315, 2024.
- [36] A. A. Maidana and G. A. Armelini, "Indicadores sustentables aplicables al desarrollo experimental de un módulo habitacional: Eje 2, tecnología para la construcción sustentable," Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Argentina, 2016.
- [37] U. Oswald, "Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México," *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*, 2016.

- [38] A. Larios, “Desarrollo y perspectivas de energía renovable en México,” *Economía Informa*, 2015.
- [39] S. de Energía (SENER), “Inventario nacional de energías renovables (inere),” Sitio web oficial, 2023, disponible en: <https://www.gob.mx/sener/documentos/inventario-nacional-de-energias-renovables-inere>.
- [40] A. Solís Guerrero, “Energía y sustentabilidad,” Revista COEPES, 2014, <http://www.revistacoepesgto.mx/revistacoepes10/energia-y-sustentabilidad?tmpl=component&print=1&page=>.
- [41] Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT), *Energía solar fotovoltaica*. COIT, 2007.
- [42] INAPI, “Informe de vigilancia tecnológica: Energía solar fotovoltaica,” 2021.
- [43] J. Pasqualino, C. Cabrera, and M. Vanegas Chamorro, “Los impactos ambientales de la implementación de las energías eólica y solar en el Caribe colombiano,” *Prospectiva*, vol. 13, no. 1, pp. 68–76, 2015.
- [44] S. de Energía (SENER) and C. R. de Energía (CRE), “Resultados de la primera subasta eléctrica de largo plazo,” Reporte oficial, 2016, disponible en: <https://www.gob.mx/cre>.
- [45] S. de Energía (SENER), “Impacto económico de las subastas eléctricas de largo plazo,” Reporte oficial, 2017, disponible en: <https://www.gob.mx/sener>.
- [46] C. R. de Energía (CRE), “Externalidades ambientales asociadas a la primera subasta eléctrica de largo plazo,” Reporte oficial, 2016, disponible en: <https://www.gob.mx/cre>.
- [47] I. G. Martínez Cienfuegos, B. Weber, and M. D. Durán García, *Energía Solar Fotovoltaica*. Toluca, México: Universidad Autónoma del Estado de México, 2016, material académico institucional.
- [48] G. del Estado de México, “Programa de sistemas fotovoltaicos residenciales,” Informe estatal, 2019, secretaría de Desarrollo Social del Estado de México.
- [49] IUSASOL, “Portafolio de sistemas fotovoltaicos y soluciones de generación distribuida,” Documento técnico de la empresa, 2023, disponible en: <https://iusasol.com>.
- [50] J. Moreno, “Tendrá Edomex el parque fotovoltaico más grande de Latinoamérica,” Artículo de la revista Somos Industria, 2016, disponible en línea.
- [51] K. Nemali, “History of controlled environment horticulture: Greenhouses,” *HortScience*, vol. 57, no. 2, pp. 239–246, Feb. 2022.
- [52] J. A. Aznar-Sánchez, J. F. Velasco-Muñoz, B. López-Felices, and I. M. Román-Sánchez, “An analysis of global research trends on greenhouse technology: Towards a sustainable agriculture,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 2, p. 664, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ijerph17020664>

- [53] I. Molina López, M. A. Muñoz-García, R. Moratíel-Yugueros, and G. P. M. Cantero, “Uso de energía solar fotovoltaica aplicada a la refrigeración de un invernadero,” Madrid, España, Sep. 2019, disponible en: <https://www.agrosolucion.es/> (consulta: 2019).
- [54] A. Paredes, *Manual del cultivo de tomate en invernadero*. Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), 2009, disponible en: <https://www.produmedios.org/>.
- [55] H. Escobar and R. Lee, “Manual de producción de tomate bajo invernadero,” Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), Bogotá, Colombia, Tech. Rep., 2009.
- [56] C. Jasso Chaverría, M. Á. Martínez Gamiño, J. R. Chávez Vázquez, J. A. Ramírez Télles, and E. Garza Urbina, *Guía para cultivar jitomate en condiciones de malla sombra*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), 2012.
- [57] E. Benítez, “La estacionalidad del jitomate en temascaltepec, estado de méxico,” [Online], Temascaltepec, México, 2018, available: Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex).
- [58] INEGI and SNIEG, “Encuesta intercensal 2015,” [Online], México, 2015, disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/>.
- [59] O. Madrigal Millian, O. Brown Manrique, D. Luis Pelier, Y. Gallardo Ballat, and L. Castellanos, “Análisis del consumo de agua y energía en el riego por surcos / analysis of water and energy consumption in furrows irrigation,” *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 30, no. 2, pp. 42–50, 2021, disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/4560/456066016005/html/>.
- [60] J. B. Guinée, *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [61] G. Vidal, P. Neumann, A. Hospido, A. De la Fuente, and C. De la Fuente, *Análisis de Ciclo de Vida: Fundamentos y Aplicación a la Gestión Sustentable de los Recursos Hídricos*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, 2022, [Online]. Available: <https://www.crhiam.cl>.
- [62] PRé Sustainability, “Simapro lca software and database access,” Software: PRé Sustainability, Amersfoort, The Netherlands, 2023, [Online]. Available: <https://simapro.com/>.
- [63] Ecoinvent Association, “Ecoinvent database v3.8,” Database: Ecoinvent Association, Zurich, Switzerland, 2023, [Online]. Available: <https://ecoinvent.org/>.
- [64] B. Niblick, “Global guidance for life cycle impact assessment indicators (glam), volume 2,” [Online], Geneva, Switzerland, 2019, available at: <https://www.researchgate.net/publication/337672270>.

- [65] The International EPD® System, “Environmental performance indicators | epd international,” [Online], Stockholm, Sweden, 2020, accessed: Apr. 01, 2023. Available at: <https://www.environdec.com/resources/indicators>.
- [66] UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, “Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations,” United Nations Environment Programme (UNEP), Paris, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: <https://www.lifecycleinitiative.org>
- [67] M. A. J. Huijbregts, Z. J. N. Steinmann, P. M. F. Elshout, G. Stam, F. Verones, M. Vieira, M. Zijp, A. Hollander, and R. van Zelm, “Recipe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level,” *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, no. 2, pp. 138–147, 2017.
- [68] M. Bošnjaković, R. Santa, Z. Crnac, and T. Bošnjaković, “Environmental impact of pv power systems,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 15, Aug. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su15111888>
- [69] M. Kumpanalaisatit, P. Chaiwiwatworakul, W. Chinsirikul, U. Suwannamek, R. Rittiron, and B. Limmeechokchai, “Current status of agrivoltaic systems and their benefits to energy, food, environment, economy, and society,” *Energies*, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en15249546>
- [70] V. Muteri, M. Cellura, D. Curto, V. Franzitta, S. Longo, M. Mistretta, and M. L. Parisi, “Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels,” *Energies*, vol. 13, no. 1, p. 252, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13010252>
- [71] S. Lizin, S. Van Passel, E. De Schepper, W. Maes, L. Lutsen, J. Manca, and D. Vanderzande, “Life cycle analyses of organic photovoltaics: A review,” *Energy and Environmental Science*, vol. 6, no. 11, pp. 3136–3149, Nov. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1039/C3EE42653J>
- [72] F. de Riesgo Compartido (FIRCO), “Programas y proyectos de energías renovables aplicados al sector agropecuario en México,” Informe institucional, 2020, disponible en: <https://www.gob.mx/firco>.
- [73] C. F. de Electricidad, “Manual de tarifas para suministro y venta de energía eléctrica 2023,” <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRE2023/>, 2023, accedido: 20 noviembre 2025.
- [74] C. R. de Energía, “Disposiciones administrativas de carácter general sobre las tarifas finales del suministro eléctrico,” <https://www.cre.gob.mx>, 2022, accedido: 20 noviembre 2025.
- [75] D. O. de la Federación, “Acuerdo por el que se actualizan las tarifas finales del suministro básico,” <https://www.dof.gob.mx>, 2023, accedido: 20 noviembre 2025.
- [76] International Energy Agency, “The role of critical minerals in clean energy transitions,” 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

- [77] *SimaPro Database Manual: Methods Library*, PRé Sustainability, Amersfoort, The Netherlands, 2022.
- [78] Ecoinvent. (2025) System models. Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: https://support.ecoinvent.org/system-models#Allocation_classification
- [79] Ecoinvent. (2025) ecospold1. Accessed: Apr. 20, 2025.
- [80] “Ilcd handbook: General guide for life cycle assessment – detailed guidance,” European Commission – Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg, Handbook, 2010, eUR 24708 EN.
- [81] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, “The ecoinvent database version 3 (part i): overview and methodology,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, Sep. 2016.
- [82] L. Amendola and T. Depool, “Estudio de indicadores claves en el ciclo de vida de los activos en generación de energía fotovoltaica,” 92.
- [83] W. B. P. and V. C. O., “Swiss centre for life cycle inventories: Overview and methodology (final), acknowledgements v3,” Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Tech. Rep., 2019, ecoinvent report v3, Overview and methodology.
- [84] OpenLCA Community. (2025) What is a ‘market’ process in ecoinvent? - ask.openlca - question and answer (q&a) on life cycle assessment (lca) - a life cycle assessment (lca) community. Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: <https://ask.openlca.org/1000/what-is-a-market-process-in-ecoinvent>
- [85] M. J. D. Wild-Scholten, D. Nl, and E. A. Alsema. (2006) Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production. Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: <http://www.ecn.nl/library/reports/2006/c06002.html>
- [86] Ecoinvent. (2025) Energy. Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: <https://support.ecoinvent.org/energy>
- [87] ——. (2025) Activities and products. Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: <https://support.ecoinvent.org/activities-products>
- [88] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, and S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.
- [89] E. Chambile, “Assessment of grid electricity systems using the life-cycle carbon-emission model,” *Science and Technology for Energy Transition*, Sep. 2024.
- [90] IEA PVPS Task 1, “Trends in photovoltaic applications 2024,” International Energy Agency, Paris, France, Tech. Rep., 2024, iEA PVPS Report T1-44:2024. [Online]. Available: <https://iea-pvps.org>
- [91] UNEP, “Global chemicals outlook ii: From legacies to innovative solutions,” United Nations Environment Programme, Nairobi, Tech. Rep., 2019.

- [92] M. L. Kambanou, “Life cycle costing: Understanding how it is practised and its relationship to life cycle management—a case study,” *Sustainability*, vol. 12, no. 8, p. 3252, 2020.
- [93] A. Sha *et al.*, “Full life-cycle cost model for practical application of solar energy system,” *Energy Informatics*, vol. 8, 2025.
- [94] IRENA, “Renewable power generation costs in 2023,” 2024. [Online]. Available: <https://www.irena.org/>
- [95] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023) Annual Technology Baseline (ATB). U.S. Department of Energy. Accessed: Jan. 2026. [Online]. Available: <https://atb.nrel.gov>
- [96] Enphase Energy, “Iq8a microinverter datasheet,” 2024.
- [97] Canadian Solar, “Hiku6 mono perc 420 wp datasheet,” 2024.
- [98] R. A. Brealey, S. C. Myers, and F. Allen, *Principles of Corporate Finance*, 13th ed. McGraw-Hill Education, 2019.
- [99] C. S. Park, *Contemporary Engineering Economics*, 5th ed. Prentice Hall, 2011.
- [100] L. Blank and A. Tarquin, *Engineering Economy*, 7th ed. McGraw-Hill, 2012.
- [101] A. Author, “Levelized cost of energy of different photovoltaic module technologies,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 12, p. 6710, 2025.
- [102] B. Author, “Estimating the financial payback period for renewable energy investment: A quasi-systematic review,” *Energy Reports*, 2025.
- [103] C. Author, “Economic analysis of distributed photovoltaic power generation projects,” in *Advances in Energy Systems*. Springer, 2024.
- [104] NREL, “Life-cycle greenhouse gas emissions from solar photovoltaics,” 2021, disponible en: <https://www.nrel.gov>, consultado el 30 de septiembre de 2025.
- [105] L. Hernández and A. Morales, “Economic assessment of grid-connected and agricultural photovoltaic systems in latin america,” *Energy Policy*, vol. 144, pp. 111–121, 2020.
- [106] D. Carvalho and R. Zilles, “Economic evaluation of photovoltaic systems in rural and agricultural applications,” *Renewable Energy*, vol. 109, pp. 259–268, 2017.
- [107] GHG Protocol, “Global warming potential values (august 2024),” 2024, disponible en: <https://ghgprotocol.org/global-warming-potentials>, consultado el 30 de septiembre de 2025.
- [108] H. Gao, X. Zhang, and Y. Li, “Protected cultivation can mitigate carbon emissions for tomato production,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 442, p. 354112, 2024.

- [109] D. P. Neira, C. Zafrilla, and J. Lozano, “Energy use and carbon footprint of tomato production in heated and unheated greenhouses,” *Sustainability*, vol. 10, no. 9, p. 3215, 2018.
- [110] European Commission, Joint Research Centre, “Product environmental footprint (pef) category rules for photovoltaic modules,” Publications Office of the European Union, Luxembourg, Tech. Rep. EUR 30984 EN, 2023.
- [111] J. A. Hollingsworth, P. M. Thompson, and K. McNamara, “Environmental and economic impacts of solar-powered greenhouse tomatoes,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 24, no. 5, pp. 1123–1137, 2020.
- [112] IEA-PVPS Task 12, “Environmental life cycle assessment of electricity from pv systems (factsheet),” 2022, disponible en: <https://iea-pvps.org>, consultado el 30 de septiembre de 2025.
- [113] A. Lisperguer *et al.*, “Environmental impact assessment of crystalline solar photovoltaic systems,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 26, p. e00222, 2020.
- [114] IRENA, “Future of solar photovoltaics,” International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Tech. Rep., 2022.
- [115] V. Toledo, “Riesgos de la transición energética postfosilista en américa latina,” *Revista de Estudios Latinoamericanos*, 2023.
- [116] M. Romero Campos, “Análisis de ciclo de vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles fotovoltaicos en chile,” Master’s thesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2019.
- [117] Ecoinvent Association, “Transport datasets documentation (electric train, freight, {RoW}),” Ecoinvent, Zurich, Tech. Rep., 2022.
- [118] —, “Ecoinvent database v3.8: Transport datasets documentation (electric train, freight, {RoW}),” Ecoinvent, Zurich, Tech. Rep., 2022.
- [119] European Commission, “Product environmental footprint (pef) category rules for photovoltaic modules,” Publications Office of the European Union, Tech. Rep. EUR 30984 EN, 2023.
- [120] M. Guzmán, L. Rodríguez, and A. Salazar, “Evaluación ambiental de sistemas fotovoltaicos en latinoamérica mediante análisis de ciclo de vida,” *Cleaner Energy Systems*, vol. 5, pp. 102–115, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cles.2023.100245>