



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**EVALUACIÓN DE SUSTENTABILIDAD DEL RECICLAJE
FOTOVOLTAICO EN EL CONTEXTO DE YUCATÁN**

TESIS

PRESENTADO POR:

DANIELA ABIGAIL HERNÁNDEZ LÓPEZ

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

OPCIÓN ENERGÍAS RENOVABLES

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2021

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen Profesional y hubiere sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece el apoyo económico otorgado por CONACYT (CVU: 1007727, beca no: 752354) para realizar los estudios de Maestría en Ingeniería (opción: Energías Renovables) en la Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán, México.

RESUMEN

La producción masiva de paneles solares (fotovoltaicos fotovoltaicos) presenta una amenaza socioambiental debido a su desperdicio al final de su vida útil, que se proyecta en millones de toneladas para mediados de siglo. Trae vulnerabilidad entre los países de bajos ingresos que todavía están debatiendo sobre la aceptabilidad de las energías renovables, entonces, ¿cómo podrían aceptar una forma avanzada, es decir, el "reciclaje fotovoltaico"? La gestión inadecuada de los residuos fotovoltaicos globales puede generar pobreza de energía renovable y se debe adaptar un enfoque de sostenibilidad neutral. Este trabajo tiene como objetivo combinar las dimensiones ambientales, económicas y sociales de los residuos fotovoltaicos para una región vulnerable, Yucatán (México), para implementar regulaciones sostenibles de residuos fotovoltaicos. El análisis del ciclo de vida y del medio ambiente ha sugerido que estos impactos pueden reducirse mediante el reciclado fotovoltaico con una disminución notable de la toxicidad humana y la ecotoxicidad del agua dulce en aproximadamente un 78%. La evaluación del costo del ciclo de vida ha demostrado que el costo nivelado de la electricidad con reciclaje fotovoltaico puede ser ~ 2% menos que en el caso sin reciclaje fotovoltaico. Una encuesta social ha indicado que el reciclaje de energía fotovoltaica puede ser aceptable siempre que se puedan introducir programas de capacitación masiva e incentivos de reciclaje para que la conciencia pública facilite la implementación eficiente de una regularización. Al final, este trabajo, de manera metodológica, responde al debate filosófico de que si el reciclaje de paneles solares puede brindar sustentabilidad a esta industria para el contexto mexicano.

ABSTRACT

Mass production of solar (photovoltaic PV) panels exhibits a socioenvironmental threat owing to their end-of-life waste which is projected to be in millions of tons by mid-century. It brings vulnerability among the low-income countries who are still debating on the acceptability of renewable energies then how could they accept an advanced form i.e. "PV recycling"? Inadequate management of global PV waste can generate renewable energy poverty and a neutral sustainability approach should be adapted. This work aims to combine environmental, economic, and social dimensions of PV waste for a vulnerable region, Yucatan (Mexico), to implement sustainable PV waste regulations. Life-cycle-environmental analysis has suggested that these impacts can be decreased through PV recycling with a notable diminution in human toxicity and freshwater ecotoxicity by ~78%. Life-cycle-cost assessment has testified that the Levelized-cost-of-electricity with PV recycling can be ~2% less than the case without PV recycling. Social survey has indicated that recycling PV can be acceptable provided mass training programs and recycling incentives can be introduced for the public awareness to facilitate the efficient implementation of a regularization. In the end, this work, in a methodological way, answers the philosophical debate that if recycling solar panels can provide sustainability to this industry for the Mexican context.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Revisión de literatura y estado del arte	2
1.3. Planteamiento del problema.....	8
1.4. Objetivos	12
1.4.1. Objetivo general	12
1.4.1. Objetivos específicos.....	12
1.5. Justificación.....	13
1.6. Marco metodológico.....	13
CAPÍTULO 2	15
2. MÉTODO	15
2.1. Metodología integrada multidisciplinar y multidimensional adaptada para la evaluación de la sustentabilidad	15
2.2. Evaluación ambiental del ciclo de vida	17
2.2.1. Objetivo y alcance del Análisis de Ciclo de Vida Ambiental	17
2.2.2. Inventario	18
2.3. Evaluación de impacto.....	19
2.3. Análisis de Ciclo de Vida Económico.....	20
2.3.1. Estimación de costos individuales.....	21
2.4. Evaluación social	26
2.4.1. Objetivos	26
2.4.2. El diseño del cuestionario	27
2.4.3. Técnica de muestreo.....	28

CAPÍTULO 3	29
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
3.1. Resultados del ACV ambiental	29
3.2. Resultados del ACV económico	35
3.3. Comprensión interpretativa de los resultados de la encuesta social	37
3.3.1. Contexto sociodemográfico y socioeconómico de la muestra de investigación	38
3.3.2. Análisis interpretativo del conocimiento y la actitud sobre el reciclaje fotovoltaico	39
3.3.3. La conciencia social integral y los encuestados practican la necesidad de una regulación de reciclaje	40
3.3.4. Reciclaje de paneles solares en el contexto de Yucatán, nexo de conciencia ambiental y patrocinio económico	41
3.3.5. Reciclaje entre ser un debate político y un debate social	42
3.3.6. Correlación de conglomerados multivariados entre las variables triangulares mediante el análisis de componentes principales	43
3.3.7. Observaciones finales de la encuesta social	44
CAPÍTULO 4	49
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
APÉNDICE A: ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA	52
APÉNDICE B: CUESTIONARIO SOBRE RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS	56
APÉNDICE C: ARTÍCULO CIENTÍFICO EN REVISIÓN	65
APÉNDICE D: PARTICIPACIÓN EN CONGRESO NACIONAL DE ESTUDIANTES DE ENERGÍAS RENOVABLES (CNEER)	66
APÉNDICE E: CERTIFICADO DE PLATICA SOBRE EL TEMA DE LA TESIS	67
REFERENCIAS	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Resumen de la capacidad fotovoltaica acumulada instalada en México y proyecciones 2016–2030 (Domínguez and Geyer 2017a).	8
Figura 1.2: Porcentaje por componente de un panel fotovoltaico de c-Si. Figura elaborada por los autores, en base a la referencia (Domínguez and Geyer 2017a). ..	9
Figura 1.3: Distribución de radiación solar promedio de México (Instituto de Investigaciones Eléctricas y SENER).	10
Figura 1.4: Integración de evaluación Ambiental, Económica y Social y herramientas empleadas.....	14
Figura 2.1: Metodología global adaptada en el trabajo destacando las distintas etapas de la investigación. Nota: Las referencias utilizadas en esta figura son las siguientes: (Contreras Lisperguer et al. 2020; Cucchiella, D’Adamo, and Rosa 2015; Deng et al. 2019; Dias et al. 2021; IRENA 2018; Liu, Zhang, and Wang 2020; Maani et al. 2020; Mahmoudi, Huda, and Behnia 2020; Parisi et al. 2020)	17
Figura 2.2: Etapas del ACV sin reciclaje y con reciclaje (Ardente, Latunussa, and Blengini 2019) y (Fu, Liu, and Yuan 2015).	18
Figura 2.3: Resumen de entradas y salidas del proceso “FREL P” para el reciclaje de 1000 kg de paneles de residuos fotovoltaicos de silicio (Ardente, Latunussa, and Blengini 2019).	19
Figura 2.4: Datos de radiación solar y temperatura ambiente del estado de Yucatán. (Klein 2010).	24
Figura 3.1: Resultados de la evaluación de impacto ambiental para el caso de paneles fotovoltaicos (a) sin considerar una técnica de reciclaje, y (b) con la técnica de reciclaje FREL P. (c) Comparación de la evaluación de impacto ambiental de ambos casos. Nota: El eje x de la figura (a, b) y el eje y de la figura (c) representan la escala de porcentaje que indica la contribución relativa de cada paso del proceso. El eje y de la	

figura (a, b) y el eje x de la figura (c) representan la categoría del impacto ambiental.

..... 33

Figura 3.2: (a) Diagrama de flujo de caja del caso con y sin la consideración del reciclaje fotovoltaico. Desglose del costo del ciclo de vida para (b) sin reciclaje y (c) considerando el reciclaje fotovoltaico. (d) La influencia de los incentivos de reciclaje en el costo nivelado de la electricidad y el costo al final de su vida útil..... 37

Figura 3.3: Hallazgos de la valoración social. Nota: los alfabetos (a-q) corresponden a cada pregunta. 47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Regulaciones sobre gestión de residuos de paneles fotovoltaicos en el mundo.	3
Tabla 1.2: Diferentes procesos de reciclaje de paneles fotovoltaicos.	5
Tabla 1.3: Empresas dedicadas a la fabricación, Venta y/o instalación de paneles fotovoltaicos en el estado de Yucatán.	10
Tabla 2.1: Descripción del costo inicial.	21
Tabla 2.2: Estimación del costo del reciclaje al final de la vida útil del panel fotovoltaico.	25
Tabla 3.1: Estimación del costo del reciclaje al final de la vida útil del panel fotovoltaico.	34
Tabla 3.2: Hallazgos estadísticos para correlacionar triangular (perfil sociodemográfico, conocimiento previo y aceptación social) del reciclaje de los paneles solares.	48

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Como parte del reto mundial de las Naciones Unidas, se crearon en 2015 los objetivos de sustentabilidad los cuales tratan de atacar problemas que abarcan desde poner fin a la pobreza hasta la creación de alianzas para el logro de estos objetivos. Siendo su visión general alcanzar el desarrollo sustentable de los países miembros y México, al formar parte de estos tendrá que adoptar medidas que propicien la mejora en aspectos socioambientales y económicos. Estas medidas serán una ruta para erradicar la pobreza, proteger al planeta y asegurar la prosperidad para todos sin comprometer los recursos para futuras generaciones. En la actualidad México cuenta con una lista de indicadores diseñados para monitorear los diecisiete objetivos de sustentabilidad, también conocidos como objetivos del milenio, estos indicadores están subdivididos en globales, nacionales, estatales, municipales y por las principales ciudades en el territorio nacional.

Uno de los objetivos es garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos. Actualmente México ha creado tres indicadores para monitorear la situación en este objetivo. Siendo la proporción de población total con acceso a electricidad medida en función de la energía primaria y el PIB y finalmente la proporción de energía renovable en el consumo final total de la energía. Según el dato más reciente del banco mundial, en el año 2015 la energía renovable producida a nivel mundial fue de 5.5% mientras que en el 2018 el total de energía renovable producida fue del 21.1% y en el primer semestre del mismo año la capacidad instalada de energías renovables era del 27.09% (20,620.20 MW). La capacidad instalada fotovoltaica fue 2.16% (1,646.55MW) de la total instalada, registrando un incremento del 11.8% en la capacidad instalada y un 21.7% de la generada por fuentes renovables en relación al año 2017. Por otra parte, el incremento en capacidad instalada de

energía fotovoltaica pasó de 461 MW a 1646.5 MW registrando el mayor incremento de capacidad instalada por fuente de energía renovable con un 257% seguida del biogás con un 145%, lo que demuestra el incremento exponencial de la generación fotovoltaica en México. (Coldwell et al. 2018)

De acuerdo con el Renewable Energy Roadmap 2030 (IRENA 2018) México podría triplicar su producción de energía a través de fuentes renovables, de 0.5 EJ a en 2010 a 1.5 EJ en 2030. En 2018 27 GW de los 87 GW de capacidad energética instalada en México correspondieron a fuentes renovables (Hidroeléctrica, Eólica, Geotérmica, Solar térmica y Solar Fotovoltaica) siendo la energía solar fotovoltaica la que ha presentado mayor crecimiento de 1.9 GW en 2018 a 5.6 GW a inicios del 2020 (SIE SENER).

Es sabido que en la actualidad los residuos de los paneles fotovoltaicos no representan un gran volumen y aunque su vida útil está entre 25-30 años debido al crecimiento de sus instalaciones, es particularmente importante crear e implementar tecnologías de reciclaje que se apeguen a planes para crear un futuro sostenible para los paneles fotovoltaicos mediante el manejo de sus residuos y a su vez, la mitigación de los impactos ambientales que estos puedan generar.

1.2. Revisión de literatura y estado del arte

En la actualidad, países de Europa, China y Japón se centran en investigación y desarrollo de técnicas de reciclaje de paneles fotovoltaicos. En su mayoría, se enfocan en el reciclaje de paneles de Silicio ya que este representa más del 70% del total de módulos instalados mundialmente. A pesar de los avances en la investigación y el desarrollo en técnicas, físicas, térmicas y químicas para la separación de componentes a nivel laboratorio y comercial, en México la tecnología de reciclaje de módulos fotovoltaicos no muestra un avance significativo a nivel operacional.

Mundialmente el desarrollo de métodos para la gestión de residuos fotovoltaicos se ha vuelto cada vez más indispensable por lo que se han desarrollado normas en las que

se regulan. En la siguiente Tabla 1.1 se muestran países que han regulado el manejo de estos aparatos.

Tabla 1.1: Regulaciones sobre gestión de residuos de paneles fotovoltaicos en el mundo.

País	Autoridad	Pautas
Reino Unido Alemania, Noruega, Italia, Suiza, República Checa	Directiva de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (Directiva WEEE)	Originalmente lanzada en 2003, la Directiva sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) regula el tratamiento de los residuos eléctricos y electrónicos al final de su ciclo de vida. La directiva ha sido modificada dos veces ("reenviada") en 2008 y 2012, lo que da como resultado un alcance ampliado para incluir muchos nuevos productos adicionales. Los paneles fotovoltaicos (PV) se introdujeron en la última revisión de 2012. Los RAEE establecen las normas legales fundamentales y la obligación de recolectar y reciclar paneles fotovoltaicos en la Unión Europea, incluido el establecimiento de objetivos mínimos de recolección y recuperación.
Japón	Asociación Japonesa de energía fotovoltaica (JPEA)	En 2017, la Asociación de Energía Fotovoltaica de Japón (JPEA) emitió pautas voluntarias sobre cómo deshacerse de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil. A mediados de 2015, se desarrolló una hoja de ruta para presentar el esquema de recolección, entrega, reciclaje y tratamiento de dicha mercancía. Con base en la hoja de ruta, las pautas principales se lanzaron en abril de 2016, que incorpora el desmantelamiento, el transporte, la manipulación, el tratamiento y la forma adecuada de reciclaje. Se anticipa que la hoja de ruta y, por lo tanto, la directriz puede llevar esta iniciativa a pensar más en las políticas relacionadas con la gestión del final de la vida útil de los residuos del módulo fotovoltaico
China	Reglamento de gestión de reciclaje de residuos de productos eléctricos y electrónicos	En febrero de 2009, el Consejo de Estado de China difundió el Reglamento de gestión del reciclaje de residuos de productos eléctricos y electrónicos que entró en vigor en enero de 2011 (Consejo de Estado de la República Popular de China, 2011). La regulación de 2011 se convierte en obligatoria para que los desechos electrónicos se recojan de diferentes maneras y se reciclen en un sistema de procesamiento centralizado. Los fabricantes pueden recolectar y reciclar los productos por sí mismos o confiar la recolección a los vendedores, las empresas de servicios posventa o los recicladores de desechos

		electrónicos y confiar el reciclaje / eliminación a instituciones calificadas.
Corea	Ministerio de comercio, Industria y Energía (MOTIE)	No existen pautas o regulaciones específicas que rijan la gestión del final de la vida útil de los módulos fotovoltaicos de desechos en Corea. Sin embargo, el informe de "Proyectos de apoyo a la política e información energética de 2015" del Ministerio de Comercio, Industria y Energía (MOTIE) presentó una propuesta de directrices adicionales que obligan a informar la eliminación de desechos fotovoltaicos en virtud de la "Ley de Promoción del Desarrollo, Uso y Difusión de energía nueva y renovable" como una medida para aumentar el reciclaje fotovoltaico. Según el informe, sería económico enmendar las reglas que cubren los desechos fotovoltaicos a la presente ley sobre energía renovable en lugar de producir una nueva guía para los desechos del módulo fotovoltaico. El informe sugirió que un establecimiento público debería ser elitista para manejar los procedimientos asociados con la cobertura de la eliminación de desechos del módulo fotovoltaico, ya que actualmente no hay ningún establecimiento responsable de informar esta información.
India	Ministerio de Medio Ambiente, Bosques y Cambio Climático.	India cae en la misma categoría y no tiene regulaciones sobre la recolección, recuperación y reciclaje de componentes del sistema FV del módulo FV al final de su vida útil. En la actualidad, los desechos generados por los módulos fotovoltaicos se tratan bajo las regulaciones generales de desechos.
California, Estados Unidos	Gobierno-Iniciativa privada	Se ha informado que California está en el proceso de desarrollar una regulación para la gestión de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil entre sus fronteras, sin embargo, se deben seguir muchos pasos antes de hacer cumplir esta regulación.
México	LGPGIR y su reglamento	Únicamente se encuentran listados de manera general, residuos tecnológicos provenientes de las industrias de la informática, fabricantes de productos electrónicos o de vehículos automotores y otros que, al transcurrir su vida útil, por sus características, requieren de un manejo específico. sin ningún tipo de regulación para manejo específico

Las tecnologías de reciclaje para paneles fotovoltaicos ya se han investigado durante los últimos años (Wade et al. 2016). Empresas como First Solar y SolarWorld, han construido las primeras plantas comerciales de reciclaje para módulos de película

delgada y módulos c-Si respectivamente, ambas compañías son miembros del PV CYCLE (Kannan and Vakeesan 2016). Esta asociación fue fundada en 2007 con el objetivo de hacer que la industria fotovoltaica sea “doblemente verde” mediante la implementación de la recuperación voluntaria y el reciclaje de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil. Junto con los socios del proyecto, como empresas de fabricación de PV, institutos de investigación, compañías mineras y agencias gubernamentales PV CYCLE apoya las actividades I+D para llevar a cabo una investigación en profundidad en el reciclaje de módulos fotovoltaicos. Por ejemplo, en Europa hay algunas iniciativas de investigación para el desarrollo y mejora de diferentes tecnologías de reciclaje fotovoltaico (Samal Bex 2016). FRELP - Recuperación completa de energía fotovoltaica al final de su vida útil), que prueba y desarrolla métodos innovadores que pueden permitir la recuperación de alto valor de materiales y energía de una manera viable y económica (Latunussa et al. 2016). PV Morefe es un Dispositivo de reciclaje móvil de paneles fotovoltaicos centrado en el desarrollo e industrialización de una planta móvil patentada para el reciclaje de módulos fotovoltaicos destinados a la recuperación de materias primas y energía que funcionan con un proceso mecánico innovador(Sica et al. 2018). CU-PV: consiste en módulos fotovoltaicos sensibles cuna-a-cuna, que buscan la reducción de plata en la tecnología de PV de silicio a través de nuevos métodos de metalización. Además, se han desarrollado varias tecnologías de reciclaje en todo el mundo de forma experimental, algunas de ellas patentadas y otras están a escala piloto, los detalles técnicos se pueden consultar en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2: Diferentes procesos de reciclaje de paneles fotovoltaicos.

Referencia	Tecnología de proceso de reciclaje
(Frisson et al. 2000)	“Recent improvements in industrial PV module recycling”.
(Doi et al. 2001)	“Experimental study on PV module recycling with organic solvent method”.
(Klugmann-Radziemska et al. 2010)	“Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules”.
(Fthenakis, Wang, and Kim 2009)	“Experimental Validation of Crystalline Silicon Solar Cells Recycling by Thermal and Chemical Methods”.
(Wang, Hsiao, and Du 2012)	“Recycling of materials from silicon base solar cell module”.

(Kang et al. 2012)	“Experimental Investigations for Recycling of Silicon and Glass from Waste Photovoltaic Modules”.
--------------------	---

Diversos investigadores hicieron análisis de reciclaje de paneles fotovoltaicos usando diferentes herramientas como análisis ambiental, económico, social entre otros. (Fthenakis, Wang, and Kim 2009) hizo análisis de ciclo de vida del inventario para la producción de metales usados en la fabricación de paneles fotovoltaicos (Zn, Cu) simultáneamente definieron las rutas de producción de otros metales como Cd, Ge, In, Mo, Se y Te, también utilizados en la producción de paneles fotovoltaicos. En su trabajo (Goe and Gaustad 2014) hicieron un análisis de tiempo de recuperación de energía considerando reciclaje de paneles fotovoltaicos. (Chowdhury et al. 2020) hicieron una revisión sobre las condiciones actuales del reciclaje de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil, además de estimar que según las proyecciones de crecimiento de producción fotovoltaica mundialmente, sus residuos podrían ser de alrededor de 78 millones de toneladas en el 2050. (Ardente, Latunussa, and Blengini 2019) analizan el rendimiento de diferentes técnicas de reciclaje de paneles fotovoltaicos con silicio cristalino con una perspectiva de ciclo de vida, además del beneficio ambiental de las materias primas recuperadas. (Fu, Liu, and Yuan 2015) llevaron a cabo un estudio de análisis de ciclo de vida de un sistema fotovoltaico con silicio policristalino considerando a demanda de energía primaria, el tiempo de recuperación de la energía (EPBT) y los impactos ambientales en diferentes categorías de impacto, además de incluir detalladamente los procesos de extracción de materiales y producción de células solares de silicio.

También existen trabajos de investigación que incluyen análisis económicos relacionados al reciclaje de paneles solares. Por ejemplo, los autores (Goe and Gaustad 2014) analizaron el tiempo de recuperación de energía (EPBT) de los materiales fotovoltaicos cuando se recicla y las condiciones de reciclaje bajo las cuales se obtienen mejores resultados. Sus resultados mostraron que se obtienen mayores ahorros de EPBT para reciclaje de módulos de baja eficiencia. Los autores, (Deng et al. 2019) presentan un análisis tecno-económico revisando la tecnología de reciclaje más avanzada y la asocian con una evaluación económica cuantitativa para desglosar

una estructura de costos. (Mathur, Singh, and Sutherland 2020) proponen una circularización de la industria fotovoltaica mediante la aplicación de simbiosis de ciclo de vida, esto mediante la identificación de flujo de residuos con valor como materia prima y el desarrollo de interacciones económicas entre diversas organizaciones. (Mahmoudi, Huda, and Behnia 2020) su estudio realiza una evaluación inclusiva de análisis de ciclo de vida y análisis de viabilidad económica para los residuos de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil.

En el aspecto social, la investigación que se relaciona con análisis de ciclo de vida de paneles fotovoltaicos no es tan extensa, aunque (McDonald and Pearce 2010) analizan la responsabilidad del productor y el reciclaje de paneles, al mismo tiempo examinan la necesidad de políticas de reciclaje utilizando protocolos de reciclaje existentes para los principales tipos de productos comercializados. En este trabajo se descubrió que la motivación económica para reciclar la mayoría de módulos fotovoltaicos son desfavorables sin políticas apropiadas, por lo tanto muestran la necesidad de establecer políticas adecuadas en el sector energético y medioambiental. (Dubey, Jadhav, and Zakirova 2013) evalúan los Impactos socioeconómicos y ambientales de las tecnologías fotovoltaicas basadas en silicio con una perspectiva de ciclo de vida, el agotamiento de materiales implicados en su fabricación y el posible impacto en la salud de las personas involucradas en la fabricación de células solares debidos al uso de sustancias tóxicas-inflamables, muestran los posibles beneficios y las dificultades durante el proceso.

Aunque, se encuentran disponibles muchos estudios relacionados con los impactos ambientales del reciclaje fotovoltaico (Ardente, Latunussa, and Blengini 2019; Bogacka, Pikoń, and Landrat 2017; Chung et al. 2021; Contreras Lisperguer et al. 2020; Cyrs et al. 2014; Klugmann-Radziemska and Kuczyńska-Łażewska 2020; Maani et al. 2020; Vellini, Gambini, and Prattella 2017; Venkatachary et al. 2020), también existen algunas relacionadas con sus impactos económicos (Dias et al. 2021; Liu, Zhang, and Wang 2020; Mahmoudi, Huda, and Behnia 2020). Sin embargo, este problema multidimensional necesita que se analicen las cuatro dimensiones de sostenibilidad para un caso particular y tal investigación que combina dimensiones

sociales, políticas, económicas y ambientales implementadas para una región "vulnerable a las energías renovables" nunca se reporta en la literatura.

1.3. Planteamiento del problema

En el año 2018 la producción de energía eléctrica por fuentes renovables fue de 1.87×10^6 MWh (7.29% del total de energía producida) (Beltrán et al. 2018). Es sabido que en México existe un enorme potencial de generación de energía fotovoltaica entre 5.5 kWh/m^2 y 10 kWh/m^2 por día. La Figura 1.1 muestra el incremento en la instalación de proyectos fotovoltaicos así como su panorama a 2030. Como se mencionó anteriormente, la solar fotovoltaica es la tecnología que más ha crecido lo que representa una enorme cantidad de módulos fotovoltaicos instalados, que en los próximos 20-30 años conformarán residuos fotovoltaicos. Esto nos lleva a pensar en un plan de manejo del gran volumen que se genere, además de que estos contienen metales preciosos como oro, plata, telurio, indio, galio, etc., materiales valiosos que podrían convertirse en materia útil si se llegara a emplear una técnica de reciclaje. Esto reduciría un extenso volumen de material que iría a parar a rellenos sanitarios y podría generar empleos que apoyaran a la economía local, haciendo mucho más sustentable el uso de paneles fotovoltaicos.



Figura 1.1: Resumen de la capacidad fotovoltaica acumulada instalada en México y proyecciones 2016–2030 (Domínguez and Geyer 2017a).

Como se mencionó con anterioridad, el reciclaje de paneles fotovoltaicos en México aún no es llevado a cabo a escala comercial, y de acuerdo con la literatura consultada las pruebas que se realizan no han llegado a pasar de laboratorios, sin embargo, en el presente trabajo, se pretende evaluar la sustentabilidad del reciclaje de manera ambiental, económica y social en el estado de Yucatán. De acuerdo al Centro Nacional de Control de la Energía (CENACE), Yucatán en conjunto con los estados de Coahuila, Aguascalientes, Sonora, San Luis Potosí y Chihuahua, representarán el 93% la nueva capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en México y Yucatán tendría 318 MW instalados, lo que de acuerdo con (Domínguez and Geyer 2017b) representaría 1,274,441 módulos fotovoltaicos. Estos módulos, que en los próximos 25-30 años terminarían su vida útil y materiales valiosos serán descartados si estos residuos no se manejan adecuadamente. Los residuos de paneles fotovoltaicos incluyen materiales críticos de acuerdo con la Unión Europea y al Departamento de Energía de los Estados Unidos. En la Figura 1.2 se visualizan estos materiales y el porcentaje de composición en el panel fotovoltaico.

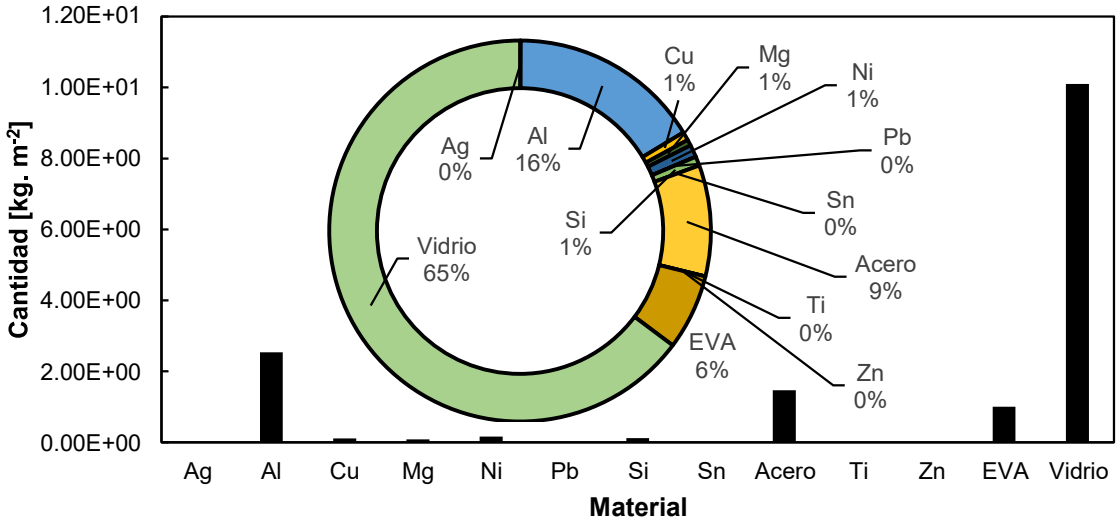


Figura 1.2: Porcentaje por componente de un panel fotovoltaico de c-Si. Figura elaborada por los autores, en base a la referencia (Domínguez and Geyer 2017a).

Es importante resaltar que el estado de Yucatán cuenta con una ubicación privilegiada para la explotación de energía fotovoltaica con alrededor de 5.5 kWh/m² (Figura 1.3) por día lo que aunado a las condiciones climáticas de la zona ha favorecido el desarrollo de proyectos fotovoltaicos y la creación de empresas en el rubro.

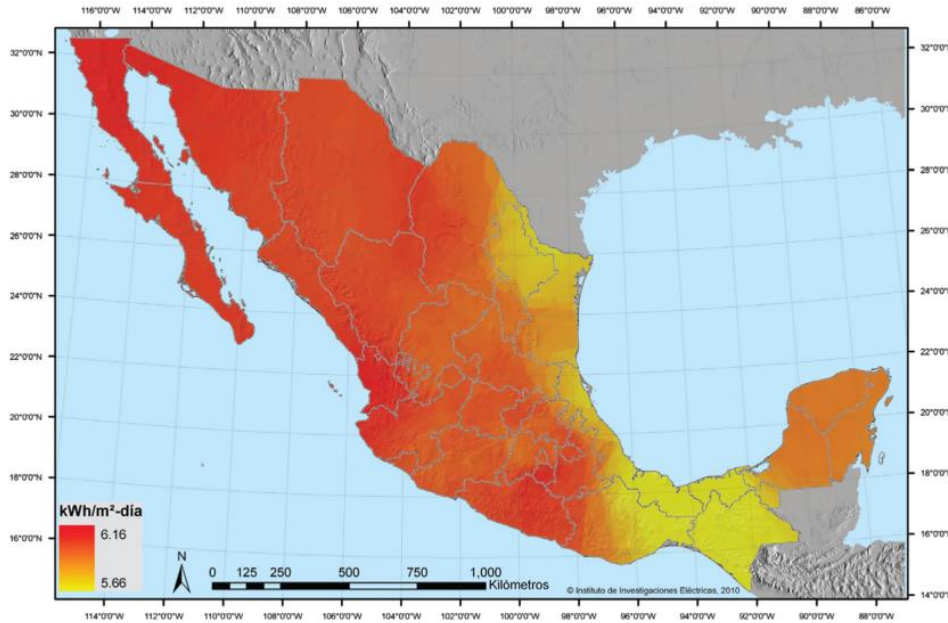


Figura 1.3: Distribución de radiación solar promedio de México (Instituto de Investigaciones Eléctricas y SENER).

Actualmente en Yucatán opera un extenso número de empresas dedicadas a la fabricación, venta y/o instalación de paneles fotovoltaicos, en la Tabla 1.3 se muestran algunas de ellas.

Tabla 1.3: Empresas dedicadas a la fabricación, Venta y/o instalación de paneles fotovoltaicos en el estado de Yucatán.

Empresas dedicadas a la venta/instalación de paneles	Descripción	Sitio Web
YAAXTEC - Paneles solares en Mérida, Yucatán.	Instalación de Paneles Solares y sistemas fotovoltaicos en Mérida	http://www.yaaxtec.com/
Airhaus S de RL de CV - Aires Acondicionados y Paneles Solares	Empresa especializada en paneles solares en Mérida, Monterrey y Cancún,	https://www.airhaus.com.mx/

Habitec - Paneles Solares en Mérida	Venta, instalación e integración de sistemas de energía solar	http://habitec.mx/
Respa Solar	Desarrollo e instalación de sistemas fotovoltaicos	http://respasolar.com/
Perfect Home Paneles Solares	Venta, diseño e instalación de paneles solares certificados.	https://perfecthome.mx/
Paneles Solares en Mérida - Abstract Energy	Venta, renta e instalación de paneles solares	https://abstract.energy/
Solarsol	fábrica de paneles solares mexicana	https://www.solarsol.mx/
Grupo visolar	Venta e instalación de paneles solares	http://grupovisolar.com.mx/
Ecocentro	Proveedor de equipos de energía solar	https://ecocentro.mx/
Energía solar del sureste	Venta e instalación de paneles solares	https://solaresdelsureste.com/

El objetivo de esta investigación es llenar este vacío de literatura a través de una evaluación integral, multidimensional y transnacional que combine las dimensiones ambiental, económica, social y política para justificar la sustentabilidad de la industria solar fotovoltaica a través del reciclaje al final de su vida útil. La investigación se aplica al contexto de Yucatán, México, que es una zona con una importancia significativa para el conjunto de problemas propuesto debido a que la ubicación del sujeto tiene una cantidad considerablemente grande de recurso de energía solar (irradiación horizontal global de $\sim 5.6 \text{ kWh.m}^{-2}$ diaria y un potencial de energía fotovoltaica de $\sim 4.2 \text{ kWh/kWp}$ (ESMAP et al. 2019); cuenta con la presencia de comunidades indígenas mayas; tiene más de una docena de sitios del patrimonio de la UNESCO; tiene una inmensa diversidad biológica (1341 especies de plantas de vertebrados e invertebrados, 102 especies de plantas compuestas, 343 especies de aves, 51 especies de mamíferos terrestres y 7 especies de mamíferos marinos (Creel et al. 2000)); tiene una de las tasas de instalación de paneles solares más altas del país; y carecen de cualquier tipo de estándar, ley o regulación para manejar el final de la vida útil de los paneles solares. Esto lleva la ubicación del sujeto a un sitio vulnerable para el conjunto propuesto de problemas y condiciones. Este estudio es también una

muestra ejemplar para América Latina y otros países subdesarrollados que están viviendo una situación similar, y refleja la validez transnacional y transcontinental de esta metodología. Por lo tanto, en esta investigación, de manera metodológica, se realiza una evaluación multidimensional de la alternativa de residuos fotovoltaicos en la que se reporta un análisis ambiental y económico del ciclo de vida junto con la aceptabilidad social para el contexto de Yucatán, México.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la sustentabilidad que incluya los actores ambientales, económicos y sociales de los impactos genera reciclaje de paneles fotovoltaicos para el contexto actual de Yucatán.

1.4.1. Objetivos específicos

- a. Llevar a cabo un análisis de ciclo de vida para conocer los impactos ambientales de paneles fotovoltaicos con y sin reciclaje, en base a los resultados e identificar los indicadores ambientales afectados y comparar cada uno en las dos opciones de análisis
- b. Hacer un análisis económico de ciclo de vida para calcular el costo nivelado incluyendo inversiones de los costos durante la vida útil del panel fotovoltaico, considerando costo inicial, mantenimiento y cambios de equipos, costo al fin de la vida útil con y sin reciclaje, con la finalidad de conocer la viabilidad económica del reciclaje de paneles fotovoltaicos en el contexto de Yucatán
- c. Conocer la opinión pública del gobierno, empresas y sociedad de Yucatán sobre el reciclaje de paneles fotovoltaicos, así como su compromiso con el reciclaje.
- d. Unir los resultados obtenidos en los aspectos ambiental, económico y social evaluando así la sustentabilidad de los paneles fotovoltaicos con y sin reciclaje.

1.5. Justificación

- a. Al ser una tecnología en constante crecimiento y siendo Yucatán un sitio con excelentes características para la instalación de proyectos fotovoltaicos, es importante conocer el panorama ambiental y los impactos que se pueden generar por el uso de los paneles fotovoltaicos, esto puede tener implicaciones sociales ya que los impactos ambientales suelen derivar en afectaciones a la población del sitio.
- b. El aspecto económico siempre desempeña un factor importante en la toma de decisiones, por lo que el análisis de ciclo de vida económico es fundamental para estimar el costo beneficio del reciclaje, y conocer de igual manera el costo de la disposición final de los paneles sin ningún tipo de tratamiento posterior al fin de su vida útil.
- c. Existe una brecha de conocimiento sobre los impactos que las instalaciones y el reciclaje de paneles fotovoltaicos genera sobre la sociedad, se ha investigado sobre los aspectos técnicos pero el ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos es largo y al ser una tecnología relativamente joven los impactos sociales pueden ser difíciles de medir, al realizar este trabajo se colabora en la investigación que integre los aspectos ambiental, económico y social.

1.6. Marco metodológico

La ruta metodológica es integral, es decir que incluye aspecto ambiental, económico y social del reciclaje de paneles fotovoltaicos (ver Figura 1.4). Consiste en diversas etapas dirigidas a evaluar los impactos económicos y ambientales a lo largo del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos delimitando su alcance y describiendo detalladamente las consideraciones pertinentes, igualmente busca evaluar la aceptación de los diferentes actores de la sociedad (Usuarios, Industria y Gobierno).

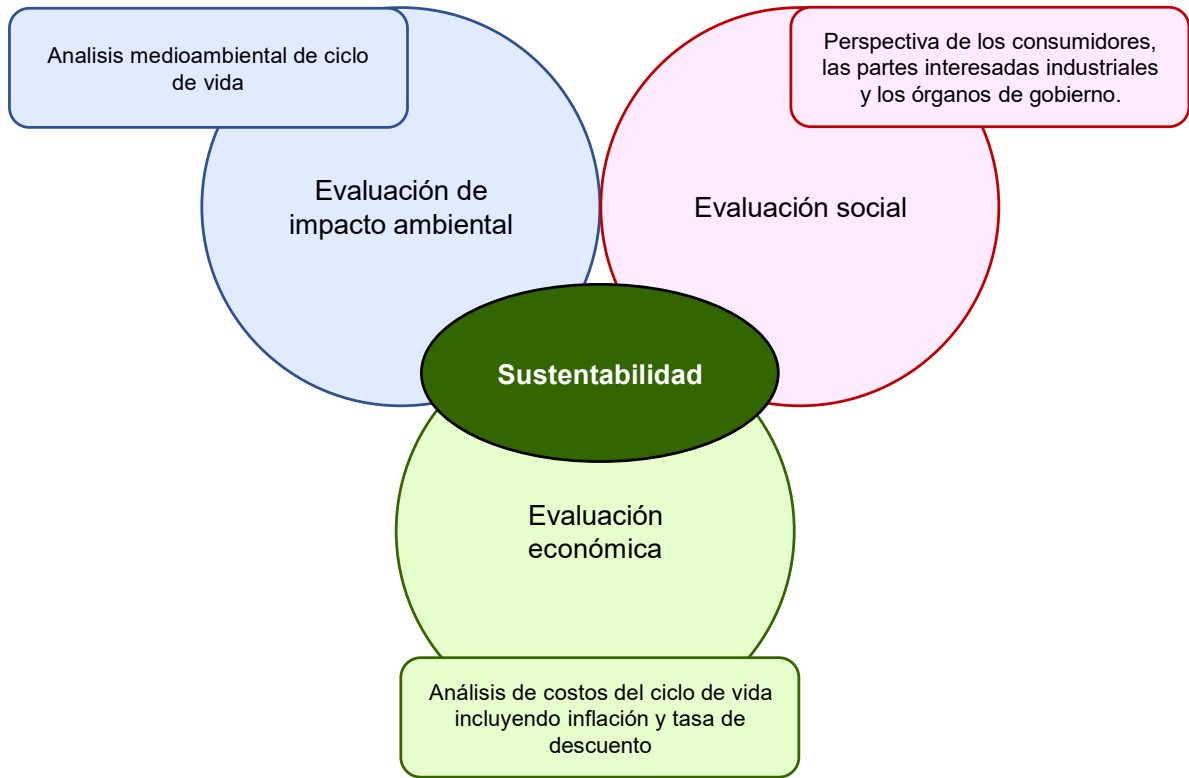


Figura 1.4: Integración de evaluación Ambiental, Económica y Social y herramientas empleadas

CAPÍTULO 2

2. MÉTODO

2.1. Metodología integrada multidisciplinar y multidimensional adaptada para la evaluación de la sustentabilidad

La secuencia metodológica de este trabajo discute los conceptos básicos del desarrollo sustentable, hacia la formulación del problema, la identificación de lagunas de la literatura, la dimensión de análisis, y concluye con el acoplamiento y profundidad de análisis como se muestra en la Figura 2.1.

La evaluación ambiental se implementa a través de un enfoque de ciclo de vida que consta de los pasos de alcance, objetivos, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación. La evaluación económica también se basa en el enfoque del ciclo de vida en el que se calculan el costo inicial, el costo operativo, el costo de mantenimiento, el costo de reemplazo del equipo y los costos al final de la vida útil. Tanto la evaluación medioambiental como económica se realiza para un panel fotovoltaico sin ningún tipo de reciclaje, y un panel fotovoltaico con una técnica de reciclaje. A esto le sigue una encuesta social de la población muestreada de Yucatán para comprender la perspectiva de los diferentes interesados. Los detalles específicos de cada sección se detallan en las próximas secciones.

1 Conceptos básicos

2 Planteamiento del problema

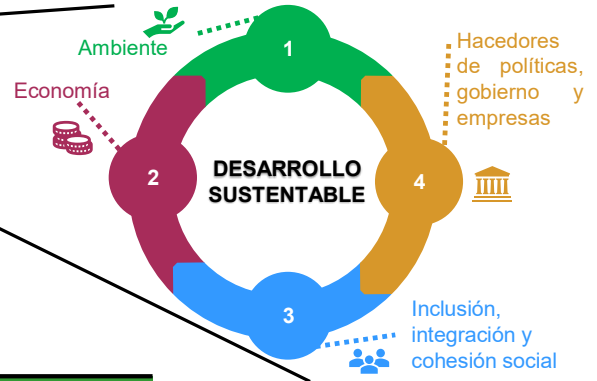
El mundo está adoptando la tecnología de paneles solares que alcanzarían una capacidad de potencia instalada total de 8519 GW proyectada para el año 2050 (IRENA, 2019). Esta historia de éxito tiene un lado algo oscuro porque también traería una gran cantidad de desechos de paneles solares. En consecuencia, es la necesidad del momento implementar estándares, normas y leyes sobre la reutilización y reciclaje de paneles solares con un acuerdo entre los grupos de interés de la sociedad.

3 Brecha de literatura

Investigación	¿Evaluación de impacto ambiental?	¿Evaluación económica?	¿Evaluación social?
(Pablo Dias et al., 2021)	✓	✓	×
(M.L. Parisi et al., 2020)	✓	×	×
(Caijie Liu et al., 2020)	×	✓	×
(Sajjad Mahmoudi et al., 2020)	✓	✓	×
(Federica Cucchiella et al., 2020)	×	✓	×
(Rong Deng et al., 2020)	×	✓	×
(Thomas Maani et al., 2020)	✓	×	×
(Rubén Contreras Lisperguer et al., 2020)	✓	×	×
Este trabajo	✓	✓	✓

Explicación :

Este trabajo aborda una discusión filosófica sobre las diversas posibilidades de fortalecer aún más el desarrollo sustentable de los productos y la industria de los paneles solares. Esta discusión se aplica al contexto de Yucatán, México considerando el reciclaje de los paneles fotovoltaicos. La contribución científica de este trabajo es proponer evaluaciones ambientales, económicas y sociales de la viabilidad del reciclaje de paneles solares, y estas dimensiones correlacionadas nunca se discuten juntas en la literatura..



4 Dimensiones de análisis

Evaluación de impacto ambiental

Life cycle approach is adapted here consisting of:

- 1 Alcance y objetivos del estudio
- 2 Análisis de inventario (Referenciado de (Fu, Liu y Yuan, 2015) y (Latunussa, Ardenne, Blengini y Mancini, 2016))
- 3 Evaluación de impacto (Método: ILCD 2011 Midpoint +)
- 4 Interpretación

Evaluación económica

El enfoque del ciclo de vida también se adapta aquí, y los siguientes indicadores son de evaluación:

- 1 Coste del ciclo de vida
- 2 Periodo de amortización
- 3 Costo nivelado de la electricidad (LCoE)

Detalles de la ubicación del sujeto, el estado de Yucatán, México

1. Ubicación (longitud, latitud)
2. Características económicas (inflación, tasa de descuento, etc.),
3. Condiciones climáticas (temperatura, radiación solar, velocidad del viento, etc.)



Categorías de evaluación del método: ILCD 2011 Midpoint+

Categoría de impact	Unidad
Cambio climático	kg CO ₂ eq
El agotamiento del ozono	kg CFC-11 eq
Toxicidad humana, efectos cancerígenos	CTUh
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos	CTUh
Materia particulada	kg PM _{2.5} eq
Radiación ionizante HH	kBq U235 eq
Radiación ionizante E (provisional)	CTUe
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq
Acidificación	molc H+ eq
Eutrofización terrestre	molc N eq
Eutrofización de agua dulce	kg P eq
Eutrofización marina	kg N eq
Ecotoxicidad del agua dulce	CTUe
Uso del suelo	kg C deficit
Agotamiento de los recursos hídricos	m ³ water eq
Agotamiento de recursos	kg Sb eq

Características del panel solar

1. Factor de temperatura,
2. Potencia nominal,
3. Temperatura nominal de la celda operativa,
4. Ángulo de inclinación,
5. Eficiencia, etc.

Características del sol

1. Día del año
2. Hora del día
3. Latitud
4. Irradiancia, etc.



Hallazgos

1. Costos del ciclo de vida,



1. Distribución de costos



(Continúa en la siguiente página.)

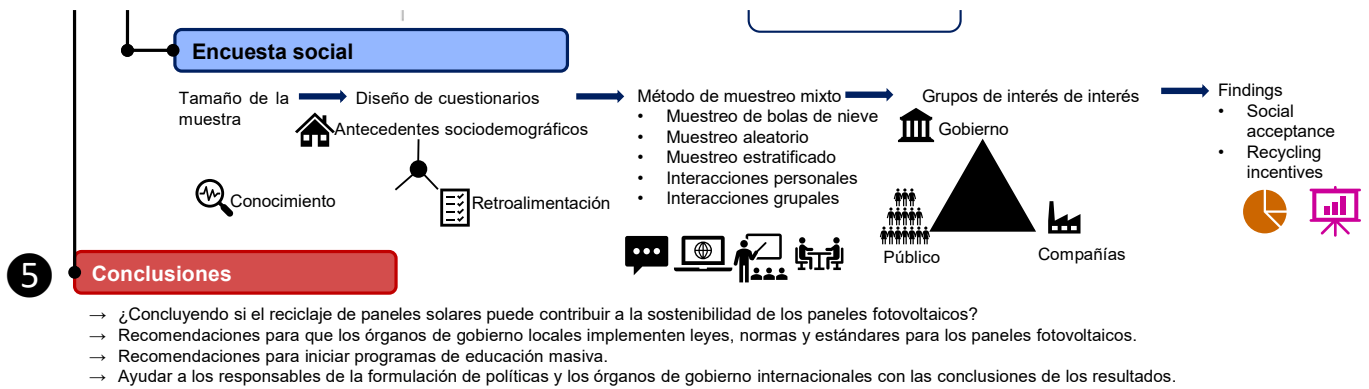


Figura 2.1: Metodología global adaptada en el trabajo destacando las distintas etapas de la investigación. Nota: Las referencias utilizadas en esta figura son las siguientes: (Contreras Lisperguer et al. 2020; Cucchiella, D’Adamo, and Rosa 2015; Deng et al. 2019; Dias et al. 2021; IRENA 2018; Liu, Zhang, and Wang 2020; Maani et al. 2020; Mahmoudi, Huda, and Behnia 2020; Parisi et al. 2020)

2.2. Evaluación ambiental del ciclo de vida

El ACV es comúnmente empleado para la toma de decisiones, con base a esto, es importante crear la coherencia necesaria para que estas decisiones se tomen de la manera más eficaz posible, por lo tanto, se crearon estándares por la International Organization for Standardization (ISO), específicamente la ISO 14040 y 14044, preparadas por el comité técnico ISO TC/ 207, *Gestión Ambiental*, Subcomité SC 5, *Análisis del ciclo de vida*, ambas normas definen cuatro etapas que componen el ACV

- ① definición de objetivo y alcance – para aclarar lo que el estudio pretende analizar
- ② la fase de inventario – donde se cuantifican las actividades del ciclo de vida y sus entradas (recursos consumidos) y salidas (emisiones),
- ③ evaluación de impacto para asignar esas entradas y salidas a medidas del daño ambiental y
- ④ interpretación- donde los resultados son evaluados y se desarrollan recomendaciones.

2.2.1. Objetivo y alcance del Análisis de Ciclo de Vida Ambiental

Como se mencionó en secciones anteriores, el objetivo principal es conocer las afectaciones ambientales del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos en el contexto de Yucatán con y sin el reciclaje

2.2.2. Inventario

El inventario para el caso con y sin reciclaje se tomó en base a investigaciones existentes (Ardente, Latunussa, and Blengini 2019) y (Fu, Liu, and Yuan 2015).

En la Fig. 2.2, se presenta un esquema que muestra de manera general las etapas consideradas para la realización del inventario de ciclo de vida para cada caso. En cuanto al caso con reciclaje, de igual forma se presenta la empresa desarrolladora y el proyecto al que corresponde. Para el primer ciclo, en el que no se considera reciclaje, se incluyen las etapas de fundición de silicio metalúrgico, su purificación a grado solar, la formación de lingotes, el corte de obleas de silicio, el procesamiento celular, el ensamblaje de módulos, la instalación y finalmente el fin de vida en la que se considera su disposición como residuo, las cuales se encuentran descritas a mayor profundidad en (Fu, Liu, and Yuan 2015). Por otra parte, para el proceso con consideración de reciclaje, a partir de la etapa de instalación se considera un proceso adicional que empieza después del fin de vida en el que los paneles fotovoltaicos son reciclados mediante el proceso FRELP, que se puede visualizar en la figura 2.3.

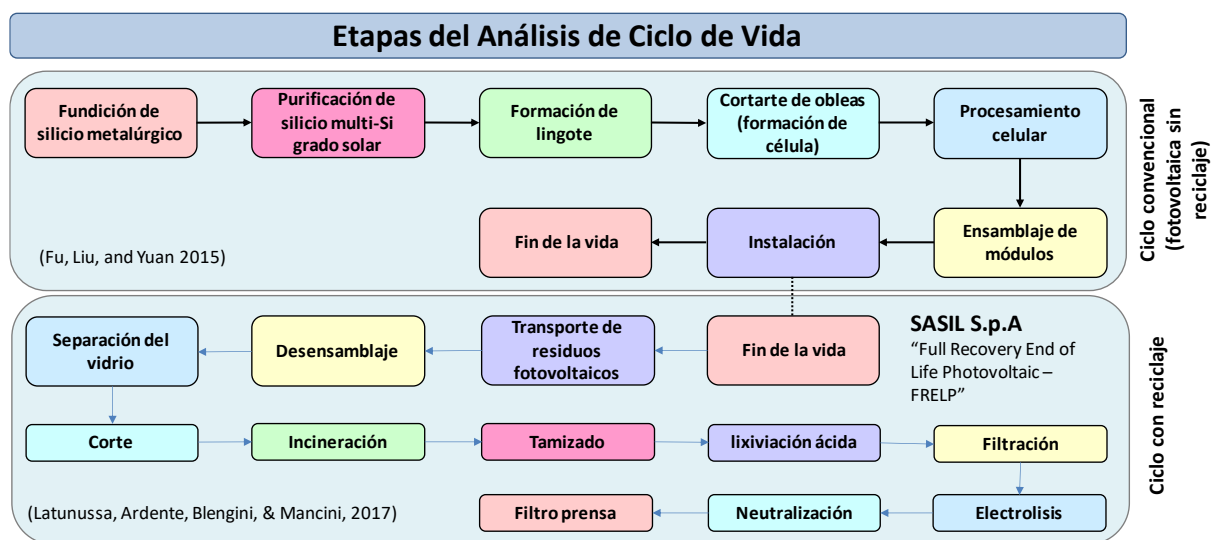


Figura 2.2: Etapas del ACV sin reciclaje y con reciclaje (Ardente, Latunussa, and Blengini 2019) y (Fu, Liu, and Yuan 2015).

En la Fig. 2.3 se muestran las etapas consideradas para el ACV con reciclaje. Se trata de un método empleado en el proyecto Full Recovery End of Life Photovoltaic –

FRELFP, desarrollado por la empresa italiana SASIL S.p.A., la cual trabajó durante cuatro años para probar y demostrar la aplicación de tecnologías innovadoras para el reciclaje integral de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil, mono y policristalinos, de una manera económica y viable.

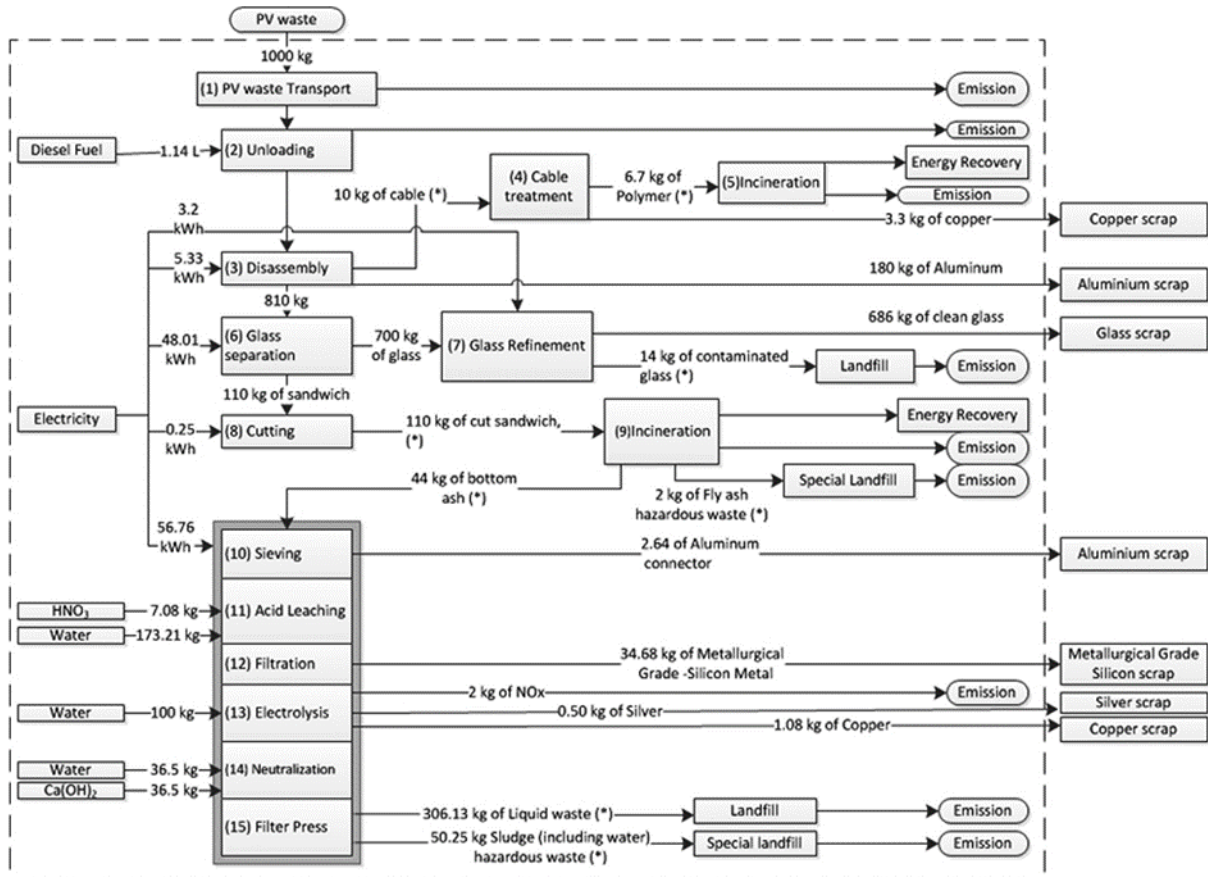


Figura 2.3: Resumen de entradas y salidas del proceso “FRELFP” para el reciclaje de 1000 kg de paneles de residuos fotovoltaicos de silicio (Ardente, Latunussa, and Blengini 2019).

2.3 Evaluación de impacto

De acuerdo con la norma ISO-14040 y la ISO-14044, uno de los elementos obligatorios en toda evaluación del ciclo de vida (ECV) es "la selección de las categorías de impacto, de los indicadores de categoría y de los modelos de caracterización". Siguiendo las indicaciones de dicha norma, la mayor parte de los estudios de ACV seleccionan categorías de impacto, indicadores de categoría o modelos de

caracterización ya existentes. La Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (LCIA) ha sido modelado con el software SimaPro versión 8.0 (Pré consultants, 2014) Las categorías seleccionadas, fueron las de MIDPOINT recomendadas por el Manual de la ILCD (Tobergte and Curtis 2013).

2.3. Análisis de Ciclo de Vida Económico

En la evaluación del costo del ciclo de vida, se evalúan indicadores como el costo nivelado de la electricidad (LCoE), el costo del ciclo de vida y el período de recuperación. La LCoE se evalúa considerando el costo del ciclo de vida durante el tiempo de vida, dado por:

$$LCoE = \frac{\text{Valor presente del costo capital} \times \text{Factor de recuperación de capital}}{\sum_{dia=1}^{365} P_a} \quad (2.1)$$

Donde,

$$\begin{aligned} \text{Valor presente del costo capital} = & -\text{Costo inicial} - \text{Costo de O\&M} \\ & - \text{Costo de remplazo} \pm \text{Costo de Fin de Vida} \end{aligned} \quad (2.2)$$

El factor de recuperación de capital está dado por (Tripathy, Joshi, and Panda 2017)

$$FRC = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \quad (2.3)$$

El numerador de la ecuación (2.1) convierte el costo de ciclo de vida en su costo anual total.

El costo del ciclo de vida, para ambos casos, consiste en un costo inicial, costo de energía, costo de operación y mantenimiento (O&M), costo de reemplazo del equipo y costo al final de la vida útil. El balance económico de estos costos a lo largo de la vida se presenta en ecuación, como sigue.

$$\begin{aligned} \text{Costo de ciclo de vida} = & -\text{Costo inicial} + \text{Costo de energía} - \text{Costo de O\&M} \\ & - \text{Costo de remplazo} \pm \text{Costo de fin de vida} \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.3.1. Estimación de costos individuales

Los costos individuales involucrados en el análisis de costos del ciclo de vida se dan a continuación:

1. El costo inicial se calcula considerando varios gastos que involucran desde el costo de asignación del terreno hasta el costo de instalación que se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Descripción del costo inicial.

No.	Concepto	Precio [MXN]	Descripción
1	Costo de asignación de tierras	\$3,000.00	Un coste de penalización correspondiente al uso permanente del terreno para la instalación de paneles fotovoltaicos.
2	Costo por preparación del sitio	\$800.00	Costo involucrado en la preparación del terreno para instalar los paneles fotovoltaicos, es decir, quitar árboles y plantas, etc. cercanos para dedicar el terreno al panel fotovoltaico.
3	Panel fotovoltaico	\$7,000.00	El precio unitario reducido de la unidad fotovoltaica y el inversor (considerando una relación de matriz a inversor de 1.20) (PerfectHome Solar Panels 2020).
4	Inversor	\$1,600.00	El precio se reduce para el uso con un solo panel fotovoltaico (PerfectHome Solar Panels 2020).
5	Marco de montaje	\$800.00	Cotizado con un fabricante local.
6	Tornillos, tuercas y pernos	\$300.00	Cotizado con un fabricante local.
7	Base de cemento	\$200.00	Debido a las fuertes ráfagas de viento en Yucatán, una práctica común es incluir una base cementada del marco de montaje.
8	Cables	\$600.00	Cotizado con un fabricante local.
9	Rompedores de circuito	\$600.00	Para las conexiones del panel fotovoltaico.
10	Costo de transporte	\$300.00	Cotizado por un transportista local.
11	Gastos generales y parasitarios	\$500.00	Ajusta los costos que pueden resultar en daños y/o fallas de cualquier pieza, y también puede arreglar los costos faltantes.
12	Ajuste del medidor	\$500.00	Ajustes realizados en el contador de facturación para tener una conexión a red de paneles fotovoltaicos.
13	Costo de instalación	\$800.00	También considera los costes por trabajador.

Costo inicial	\$17,000.00
---------------	-------------

2. El costo de energía se calculó usando la potencia de salida (kWh) y la tarifa de la región dada por:

$$\text{Costo de energía} = \text{Tarifa de la zona} \times \text{Potencia de salida anual} \quad (2.5)$$

La tarifa es 3.414 MXN/kWh, correspondiente al promedio anual de la demanda industrial a pequeña escala en la región de menor tensión (PDBT) (CFE (Comision Federal de Electricidad) 2018). La potencia de salida real (P_a) se calcula considerando la temperatura de operación (T_{PV}) del panel fotovoltaico utilizando la relación:

$$P_a = P_{th} (1 - Br(T_{PV} - T_{ref})) \quad (2.6)$$

donde Br y T_{ref} son el coeficiente de temperatura y la temperatura de referencia y sus valores son $0.0041 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, y 25°C , respectivamente (Tariq et al. 2020). La potencia nominal de los paneles fotovoltaicos es 335 W (PerfectHome Solar Panels 2020). La temperatura de funcionamiento se calcula considerando las condiciones climáticas dadas por la fórmula:

$$T_{PV} = T_{air} + \frac{NOCT - 20}{800} \times I_T \quad (2.7)$$

donde NOCT es la temperatura de funcionamiento nominal de la celda que es 45°C (PV module data sheet of N-1J130 Kaneka Belgium N.V. Germany 2018), T_{air} es la temperatura del aire ambiente (ver Figura 2.4) y I_T es la radiación total en la superficie inclinada de un panel fotovoltaico. Se calcula utilizando el modelo difuso isotrópico (Duffie, John A. 2013):

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.8)$$

En esta ecuación, I_b y I_d son la radiación directa y la radiación difusa, β es el ángulo de inclinación del panel fotovoltaico. El ángulo de inclinación se calcula utilizando (Charles R. 2017)

$$\beta = 0.87 \times \phi \quad (2.9)$$

Esta ecuación es válida para una superficie de pendiente constante con orientación sur existente en el hemisferio norte, y ϕ es el ángulo de latitud igual a 20.9674° para la ciudad de Mérida, Yucatán, ρ_g es la reflectancia del suelo que es igual a 0.6, y R_b es el ángulo de inclinación dado por la fórmula (Duffie, John A. 2013):

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (2.10)$$

En esta ecuación, δ y ω son el ángulo de declinación de la tierra y el ángulo horario dado por (Duffie, John A. 2013):

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + \text{Día del año}) \right] \quad (2.11)$$

$$\omega = 0.15 \times (\text{hora local} - \text{medio día solar}) \quad (2.12)$$

Este procedimiento se utiliza para calcular el coste energético del panel fotovoltaico al final del primer año de funcionamiento.

3. Estimación del costo durante su vida útil, se utilizan la inflación y una tasa de descuento para convertir los costos futuros en el valor presente. Está dado por:

$$PW = C \frac{(1+i)^{n-1}}{(1+d)^n} \quad (2.13)$$

Donde PW el valor presente del costo capital C , i es la tasa de inflación, d es la tasa de descuento, y n es el año del análisis. La tasa de inflación y la tasa de descuento de Yucatán son 3.86% (un promedio de los últimos 10 años de 2009 a 2019) (Plecher 2020) y 4.5% (INEGI 2014), respectivamente. También se sabe que la capacidad de generación de energía de los paneles fotovoltaicos disminuye con el tiempo. Para incluir este fenómeno, una reducción de potencia de 5%, 10%, and 15% se consideran para el año operativo 6 al 10, 11 al 15, and 16 al 20, (Al-Waeli et al. 2018).

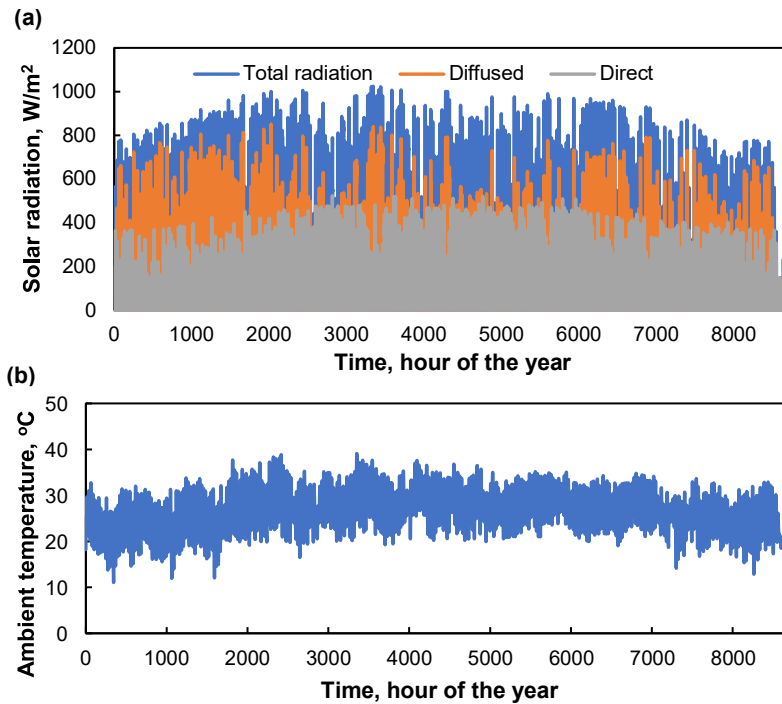


Figura 2.4: Datos de radiación solar y temperatura ambiente del estado de Yucatán. (Klein 2010).

4. El costo de operación y mantenimiento del primer año se considera el 10% del costo del primer año, posteriormente se hace en función de la vida útil utilizando la ecuación (2.13). Por tanto, está dado por:

$$\text{Costo de O\&M} = 10\% \text{ del primer costo anual} \quad (2.14)$$

El primer costo anual se calcula usando:

$$\text{Primer costo anual} = \text{Factor de recuperación de capital} \times \text{Costo inicial} \quad (2.15)$$

Se considera la sustitución del equipo para el inversor cada cinco años. (Tripathy, Joshi, and Panda 2017).

5. El costo de fin de vida para el caso de sin y con la consideración de reciclaje se da en las siguientes ecuaciones. La distribución de costos se presenta en la Tabla 2.2.

[Sin reciclaje]

$$\text{Costo de fin de vida} = + \text{Valor rescatado} - \text{Costo de transporte} - \text{Costo de disposición final} \quad (2.16)$$

$$\text{Costo de disposición final} = \text{Costo de relleno sanitario (Residuos sólidos)} + \text{Costo por residuos peligrosos}$$

[Con reciclaje]

$$\text{Costo de fin de vida} = - \text{Costo de recolección} - \text{Costo de procesamiento} - \text{Costo de disposición final} + \text{Venta de materiales} \\ + \text{Incentivo de reciclaje}$$

$$\text{Costo de procesamiento} = \text{Costo del proceso industrial} + \text{Costo de mano de obra}$$

$$\text{Costo de disposición final} = \text{costo de relleno sanitario (depósitos sólidos y líquidos)} + \text{Costo de residuos peligrosos (costo de plásticos peligrosos, cenizas volantes y lodos)}$$

$$\text{Venta de materiales} = \text{Valor del marco de aluminio} + \text{Valor del vidrio} + \text{Valor del Cobre recuperado} + \text{Valor de la caja de conexiones} + \text{Valor de la Plata recuperada} + \text{Valor del plomo recuperado} + \text{Valor del silicio (silicio de grado solar y celdas intactas)}$$

(2.17)

Tabla 2.2: Estimación del costo del reciclaje al final de la vida útil del panel fotovoltaico.

No.	Tipo de gasto	Costo (MXN)	Referencia
1	Costo de recolección	\$300.00	Estimado por autores para el contexto local.
2	Costo de procesamiento		
(a)	Costo del proceso industrial (remoción del marco)	\$200.00	Estimado por autores para el contexto local
(b)	Costo del proceso industrial ^a	\$600.00	(Deng et al. 2019; McDonald and Pearce 2010)
(c)	Costo de mano de obra	\$300.00	Estimado por autores para el contexto local
3	Costo de disposición final		
(a)	Costo de relleno sanitario (depósitos sólidos y líquidos)	\$2.02	(Chang et al. 2017; Chang, Ho-Baillie, Vak, et al. 2018; Chang, Ho-Baillie, Wenham, et al. 2018; Deng et al. 2019)
(b)	Costo de disposición de residuos peligrosos	\$0.32	(Chang et al. 2017; Chang, Ho-Baillie, Vak, et al. 2018;

			Chang, Ho-Baillie, Wenham, et al. 2018; Deng et al. 2019)
4	Ventas de material		
(a)	Valor del marco de aluminio	\$180.00	Los porcentajes en peso y su valor de reventa se estiman a partir de las siguientes referencias:(J.-K. Choi and Fthenakis 2010; J. K. Choi and Fthenakis 2014; Corcelli et al. 2018; Cucchiella, D'Adamo, and Rosa 2015; D'Adamo, Miliacca, and Rosa 2017; Huang et al. 2017; McDonald and Pearce 2010) (Deng et al. 2019; Lead Price (USD / Kilogram) 2020)
(b)	Valor del vidrio	\$40.04	
(c)	Valor del Cobre recuperado	\$9.41	
(d)	Valor de la caja de conexiones	\$12.80	
(e)	Valor de la plata recuperada	\$159.90	
(f)	Valor del plomo recuperado	\$0.84	
(g)	Valor del silicio (silicio de grado solar y celdas intactas)	\$184.16	
5	Incentivo de reciclaje	\$2,550.00	El incentivo de reciclaje se considera el 15% del costo inicial.
	Coste al final de la vida útil con el reciclaje fotovoltaico	\$1,734.80	

^a Módulo sin marco tratado en planta de reciclaje centralizada.

2.4. Evaluación social

2.4.1. Objetivos

El objetivo de la encuesta social es comprender los conocimientos, actitudes y prácticas (CAP) de diferentes actores de Yucatán, México, hacia las regulaciones de reciclaje de paneles fotovoltaicos. Los resultados del estudio CAP proporcionarían una línea de base y los insumos necesarios para el diseño de un programa efectivo de regulación de reciclaje de energía fotovoltaica. Su éxito depende en gran medida del diseño del cuestionario, el método de muestreo y la interpretación de los resultados.

2.4.2. El diseño del cuestionario

El cuestionario diseñado para la encuesta social consta de tres secciones. La primera sección registra los detalles sociodemográficos y socioeconómicos del encuestado que ayudarían a comprender las características de la muestra. Esta sección constaba de 10 preguntas que requerían sexo, grupo de edad, nivel educativo, lugar de residencia, lugar de residencia, detalles familiares, ingreso familiar mensual, tipo de grupo y pertenencia a una comunidad indígena. La siguiente sección consta de seis preguntas para evaluar el conocimiento del encuestado sobre el desarrollo sostenible y las energías renovables. En este apartado se pregunta si el encuestado es consciente de las diferencias entre las energías renovables y no renovables; conocimiento del protocolo de Kioto, el acuerdo de París y los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas para eliminar la pobreza, la desigualdad y combatir el cambio climático; pregunta si el encuestado cree que es necesario disminuir la huella de carbono y qué sector (público común, empresas o gobierno) es responsable de abordarlo; y si el encuestado piensa que si un tipo específico de energía renovable es mejor para el medio ambiente. Esta sección ayuda a comprender la calidad de la muestra. La tercera sección del cuestionario está relacionada con la encuesta social del problema temático donde se colocan varios tipos de preguntas. Adquiere la información del encuestado si tiene paneles solares instalados en su casa, si existe alguna limitación para instalarlos, si cree que el desperdicio de paneles solares puede causar algún daño ambiental, si les gustaría tomar una iniciativa para abordar los problemas de los residuos de paneles solares, si apoyarían una norma / reglamento para un panel solar, si piensan que una institución en particular es responsable de reciclarlos, si apoyarían para penalizar a los usuarios o industrias que no procederían con el reciclaje de sus paneles solares, si estarían interesados en rastrear el estado de su panel solar si se está reciclando o no, si les gustaría mantener el registro de sus paneles solares que se reciclan, si apoyarían el reciclaje de los paneles solares siempre que se les dé un incentivo adicional, si prefieren comprar los paneles solares a las empresas que certificarían el reciclaje, ¿cuánto costo adicional están dispuestos a pagar? o reciclar el panel solar, ¿qué porcentaje del costo adicional puede provenir de ellos, si necesitan más información y capacitación al respecto, y finalmente, si

piensan que reciclar los paneles solares puede ser socialmente aceptable en el contexto de México?

2.4.3. Técnica de muestreo

El segundo paso de la encuesta social es el método de muestreo. En este paso, la población total se divide en tres grupos, (1) público común, (2) empresas de energía y (3) funcionarios del gobierno. Se aplica un muestreo probabilístico para el primer grupo y se calcula un tamaño de muestra > 300.

El tamaño de la muestra tiene una importancia primordial para incorporar todas las características de la población. Se calcula utilizando la fórmula de población finita (Hu et al., 2017):

$$\text{Tamaño de la muestra} = \frac{\frac{z\text{-score} \times \text{variabilidad}(1 - \text{variabilidad})}{\text{margen de error}^2}}{1 + \frac{z\text{-score} \times \text{variabilidad}(1 - \text{variabilidad})}{\text{margen de error}^2 \times \text{tamaño de la población}}} \quad (2.18)$$

En ecuación, se considera un puntaje z de 1.96 correspondiente a un nivel de confianza del 95%, un margen de error de 0.04, variabilidad de 0.05, un tamaño poblacional de 2,091,500 correspondiente a la población de Yucatán (SEFOET, 2019). Según esta estimación, el tamaño de la muestra se redondea a 300.

Dentro de este grupo, una metodología mixta que combina el muestreo aleatorio simple y el enfoque de muestreo por conglomerados se adapta y aplica a través de un cuestionario en línea y entrevistas directas. Para el muestreo aleatorio se elabora un cuestionario en línea que es respondido por la muestra de respuesta voluntaria y en el caso del muestreo por conglomerados se organizan varios talleres y charlas para que las comunidades rurales extraigan su retroalimentación. En el caso de los otros dos grupos, las empresas de energía y los funcionarios del gobierno, las muestras de bolas de nieve se adaptan para reclutar a los participantes a través de otros participantes.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados del ACV ambiental

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del modelado en SimaPro 8.0 con el método ILCD 2011 Midpoint+ los casos *cradle to grave* de paneles con y sin la consideración del reciclaje al final de su vida útil.

En esta sección se muestran los resultados del modelado del proceso sin consideración del reciclaje (ver figura 3.1). En este caso (Fig. 3.1a) es evidente que la etapa más crítica en todas las 16 categorías de impacto es “Purificación de silicio grado solar”. La generación de Metano (CH_4) y Etano (C_2H_6) durante este proceso provoca un impacto considerable en la categoría de “Disminución de Ozono” al ser considerados como sustancias que agotan la capa de ozono (SAO). También impactan la categoría de “Cambio climático”, junto al Dióxido de carbono (CO_2) debido a sus características de efecto invernadero. Se estima un total de emisiones de 1246 kg CO_2 equivalente en todo el proceso y el 54% corresponde a la etapa de “Purificación de silicio grado solar”. El impacto está influenciado por la alta demanda de energía necesaria para la etapa de purificación de silicio (71% del total de energía necesaria), siendo que en el estado de Yucatán la producción energética se basa principalmente en gas natural (85%), Heavy fuel oil (12.6%) y Diesel (1.8%) (Navarro-Pineda, Handler, and Sacramento-Rivero 2017). Las etapas de “Ensamble de módulos” e “Instalación de paneles” representan el 10% y 13% del impacto total generado en la categoría, cabe mencionar que para las etapas de instalación de paneles se considera el transporte al sitio de instalación, lo que incrementa la generación de gases derivados del proceso de combustión. La etapa de “Fundición de lingotes”, “Fin de vida” y “Corte de obleas”, emiten el 4%, 2% y 1% del total de CO_2 equivalente, el consumo energético es claramente menor con relación a los demás procesos. La segunda etapa de mayor influencia en los impactos es la de “Procesamiento celular”, con un impacto en la

categoría de “Cambio climático” del 15% correspondiente a 189 kg CO₂ equivalente, influenciado también por el consumo de energía. El uso de ácido fosfórico y agua genera la “Eutrofización de agua dulce”, afectando directamente esta categoría de impacto. El uso de agua se relaciona directamente con el incremento en la categoría de “Agotamiento de recursos hídricos”, debido a que en la etapa de “Purificación de silicio grado solar” se usa más del 80% del total de agua necesaria en su ciclo de vida. La categoría de “Toxicidad humana (cancer effects)” se ve principalmente afectada por la etapa de “Corte de obleas” con un 28% del total de afectación, seguida de “Purificación de silicio grado solar” con un 26%, y “Fin de vida” con un 22%, en estas etapas se identifica el uso y emisión directos e indirectos de compuestos cancerígenos, tales como el Benceno C₆H₆, Dioxinas(C₁₂H₄Cl₄O₂), Furano (C₄H₄O) y Cromo VI. En la etapa de “Fin de vida” se presentan procesos de disposición de materiales como residuos, lo que incrementa su relevancia en esta categoría.

En la etapa de “Disminución de ozono”, se presenta un comportamiento similar a la de “Cambio climático” debido a la generación de gases como Metano (CH₄) y el Etano (C₂H₆). La etapa de “Purificación de silicio a grado solar”, tiene una mayor influencia, con un 69% del total de impacto sobre esta categoría, se estimó una generación de 9.92292e-5 de kg CFC-11 eq. La etapa de “Procesamiento de células de silicio” ocupa también el segundo puesto con un 17% del impacto total. La instalación de paneles toma parte al incrementar los impactos debido a la inclusión del transporte al sitio de instalación.

En cuanto al material particulado (PM), la categoría de mayor impacto es la de “Purificación de silicio grado solar” con un 49% del total de afectación, principalmente influenciada por las emisiones al aire de gases derivados de la combustión por el proceso de generación eléctrica. Esta etapa, representa más del 70% del total de energía requerida en el proceso productivo. Esta operación también emite clorosilano, cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno, polvo de silicio, así como tetracloruro de silicio a la atmósfera. La etapa del “Procesamiento celular” un 15% de impacto, emite óxidos de nitrógeno a la atmósfera, así como amoníaco, fluoruro de hidrogeno y cloruro de hidrógeno. La etapa de “Fundición de silicio metalúrgico” toma relevancia en esta

categoría con un 12% del total de impactos debido a los procesos de extracción de arena de cuarzo de silicio y el carbón, generando también gases derivados de la combustión, dióxido de silicio y dióxido de azufre. La etapa de “Ensamblaje de módulos” con 10%, debido a que genera emisiones de agua a la atmósfera por procesos de evapotranspiración. Las etapas de “Fundición de silicio metalúrgico”, “Instalación de paneles “Corte de obleas” y “Fin de vida” generan tan solo el 5%, 4%, 3% y 1%. Las etapas de “Fin de vida”, “Corte de obleas” y e “Fundición de lingotes” toman menor importancia y en el caso de “Fundición de silicio metalúrgico” únicamente muestra impactos significativos en las categorías de acidificación (20%), material particulado (12%), eutroficación terrestre (11%), eutroficación marina (9%) y formación de ozono fotoquímico (9%). La categoría de “Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables”, se ve afectada por la etapa de “Procesamiento celular” en un 97% debido al uso de Plata y procesos de producción energética.

En el caso de consideración de reciclaje al final de la vida útil del panel fotovoltaico, el modelado muestra una clara disminución en los impactos generados por los procesos. Los valores negativos que muestra la Figura 3.1a representan impactos evitados a cada categoría de impacto. Los de mayor relevancia son “Toxicidad humana (non cancer effects)”. Esto se debe a que materiales como la plata, aluminio, silicio grado solar, cobre y el vidrio son reciclados, evitando así la carga ambiental que representaría su fabricación. Los resultados mostraron que el proceso de reciclaje disminuye en un 83% el impacto ambiental generado en esta categoría. En cuanto a la categoría de “Ecotoxicidad de agua dulce” los impactos se redujeron un 82% y un 66% en la categoría de “Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables”, en esta última sobre todo debido a los impactos evitados que se producen por el rescate de materiales valiosos. En “Cambio climático” las emisiones de kg CO₂ eq se redujeron un 25% y “Agotamiento de ozono” en un 16%. El total de impactos por productos evitados utilizando el método de reciclaje planteado es de 98% y el 2% restante se debe a impactos negativos causados por el transporte y la disposición de residuos de vidrio, de silicio y cenizas del proceso de incineración.

La comparación de resultados muestra una clara disminución en los impactos generados por el análisis de ciclo de vida con reciclaje en cada una de las 16 categorías de impacto. Las categorías de “Toxicidad humana (non cancer effects)” y “Ecotoxicidad de agua dulce” muestran una reducción del 83%, mientras que “Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables” muestra un 66% menos en relación con el caso sin reciclaje. Seguidas de estas, las categorías de Toxicidad humana (cancer effects), formación de ozono fotoquímico, eutrofización terrestre, y eutrofización marina, presentan una disminución de entre el 42% y 32%. En cuanto a las categorías de cambio climático, material particulado y uso de suelo, el impacto se redujo en 28%, 22% y 20%, respectivamente. En las categorías de “Agotamiento de recursos hídricos” y “Eutrofización de agua dulce” que presentan un cambio del 1%. La categoría de “Formación de ozono fotoquímico” y “Eutrofización terrestre” se ven afectadas por el rescate principalmente del aluminio y en menor medida el vidrio, silicio y plata. También se proporciona un resumen de los impactos en la Tabla 3.1.

Finalmente es notable la viabilidad ambiental del reciclaje de paneles fotovoltaicos con las consideraciones dadas para el presente análisis.

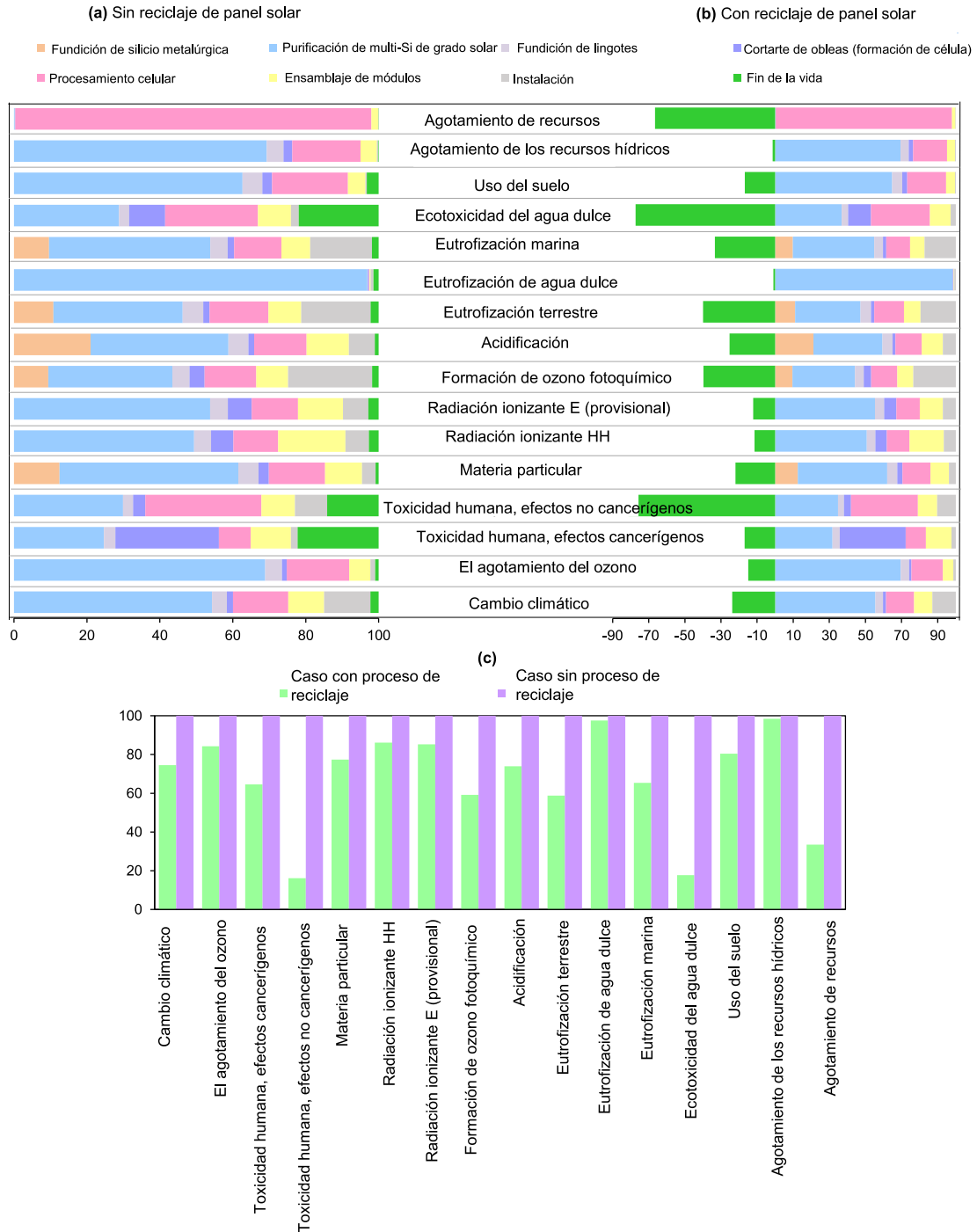


Figura 3.1: Resultados de la evaluación de impacto ambiental para el caso de paneles fotovoltaicos (a) sin considerar una técnica de reciclaje, y (b) con la técnica de reciclaje FRELP. (c) Comparación de la evaluación de impacto ambiental de ambos casos. Nota: El eje x de la figura (a, b) y el eje y de la figura (c) representan la escala de porcentaje que indica la contribución relativa de cada paso del proceso. El eje y de la figura (a, b) y el eje x de la figura (c) representan la categoría del impacto ambiental.

Tabla 3.1: Estimación del costo del reciclaje al final de la vida útil del panel fotovoltaico.

Resultados de la evaluación de impacto ambiental del panel solar sin considerar ninguna técnica de reciclaje.										
Categoría de impacto	Unidad	Total	Fundición de silicio metalúrgica	Purificación de multi-Si de grado solar	Fundición de lingotes	Cortarte de obleas (formación de célula)	Procesamiento o celular	Ensamblaje de módulos	Instalación	Fin de la vida
Cambio climático	kg CO2 eq	1246.49	0	676.6025	50.97297	20.64079	189.2373	122.4695	158.1754	28.39195
El agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	0.000144	0	9.92E-05	6.61E-06	1.88E-06	2.47E-05	8.36E-06	1.87E-06	1.41E-06
Toxicidad humana, efectos cancerígenos	CTUh	2.38E-05	0	5.86E-06	7.43E-07	6.75E-06	2.07E-06	2.63E-06	4.3E-07	5.28E-06
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos	CTUh	6.88E-05	0	2.06E-05	1.91E-06	2.3E-06	2.19E-05	6.33E-06	6.07E-06	9.74E-06
Materia particular	kg PM2.5 eq	0.407571	0.0508925	0.199821	0.022592	0.011446	0.062924	0.041279	0.01516	0.003457
Radiación ionizante HH	kBq U235 eq	95.54525	0	47.18989	4.46287	5.818604	11.73153	17.61496	6.160235	2.567148
Radiación ionizante E (provisional)	CTUe	0.000276	0	0.000148	1.34E-05	1.8E-05	3.51E-05	3.41E-05	1.91E-05	7.88E-06
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq	3.646365	0.343619	1.240394	0.171446	0.150252	0.516227	0.317738	0.841345	0.065345
Acidificación	molc H+ eq	5.914854	1.241767	2.235424	0.324842	0.092372	0.850728	0.686195	0.418989	0.064537
Eutrofización terrestre	molc N eq	10.99206	1.190883	3.891161	0.620032	0.190669	1.777514	0.987217	2.091612	0.242975
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.321123	0	0.311175	0.000237	0.001139	0.000612	0.00077	0.002622	0.004568
Eutrofización marina	kg N eq	1.128917	0.1087449	0.498793	0.053703	0.02031	0.146353	0.088999	0.190861	0.021153
Ecotoxicidad del agua dulce	CTUe	1162.732	0	334.4981	32.55067	114.9049	295.8394	104.909	25.18715	254.8424
Uso del suelo	kg C deficit	3012.639	0	1887.345	163.3861	80.64734	626.9883	145.0893	11.5717	97.61126
Agotamiento de los recursos hídricos	m3 water eq	17.55015	0	12.16284	0.806867	0.424802	3.279219	0.790338	0.058283	0.0278
Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables	kg Sb eq	0.493862	0	0.001026	0.000282	0.000334	0.482216	0.009388	0.000536	8.15E-05
Resultados de la evaluación de impacto ambiental del panel solar con la consideración del reciclaje.										
Cambio climático	kg CO2 eq	928.895	0	676.6025	50.97297	20.64079	189.2373	122.4695	158.1754	-289.203
El agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	0.00012	0	9.92E-05	6.61E-06	1.88E-06	2.47E-05	8.36E-06	1.87E-06	-2.1E-05
Toxicidad humana, efectos cancerígenos	CTUh	1.53409	0	5.86E-06	7.43E-07	6.75E-06	2.07E-06	2.63E-06	4.3E-07	-3.1E-06
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos	CTUh	1.10E-05	0	2.06E-05	1.91E-06	2.3E-06	2.19E-05	6.33E-06	6.07E-06	-4.8E-05
Materia particular	kg PM2.5 eq	0.315497	0.050893	0.199821	0.022592	0.011446	0.062924	0.041279	0.01516	-0.08862
Radiación ionizante HH	kBq U235 eq	82.34865	0	47.18989	4.46287	5.818604	11.73153	17.61496	6.160235	-10.6294
Radiación ionizante E (provisional)	CTUe	0.000235	0	0.000148	1.34E-05	1.8E-05	3.51E-05	3.41E-05	1.91E-05	-3.3E-05
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq	2.158469	0.343619	1.240394	0.171446	0.150252	0.516227	0.317738	0.841345	-1.42255
Acidificación	molc H+ eq	4.371767	1.241767	2.235424	0.324842	0.092372	0.850728	0.686195	0.418989	-1.47855
Eutrofización terrestre	molc N eq	6.457574	1.190883	3.891161	0.620032	0.190669	1.777514	0.987217	2.091612	-4.29151
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.313315	0	0.311175	0.000237	0.001139	0.000612	0.00077	0.002622	-0.00324
Eutrofización marina	kg N eq	0.738172	0.108745	0.498793	0.053703	0.02031	0.146353	0.088999	0.190861	-0.36959
Ecotoxicidad del agua dulce	CTUe	205.7904	0	334.4981	32.55067	114.9049	295.8394	104.909	25.18715	-702.099
Uso del suelo	kg C deficit	2424.534	0	1887.345	163.3861	80.64734	626.9883	145.0893	11.5717	-490.493
Agotamiento de los recursos hídricos	m3 water eq	17.27905	0	12.16284	0.806867	0.424802	3.279219	0.790338	0.058283	-0.24329
Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables	kg Sb eq	0.165203	0	0.001026	0.000282	0.000334	0.482216	0.009388	0.000536	-0.32858

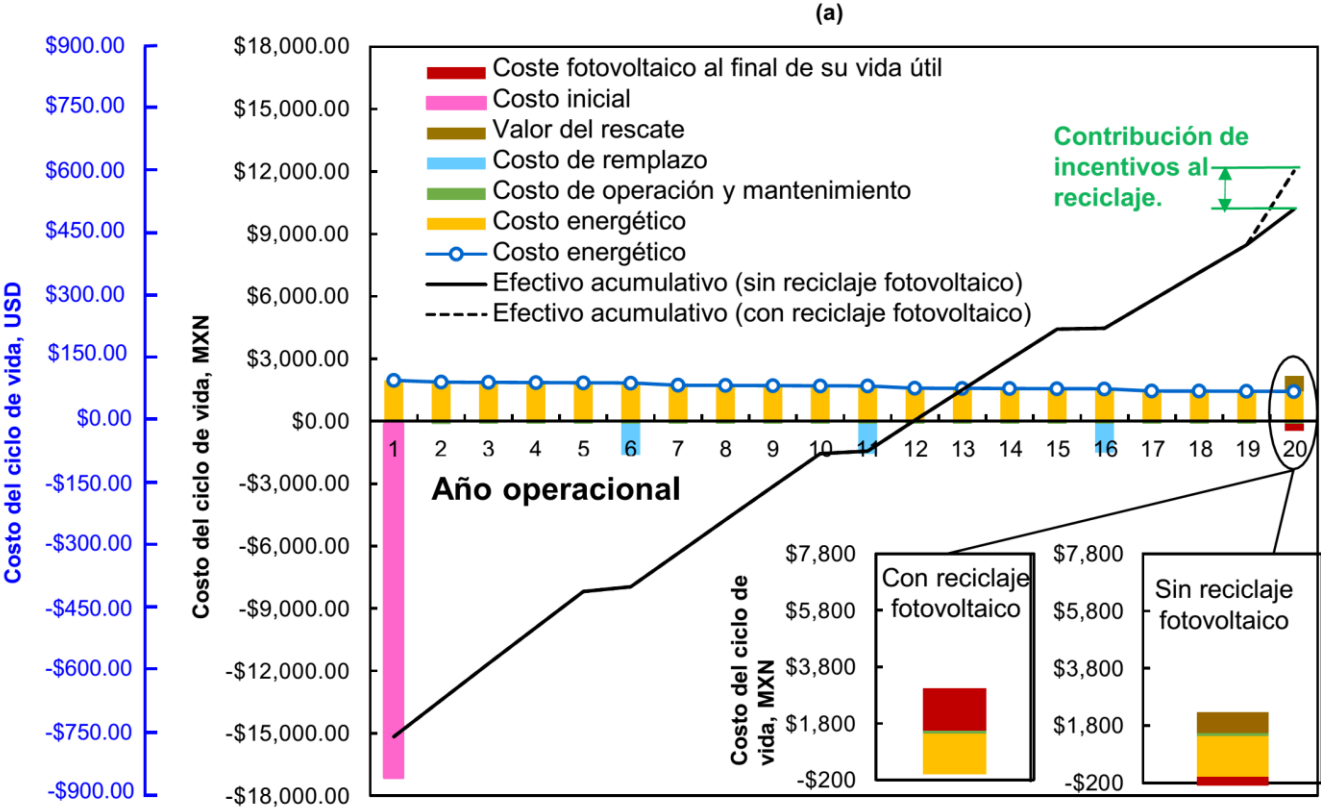
3.2. Resultados del ACV económico

La Figura 3.2 presenta los resultados de la evaluación económica con y sin la consideración del reciclaje fotovoltaico. La Figura 3.2 (a) presenta el diagrama de flujo de efectivo que presenta todo el desglose de los costos del ciclo de vida. Incluye una barra a la baja, que representa el costo inicial de \$ 17,000.00 MXN y un ingreso positivo en términos de costo de energía al cierre del primer año operativo. Los costos de energía disminuyen a lo largo de la vida debido al valor del dinero en el tiempo (la tasa de descuento es más alta que la tasa de inflación) y la pérdida de capacidad de producción de energía del panel fotovoltaico. Se incluye un costo de reemplazo después de un intervalo de cinco años para el reemplazo del inversor. También es visible que el costo acumulativo tiene una pendiente constante durante los años 6, 11 y 16 porque el ingreso generado por el costo de energía es reemplazado por el costo de reposición del inversor. El costo de operación y mantenimiento es casi insignificante en comparación con los otros costos (ver Figura 3.2 (b) y (c)) lo que tiene sentido, debido a que un panel fotovoltaico requiere un mínimo mantenimiento y solo es necesaria la limpieza (en la mayoría de los casos). Finalmente, al final de la vida operativa, (a) para el caso de que no haya reciclaje fotovoltaico, se muestra un valor de rescate de \$ 728.25 MXN y una inversión al final de la vida que cuesta \$ 341.35 MXN, (b) para el caso de Reciclaje fotovoltaico, no se incluye ingreso por venta de componentes y se distingue un costo de fin de vida positivo agregando un beneficio de \$ 1,486.31 MXN. Este fenómeno se observa porque el costo al final de la vida útil del reciclaje fotovoltaico tiene menores costos de eliminación de material peligroso en el relleno sanitario, en consecuencia, los ingresos generados por el panel fotovoltaico mejoran el costo al final de la vida útil y finalmente la contribución del incentivo de reciclaje.

La Figura 3.2 (c) presenta la influencia de los incentivos de reciclaje en LCoE y el costo de fin de vida en su valor actual. Se informa que los incentivos de reciclaje son necesarios para respaldar los costos de reciclaje de PV y este proceso podría ser costoso sin tales incentivos. Esto tiene lógica porque siempre hay incentivos

gubernamentales, no gubernamentales y/o empresas para apoyar proyectos de sostenibilidad (Veldman y Gaalman, 2020). Se observa que es necesario un incentivo de al menos el 15% del costo inicial para apoyar el proceso de reciclaje. El verdadero debate está en la distribución de este costo entre los distintos actores (usuarios, empresas e instituciones gubernamentales) y se analiza con más detalle en la siguiente sección.

En resumen, el LCoE del reciclaje fotovoltaico es de 2.92 MXN/kWh, que es un 2.01% menor que el caso de la disposición de residuos fotovoltaicos en un relleno sanitario. El período de recuperación es de 12 años para ambos casos y se mantuvo sin cambios para ambos casos porque este no se ve afectado con los beneficios generados al final de la vida. En conclusión, reciclar los paneles fotovoltaicos puede tener beneficios económicos siempre que se llegue a un acuerdo entre las partes interesadas sobre los incentivos de reciclaje.



(Continúa en la siguiente página.)

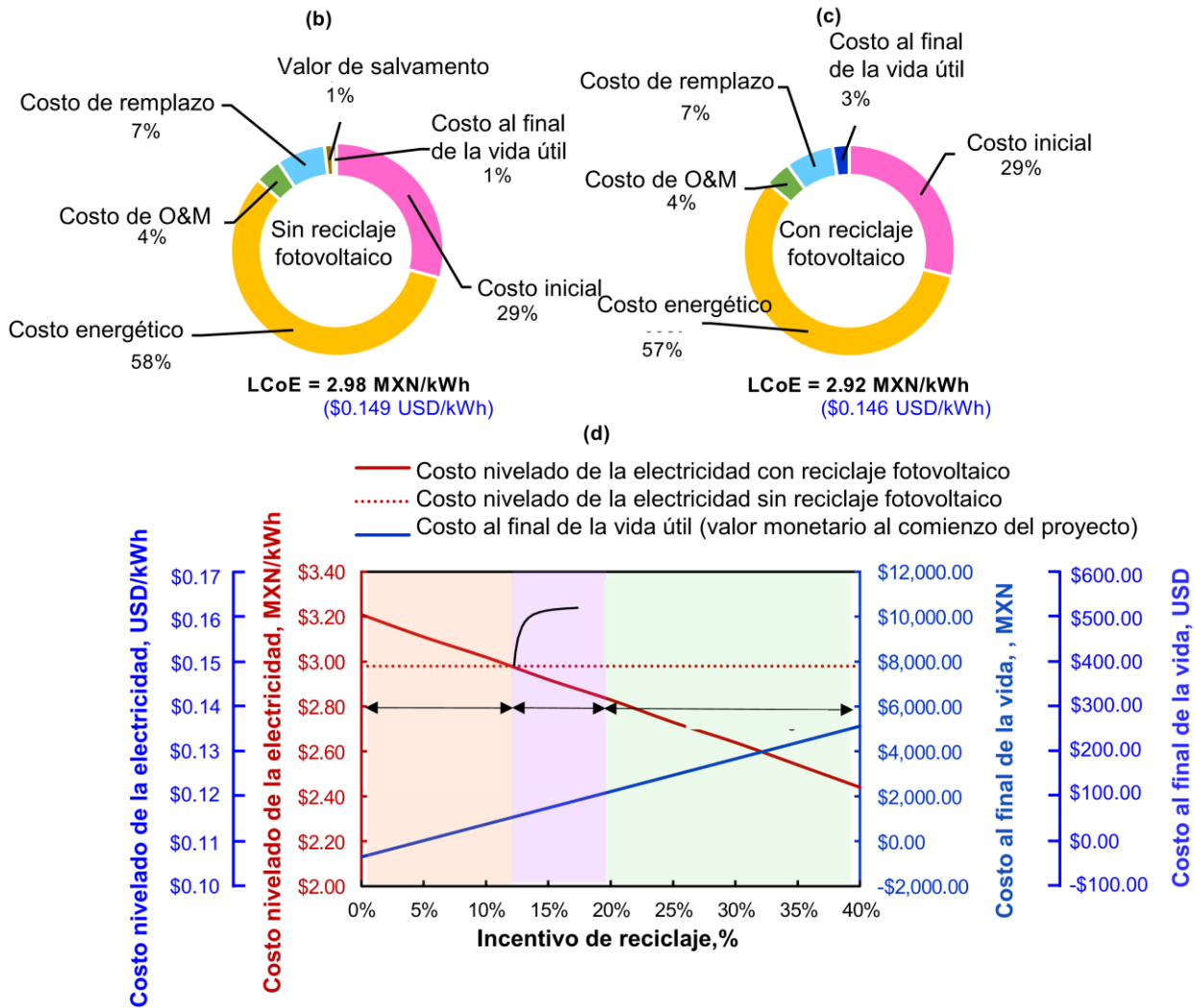


Figura 3.2: (a) Diagrama de flujo de caja del caso con y sin la consideración del reciclaje fotovoltaico. Desglose del costo del ciclo de vida para (b) sin reciclaje y (c) considerando el reciclaje fotovoltaico. (d) La influencia de los incentivos de reciclaje en el costo nivelado de la electricidad y el costo al final de su vida útil.

3.3. Comprensión interpretativa de los resultados de la encuesta social

Como se mencionó en la sección anterior, no existe un organismo regulador en México para manejar el final de la vida útil de los paneles solares. Nuestro análisis social ha mostrado una preocupación entre la población de Yucatán por la implementación de tal regulación como lo señaló la voz directa de la sociedad a través de las siguientes declaraciones, “Hasta ahora nadie está pensando en reciclar paneles solares, la

mayoría de las instalaciones en Yucatán no han completado su vida útil y no han comenzado a plantear el problema, que podría agravarse”, “Dada la cantidad de sistemas fotovoltaicos instalados en la ciudad y el estado, y aumentaría en los próximos cinco años mientras algunos ya han llegado al final de su vida útil, esto se convertirá en un problema de acumulación de residuos de paneles y sistemas fotovoltaicos. No dudo que pronto veríamos los módulos en las calles o en las áreas verdes como un desperdicio”. Esta preocupante situación tiene también algunas raíces en los límites sistemáticos y burocráticos de la política energética de México donde las empresas explotan y escapan incluso para redactar el nexo social y ambiental que finalmente alimenta los conflictos de poder a nivel local. Por lo tanto, la encuesta social intenta delinear las brechas entre los actores sociales a través de la comprensión de su conocimiento, actitud y práctica y su correlación para identificar los caminos suaves hacia una regulación de reciclaje socialmente aceptable de paneles solares. Este estudio es para contemplar las dimensiones socioculturales para la propuesta de un modelo o una norma para el reciclaje de paneles solares, encaminado al marco de la sustentabilidad.

3.3.1. Contexto sociodemográfico y socioeconómico de la muestra de investigación

De una muestra total de 350 encuestas, hubo un ligero predominio de los hombres con un 56% en comparación con las mujeres con un 44%. El 45.6%, 28.1%, 10%, 8.2% y 6.4% de los participantes pertenecían al grupo de edad 18-24, 25-34, 35-44, 45-54 y 55-64, respectivamente. El 46.6%, 23.8%, 20.6%, 1.8% y 2.5% de los participantes tenían el siguiente nivel de educación: bachillerato, posgrado, educación primaria y secundaria, respectivamente. El 82.2% de los participantes pertenecían a una residencia urbana y el 17.8% a una zona rural. El 58% de los participantes pertenecía a la ciudad capital de Yucatán, Mérida, el 10,3% pertenecía a la región no clasificada, el 7.4% a la región noroeste y este, el 5,6% a la región oeste, el 5,8% a la región sur, el 5.2% a la región noreste, y el 7.7% perteneciente a la región central del estado. 35.6%, 21.7%, 16.7%, 9.6% y 7.8% tenían el siguiente número de familiares directos, 4, 5, 3, 2 y 6, respectivamente. Hubo bastante fluctuación en el ingreso familiar total

de los participantes en el que 16.7%, 14.6%, 13.5% y 13.2% tenían un ingreso familiar en los siguientes rangos: entre \$ 5,000 MXN a \$ 9,900 MXN, \$ 10,000 MXN a \$ 14,999 MXN, \$ 30,000 MXN a \$ 50,000 MXN y \$ 20,000 MXN a \$ 29,999 MXN, respectivamente. Entre los encuestados, el 5% ha respondido pertenecer a un grupo indígena y el 8.9% ha expresado una respuesta mixta. La encuesta también cuenta con la asistencia de 32 representantes de empresas de energía locales y 10 funcionarios del gobierno. Si bien, se puede ver que algunos de los parámetros como una gran cantidad de participantes pertenecientes a Mérida y la zona urbana no están justificados, los autores quisieran mencionar que alrededor del 50% (Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) 2019) de la población del estado de Yucatán reside en la zona urbana de Mérida. Otro aspecto es que, aunque el cuestionario solicita detalles cuantitativos, también va acompañado de preguntas abiertas que ayudan a comprender la naturaleza cualitativa de la respuesta de la muestra.

3.3.2. Análisis interpretativo del conocimiento y la actitud sobre el reciclaje fotovoltaico

El diagnóstico CAP ayuda a evaluar y medir el nivel de información que existe en realidad en la muestra, para lograr esto la encuesta incluye siete preguntas en la relacionadas con el conocimiento de la muestra. La puntuación ideal del conocimiento es de 9 y la media de todos los participantes resultó ser de 6.8. Aunque esta puntuación no es extremadamente alta, es un indicador de que la muestra seleccionada conoce bastante el tema. De hecho, un sujeto ha mencionado: "*No sabía que este problema existe*". La puntuación perfecta para medir la actitud de la muestra es 13 y la media resultó ser 9.73 lo que indica que la muestra seleccionada tiene una actitud positiva hacia esta regulación.

3.3.3. La conciencia social integral y los encuestados practican la necesidad de una regulación de reciclaje

Se puede observar en la Figura 3.3 que el 69.5% de las muestras consideran que los residuos de paneles solares pueden presentar un riesgo ambiental con predominio de la contaminación del suelo y la contaminación del agua. El 75.6% de la muestra está dispuesta a abordar los problemas de los residuos fotovoltaicos, y el 58.2% de ellos considera que todos los interesados, incluidos los usuarios, las empresas y el gobierno, son responsables de reciclar los paneles solares. El 91.5% está dispuesto a apoyar la ley de reciclaje de paneles solares, de hecho, uno de los sujetos ha mencionado, *“no debería ser opcional si este tipo de residuos representa una fuente de contaminantes”*. Sin embargo, este porcentaje ha disminuido significativamente hasta el 77% cuando se pregunta a las muestras si se pueden aplicar sanciones a los usuarios o empresas por no reciclar sus paneles solares. Puede estar respaldado por una declaración hecha por un sujeto, *“es un tema complicado porque no tenemos una cultura de reciclaje, incluso cuando hay leyes o regulaciones, la mayoría de la gente no las sigue”*. Los usuarios expresan ciertos temores que se pueden ver en las siguientes declaraciones, *“es complicado por la cultura, pero es posible”*, *“creo que estamos muy lejos de ser una sociedad interesada en el reciclaje de paneles. La mayoría de los usuarios no se plantean utilizarlos y reciclarlos supondría un mayor nivel de no aceptación”*. Los resultados de la Figura 3.11 (h, i, y k) corresponden a la actitud de la muestra que representa que el 82.2% de ellos está dispuesto a rastrear si su panel solar se ha reciclado. El 78.9% está dispuesto a mantener el registro de un 'certificado' al reciclar, y el 93.4% ha mostrado voluntad de comprar los paneles solares de las empresas que brinden garantía de reciclarlos. La actitud del público es positiva, sin embargo, debe estar en sintonía con las empresas energéticas, estas tendrían que estar reguladas, estrictamente por el gobierno porque uno de los sujetos ha mencionado que las empresas energéticas ni siquiera dan seguimiento a la instalación existente y obligar a las empresas a reciclar los paneles solares sería mucho más complicado.

3.3.4. Reciclaje de paneles solares en el contexto de Yucatán, nexo de conciencia ambiental y patrocinio económico

Es pertinente mencionar que entre los encuestados existe una conciencia ambiental del peligro potencial de los paneles solares al final de su vida útil, pero también es fundamental la preocupación por el patrocinio económico de incentivos para reciclaje. En un escenario futurista de una ley de reciclaje regulada, las nuevas inversiones también incluirían los costos de reciclaje para los clientes y, en tal caso, los usuarios no solo considerarían los beneficios de facturación de la instalación de paneles solares domésticos, sino que también tratarían el reciclaje como un factor posiblemente decisivo. Esto también proporciona una amplia perspectiva sobre el nexo medioambiental-social-económico y, curiosamente, se observa que un porcentaje muy alto de 95.3 está dispuesto a apoyar el reciclaje de paneles solares siempre que se proporcione un incentivo de reciclaje. Uno de los temas se ha enfocado en el incentivo al reciclaje al mencionar, *“Yucatán es una de las zonas con mejor insolación del país, y, aun así, debido a las políticas mexicanas, el uso de tecnologías renovables como los sistemas fotovoltaicos no se han realizado adecuadamente. El reciclaje implica un costo extra para el usuario, por lo que primero debe existir un incentivo gubernamental para el usuario, ya sea por la instalación de la fotovoltaica o por el reciclaje, para que el usuario pague ese porcentaje del costo del reciclaje, de lo contrario no lo haría. no funcionaría”*.

Esto nos lleva a la respuesta a las discusiones dejadas por la evaluación económica. Se puede observar en la Figura 3.3(m) que el 36.6% y el 33.3% de las partes interesadas están dispuestos a pagar entre el 6% y el 10% y hasta el 5%, respectivamente, del costo inicial de los paneles solares con fines de reciclaje. Sería razonable mencionar que un promedio de este rango (~7.5% del costo inicial) puede ser patrocinado por los usuarios para reciclar los paneles solares. También se puede justificar a partir de la Figura 3.3(h) donde se puede observar que alrededor del 60% de los usuarios están dispuestos a pagar entre el 60% y el 79% (correspondiente al 9-12% del costo inicial total) para fines de reciclaje. En el caso del gobierno y las empresas energéticas, los encuestados han favorecido un patrocinio entre el 20% y

39% (correspondiente al 3-5.85% del costo inicial total) para fines de reciclaje. En otras palabras, el reciclaje de los paneles solares puede ser apoyado por usuarios que están dispuestos a cubrir entre el 9-12% del costo inicial y, por otra parte el gobierno y las empresas deberían cubrir cada uno entre el 3-5.85% para cumplir con el 15% estimado del incentivo de reciclaje. Aunque hay un grupo en el público que es crítico respecto al incentivo de reciclaje que se destaca en la siguiente declaración, *“Mucha gente muestra poco conocimiento sobre las energías renovables y se enfoca más en cuánto costará. En tal condición, para ser algo socialmente aceptado, debería tener costo cero porque sería el mismo caso que el reciclaje de basura doméstica que nunca ocurre”*.

3.3.5. Reciclaje entre ser un debate político y un debate social

Otro aspecto de la evaluación social es comprender la correlación multivariante entre las diferentes variables singulares que se extienden desde el poder estatal hacia la resistencia social. Para ello, se aplica un análisis estadístico multivariado a los resultados de la encuesta social. La Tabla 3.2 muestra la correlación entre las variables del perfil sociodemográfico, conocimientos previos y los indicadores sociales de la encuesta. Se puede notar que género, grupo de edad, lugar de residencia, pertenencia a un grupo indígena, región y número de miembros de la familia se correlacionan positivamente con los criterios de aceptación social del reciclaje fotovoltaico. Es decir, ser una mujer de edad avanzada que vive en una región rural, pertenece a una comunidad indígena y tiene una familia numerosa es un candidato que percibe que el reciclaje de paneles solares puede ser socialmente aceptable en México. Esto también se correlaciona con las condiciones rurales actuales de Yucatán, donde está densamente poblada por mujeres indígenas mayores. Dichas comunidades han experimentado previamente relaciones con empresas de energía solar y comprenden los riesgos ambientales relacionados con el reciclaje de paneles solares (El Mekaoui et al. 2020). Nótese que la correlación de la comunidad indígena es la más fuerte con la aceptabilidad social. El punto de vista inferencial también sugiere que la reforma social debe incluir consultas indígenas y previamente se observa que la débil comunicación entre el gobierno, las comunidades (tanto rurales como urbanas) y las

empresas sumado a la ausencia de una gestión al final de la vida de los megaproyectos en el estado de Yucatán ha generado una serie de resistencias y rechazos (El Mekaoui et al. 2020). Esta es otra razón por la que el coeficiente de correlación tiene características únicas cuando se discuten juntas las comunidades rurales indígenas envejecidas y la aceptabilidad social. Las correlaciones negativas se notan con el nivel educativo y la primera pregunta de conocimiento (¿si el encuestado es consciente de la diferencia entre energías renovables y no renovables?). Se observa que un nivel educativo más alto se correlaciona con el miedo de los encuestados a resistir socialmente el reciclaje de energía fotovoltaica. Se puede plantear que el sector de educación superior de los encuestados percibe que la ausencia de formación social de la ciudadanía puede generar resistencia social.

En el caso de la disponibilidad de fondos para apoyar el reciclaje, se observa que el género, grupo de edad, lugar de residencia, pertenencia a la comunidad indígena, región y número de integrantes de familia tienen correlación negativa con este indicador. Esto tiene sentido debido a otras obligaciones sociales involucradas en un grupo de edad rural, perteneciente a la comunidad indígena de lugares remotos, y tener una familia numerosa conllevaría un gasto cauteloso de los fondos. Se observa una correlación positiva para el nivel educativo y los ingresos, es decir, el grupo con educación superior e ingresos ha mostrado voluntad de proporcionar fondos para el reciclaje de energía fotovoltaica.

3.3.6. Correlación de conglomerados multivariados entre las variables triangulares mediante el análisis de componentes principales

Otra perspectiva de esta discusión se puede ver en la Tabla 3.2(b) donde todos los datos sociodemográficos y socioeconómicos se combinan en un grupo, y las preguntas basadas en el conocimiento se formulan en otro grupo utilizando el análisis de componentes principales. Este análisis explica la correlación de un clúster que tiene características sociodemográficas y socioeconómicas particulares con su conjunto relativo de conocimientos con los indicadores sociales exhibidos. Esto ayuda a

comprender el CAP de la muestra de la multitud sabiendo que la psicología de la multitud difiere e interactúa con la de un individuo dentro de ella. El diseño de cada conglomerado está respaldado por el valor propio y el porcentaje de varianza, aunque se puede observar que todas las subvariables de cada conglomerado se combinan para producir un porcentaje de varianza acumulativa del 100%. A través del análisis multivariado de la varianza, se puede observar que ambos grupos tienen significancia estadística para el indicador de aceptabilidad social y disponibilidad de fondos. Ambos grupos están correlacionados positivamente con el indicador de aceptabilidad en proporciones de 0.18 y 0.17, mientras que están correlacionados negativamente con la disponibilidad de los fondos. Se infiere que la muestra de investigación de Yucatán independientemente de sus datos sociodemográficos, socioeconómicos y de conocimiento ha brindado retroalimentación positiva para la aceptabilidad con un nivel de confianza estadística del 95%, mientras que el conjunto de la muestra de investigación en una perspectiva masiva tiene un punto de vista algo precautorio sobre la disponibilidad de fondos.

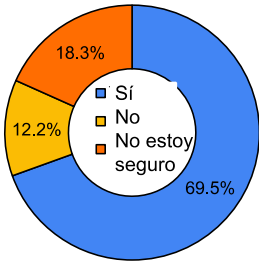
3.3.7. Observaciones finales de la encuesta social

En conclusión, de este apartado, se debe inferir que la población de Yucatán está dispuesta a aceptar la regulación de reciclaje de paneles solares. Sin embargo, es necesario introducir programas educativos masivos y sobre todo introducir los incentivos al reciclaje de residuos para apreciar una ley o regulación de los residuos fotovoltaicos. Se sustenta en las declaraciones de algunos sujetos que mencionan: *“Si a la sociedad se le enseña que los paneles fotovoltaicos tienen una cierta vida útil, entonces deben ser reciclados; el público probablemente comenzaría a hacerlo e incluso si hubiera un incentivo económico”, “Con una buena campaña de concientización, la sociedad yucateca estaría dispuesta a cumplir con esta regla de reciclaje”, “Es necesario concientizar a la sociedad para reciclar, tanto en módulos fotovoltaicos, como cualquier otro producto nocivo para el medio ambiente que pueda continuar un proceso de vida útil”*. Por supuesto, también hay una sensación de miedo entre la ciudadanía hacia un cambio social expresado por los sujetos, *“Puede ser complicado, la gente no está acostumbrada”, “Falta educación en la sociedad, por eso*

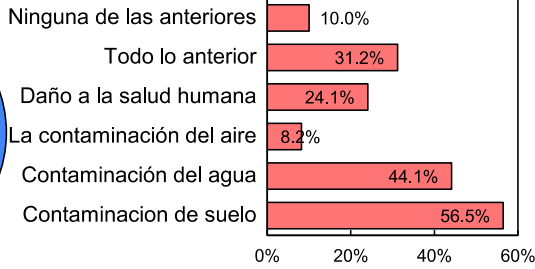
veo difícil hacerlo a corto plazo ". Otros sujetos también han mencionado que este tipo de actividades también generarían empleos al declarar, "Cualquier acción de reciclaje genera dinero y crea empleos" indicando que el reciclaje es visto como positivo por la población. Algunos sujetos han recomendado una infraestructura sobre los beneficios del reciclaje fotovoltaico y mencionan: "Sería un buen objetivo que las fábricas de paneles solares se encarguen de la disposición final de su producto para completar su ciclo de vida. Motivaría aún más a los compradores a comprar el producto sabiendo que estos productos se reciclarán al final de su vida útil. Se puede otorgar un descuento en la compra del nuevo sistema demostrando que sus paneles anteriores son reciclados", "La misma empresa instaladora podría recogerlos de los usuarios y llevarlos a los centros de reciclaje".

Otra perspectiva de la conclusión tiene inferencias al vincular los hallazgos de la encuesta social y las políticas neoliberales de México que podrían no respaldar completamente la sustentabilidad del reciclaje fotovoltaico porque la transición energética actual tiene preferencias económicas que sirven mejor a los intereses de la clase capitalista (Cervantes 2013) y posiblemente comprometiendo la huella ambiental y la aceptación social. Con esto, se pueden recomendar una serie de orientaciones hacia planes estratégicos, que incluyen (a) perspectiva social participativa para la implementación de proyectos de energía renovable, (b) enfoque en declaraciones y contratos transparentes y socialmente simples para evitar malas interpretaciones que puedan generar resistencias sociales, (c) implementar un modelo educativo en áreas rurales y urbanas sobre el ciclo de vida (especialmente el reciclaje) de los paneles solares, (d) y proponer un diseño estratégico hacia una visión futurista con una explicación de que el reciclaje genera nuevo capital y aumenta la mercado laboral.

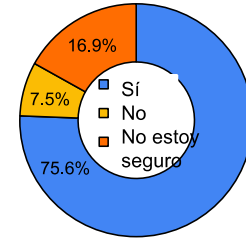
(a) Porcentaje de respuesta de la muestra que si el desperdicio de panel solar representa un peligro ambiental.



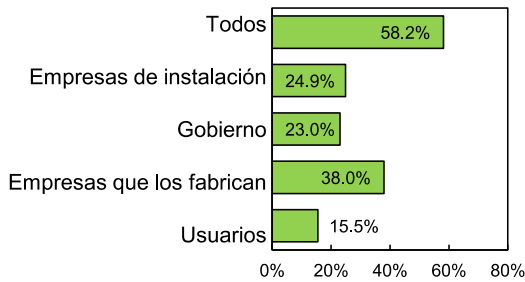
(b) Perspectiva del encuestado sobre los tipos de peligros ambientales causados por paneles solares.



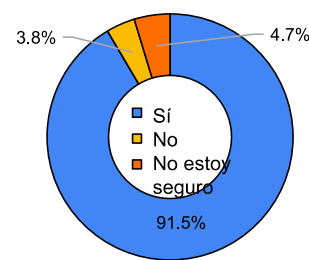
(c) La disposición de los encuestados expresada en porcentaje de tomar una iniciativa para abordar la problemática de los residuos fotovoltaicos.



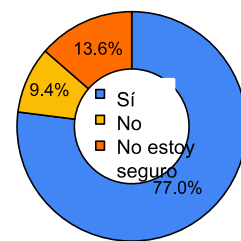
(d) Opinión de la encuestada sobre los grupos de interés responsables del reciclaje de paneles solares.



(e) Perspectiva de los encuestados expresada en porcentaje para apoyar una regulación para reciclar paneles



(f) Perspectiva de la encuestada que si las autoridades correspondientes deberían sancionar a un actor que viola la



(Continúa en la siguiente página.)

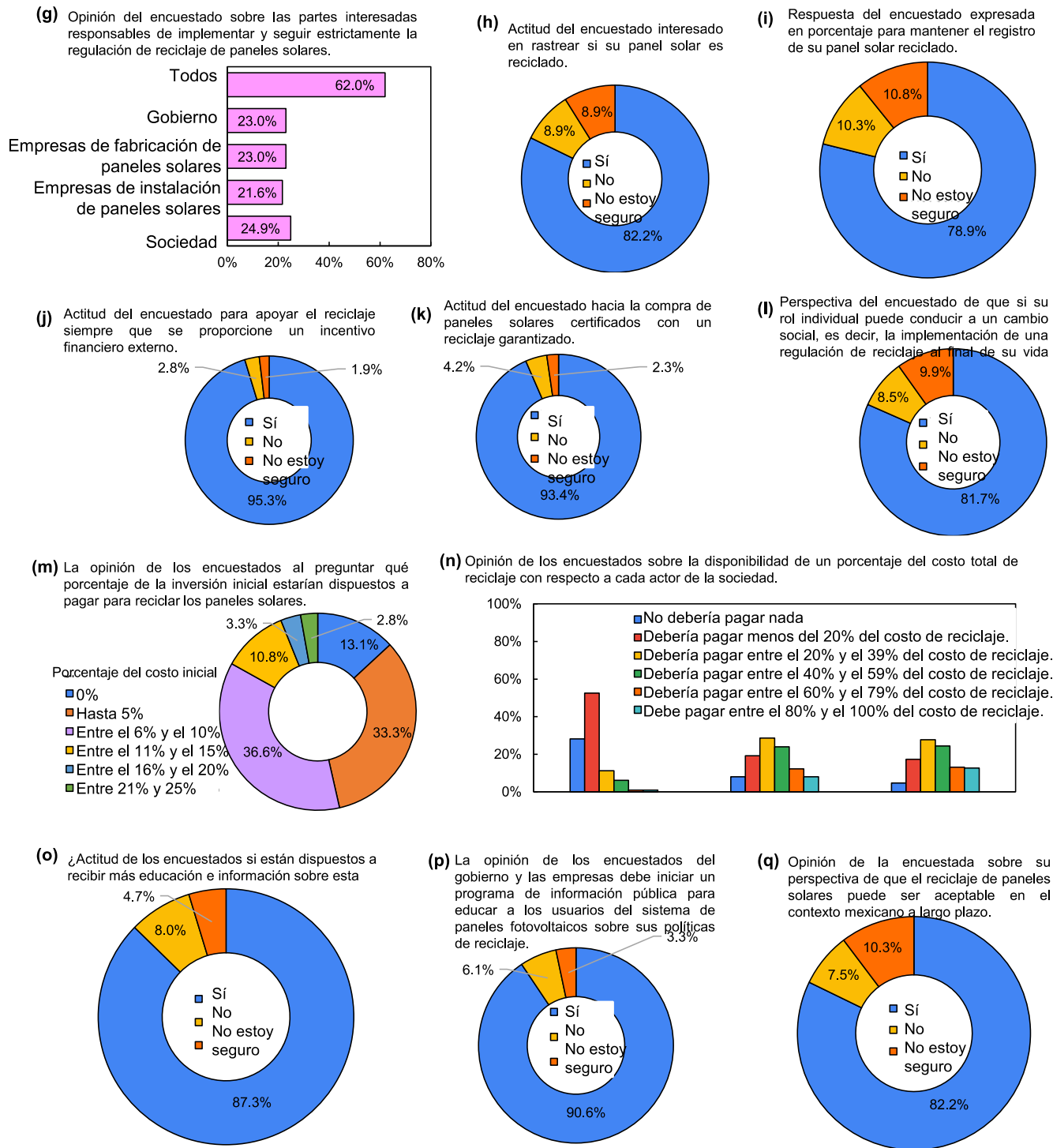


Figura 3.3: Hallazgos de la valoración social. Nota: los alfabetos (a-q) corresponden a cada pregunta.

Tabla 3.2: Hallazgos estadísticos para correlacionar triangular (perfil sociodemográfico, conocimiento previo y aceptación social) del reciclaje de los paneles solares.

Indicadores	Perfil sociodemográfico										El conocimiento sobre el área					Indicadores	
	Género	Grupo de edad	Nivel de Educación	Lugar de residencia	Pertenencia a la comunidad indígena	Región	Número de miembros de la familia	Ingreso	Pregunta de conocimiento 1	Pregunta de conocimiento 2	Pregunta de conocimiento 3	Aceptabilidad	Disponibilidad de fondos				
Género	R=0.2116 valor p=0.0002	R=0.317 valor p=0	R=0.3492 valor p=0	R=0.3034 valor p=0	R=0.2309 valor p=0	R=0.2998 valor p=0	R=-0.0821 valor p=0.1453	R=-0.179 valor p=0.0014	R=-0.0661 valor p=0.2415	R=-0.1333 valor p=0.0177	R=0.3663 valor p=0	R=-0.0737 valor p=0.01916					
Grupo de edad	R=0.2909 valor p=0	R=0.384 valor p=0	R=0.336 valor p=0	R=0.384 valor p=0	R=0.276 valor p=0	R=0.3884 valor p=0	R=-0.1589 valor p=0.0046	R=0.0016 valor p=0.9775	R=0.0327 valor p=0.562	R=-0.0232 valor p=0.6818	R=0.3212 valor p=0	R=-0.185 valor p=0.001					
Nivel de Educación	R=0.521 valor p=0	R=0.4784 valor p=0	R=0.6162 valor p=0	R=0.4784 valor p=0	R=0.2312 valor p=0	R=0.4327 valor p=0	R=0.3193 valor p=0	R=0.2569 p-value=0	R=0.0989 valor p=0.0793	R=0.1375 valor p=0.0144	R=0.3843 valor p=0	R=0.1557 valor p=0.0055					
Lugar de residencia	R=0.287 valor p=0	R=0.287 valor p=0	R=0.287 valor p=0	R=0.287 valor p=0	R=0.287 valor p=0	0.5588 valor p=0	R=-0.2348 valor p=0	R=0.2245 valor p=0.0001	R=-0.0668 valor p=0.0767	R=-0.0997 valor p=0.0424	R=0.4226 valor p=0	R=-0.0665 valor p=0.0000					
Pertenencia a la comunidad indígena	R=0.35 valor p=0	R=0.35 valor p=0	R=0.35 valor p=0	R=0.35 valor p=0	R=0.35 valor p=0	R=0.5075 valor p=0	R=-0.2943 valor p=0	R=0.1675 valor p=0.0028	R=0.0817 valor p=0.1474	R=-0.1143 valor p=0.0424	R=0.5184 valor p=0	R=-0.0985 valor p=0.0804					
Región	R=0.2778 valor p=0	R=0.2778 valor p=0	R=0.2778 valor p=0	R=0.2778 valor p=0	R=0.2778 valor p=0	R=0.2778 valor p=0	R=-0.1043 valor p=0.0064	R=0.0915 valor p=0.1045	R=0.0132 valor p=0.8154	R=-0.0115 valor p=0.6383	R=0.2426 valor p=0	R=-0.0406 valor p=0.4721					
Número de miembros de la familia	R=0.0379 valor p=0.5019	R=0.0379 valor p=0.5019	R=0.0379 valor p=0.5019	R=0.0379 valor p=0.5019	R=0.0379 valor p=0.5019	R=0.5075 valor p=0	R=-0.0988 valor p=0.0796	R=0.0379 valor p=0.5019	R=0.0398 valor p=0.4811	R=-0.0148 valor p=0.7932	R=0.4229 valor p=0	R=-0.1544 valor p=0.006					
Ingreso	R=0.0251 valor p=0.6566	R=0.0251 valor p=0.6566	R=0.0251 valor p=0.6566	R=0.0251 valor p=0.6566	R=0.0251 valor p=0.6566	R=0.2778 valor p=0	R=-0.0796 valor p=0.0796	R=0.0251 valor p=0.6566	R=0.049 valor p=0.3849	R=0.0442 valor p=0.4338	R=0.0956 valor p=0.0899	R=0.1355 valor p=0.0159					
Pregunta de conocimiento 1	R=0.2606 valor p=0	R=0.2606 valor p=0	R=0.2606 valor p=0	R=0.2606 valor p=0	R=0.2606 valor p=0	R=0.2778 valor p=0	R=-0.2606 valor p=0	R=0.2606 valor p=0	R=0.2935 valor p=0	R=-0.1115 valor p=0.0411	R=0.1576 valor p=0.005	R=-0.1271 valor p=0.0239					
Pregunta de conocimiento 2	R=0.1814 valor p=0.0012	R=0.1814 valor p=0.0012	R=0.1814 valor p=0.0012	R=0.1814 valor p=0.0012	R=0.1814 valor p=0.0012	R=0.2778 valor p=0	R=-0.2606 valor p=0	R=0.2606 valor p=0	R=0.1814 valor p=0.0012	R=0.1125 valor p=0.0457	R=0.1125 valor p=0.0457	R=-0.1719 valor p=0.0022					
Pregunta de conocimiento 3	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.2778 valor p=0	R=-0.2606 valor p=0	R=0.2606 valor p=0	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.0746 valor p=0.186	R=-0.2367 valor p=0					
Aceptabilidad	R=0.1271 valor p=0.0239	R=0.1271 valor p=0.0239	R=0.1271 valor p=0.0239	R=0.1271 valor p=0.0239	R=0.1271 valor p=0.0239	R=0.2778 valor p=0	R=-0.2606 valor p=0	R=0.2606 valor p=0	R=0.1271 valor p=0.0239	R=0.1271 valor p=0.0239	R=0.1271 valor p=0.0239	R=-0.2367 valor p=0					
Disponibilidad de fondos	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.2778 valor p=0	R=-0.2606 valor p=0	R=0.2606 valor p=0	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.0746 valor p=0.186	R=0.0746 valor p=0.186	R=-0.2367 valor p=0					

Datos simétricos

Nota: R es el coeficiente de correlación y un valor de p menor que 0.05 indica una significancia estadística para un nivel de confianza del 95%.

Color	Leyenda
	Estadísticamente significativo y correlacionado positivamente
	Estadísticamente significativo y correlacionado negativamente
	Estadísticamente insignificante

(b) Resultados del análisis de componentes principales y análisis de regresión múltiple

Análisis de componentes principales

Clúster sociodemográfico = $0.287189 \times \text{género} + 0.319579 \times \text{grupo de edad} - 0.391392 \times \text{nivel de educación} + 0.442491 \times \text{lugar de residencia} + 0.43025 \times \text{pertenencia a comunidad indígena} + 0.277697 \times \text{región} + 0.399537 \times \text{número de miembros de la familia} - 0.211057 \times \text{ingreso}$

Componente	Valor propio	Porcentaje de varianza	Porcentaje de varianza acumulada
Género	3.36071	42.009	42.009
Grupo de edad	1.00063	12.508	54.517
Nivel de Educación	0.826168	10.327	64.844
Lugar de residencia	0.78847	9.856	74.700
Pertenencia a la comunidad indígena	0.692163	8.652	83.352
Región	0.520147	6.502	89.854
Número de miembros de la familia	0.449249	5.616	95.469
Ingreso	0.362462	4.531	100.000

Análisis de regresión múltiple. Nota: DOF = Grado de libertad.

Indicador de aceptabilidad

Parámetro	Estimación	Error estándar	Valor t estadístico	Valor p
Clúster sociodemográfico	0.186661	0.0162331	11.4988	0.0000
Clúster de conocimiento	0.174991	0.0132745	13.1825	0.0000

Análisis de varianza multivariado (MANOVA)

Fuente	Suma de cuadrados	DOF	Cuadrado medio del error	Prueba F	Valor p
Modelo	727.377	2	363.689	763.24	0.0000
Residuo	149.623	314	0.476506		
Total	877.0	316			

Disponibilidad de fondos

Parámetro	Estimación	Error estándar	Valor t estadístico	Valor p
Constante	6.70211	0.517661	12.9469	0.0000
Clúster sociodemográfico	-0.10963	0.0288158	-3.8045	0.0002
Clúster de conocimiento	-0.425711	0.102383	-4.15803	0.0000

Análisis de varianza multivariado (MANOVA)

Fuente	Suma de cuadrados	DOF	Cuadrado medio del error	Prueba F	Valor p
Modelo	33.8585	2	16.9292	14.57	0.0000
Residuo	362.619	312	1.16224		
Total	396.477	314			

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El reciclaje de paneles solares puede representar una seria gestión de residuos sólidos en el futuro y el mundo en desarrollo es bastante vulnerable a estos peligros socioambientales. Aunque varios países han desarrollado o están desarrollando regulaciones sobre paneles solares, sin embargo, es más complicado para algunas regiones debido a la amenaza de aceptación social hacia tales regulaciones. En consecuencia, dicha evaluación se realiza en armonía entre los diferentes actores de la sociedad con base en la evidencia científica de aceptación ambiental, económica y social para el estado de Yucatán, México. En este trabajo se adopta un enfoque tan multidimensional, y las siguientes son las principales conclusiones:

1. El reciclaje de paneles solares está justificado desde el punto de vista ambiental porque el análisis del ciclo de vida ha reflejado que los impactos negativos sobre ciertos indicadores ambientales como la toxicidad humana, la formación de ozono fotoquímico, la acidificación, la eutrofización terrestre, la ecotoxicidad del agua dulce, el agotamiento de los recursos minerales, fósiles y renovables pueden disminuir significativamente en un rango de ~10-70%.
2. El reciclaje de paneles solares se justifica socialmente porque el análisis del ciclo de vida ha resaltado que el costo de la electricidad puede disminuir en un 2% llegando a 0.146 USD/kWh, sin embargo, debe ir acompañado de un incentivo de reciclaje del 15% del costo inicial.
3. Los resultados de la encuesta social han demostrado que existe una variedad de correlaciones entre sociodemográficas y aceptabilidad que es posible siempre que se puedan dar aquí una serie de pasos de transformación social.

Volviendo a la pregunta de investigación original destacada en este trabajo también se destaca uno de los sujetos que menciona, *“El reciclaje resulta ser una parte fundamental para tener un sistema completamente renovable y verde. Su implementación en México puede ser muy importante y con el tiempo se convertiría en*

una seria amenaza si estos sistemas no se reciclan". Otro aspecto de esta industria se destaca con un tema, *"Además del reciclaje de paneles solares, las baterías y los equipos electrónicos también son una posible amenaza de contaminación"*. Si bien, se recomienda instalar los paneles solares, aún es dudoso que donde se deba desarrollar la infraestructura de reciclaje porque uno de los sujetos ha mencionado, *"Por el tipo de suelo y las características kársticas de Yucatán, no creo que debería haber un centro de reciclaje o almacenamiento de estas células aquí, ya que pondría en riesgo nuestro acuífero. Debería desarrollarse en otra parte de México"*. Al esforzarse por promover el diseño ecológico, esta práctica de reciclaje también cambiaría la cultura de diseño de los paneles solares, obligándolos a utilizar 'materiales fáciles de reciclar' respaldados por una desaceleración. *"Quiero señalar que, en mi opinión, este problema comienza con el diseño de los paneles. Hay problemas de sostenibilidad que surgen de la tabla de diseño que pueden generar un peligro en el futuro"*.

La idea de una unidad monetaria de las inversiones a nivel nacional y un análisis de ciclo de vida puede ayudar a visualizar los riesgos ambientales venideros y posibles problemas sociales complejos que pueden generar una serie de resistencias a los proyectos de energías renovables, y en tal caso, el mismo gobierno no tendrá más recursos para invertir en este sector y la problemática social se consolidará entre los actores. Este miedo a la preocupación también puede estar respaldado por la visión actual del nuevo gobierno que ha criticado la política energética neoliberal del último sexenio y se ha centrado en las reservas de petróleo como un nuevo camino al nacionalismo con una 'justificación' que relaciona los proyectos de energías renovables al partido gobernante anterior y, por lo tanto, no corresponden a un proyecto nacional o social.

También se puede concluir que la importancia de esta metodología integral tiene implicaciones en el diagnóstico y la toma de decisiones para llegar a una solución práctica, eficiente y aplicable a este o similares problemas con la consideración de factores geográficos, políticos, económicos y socioculturales, es decir, las características de cada nación para visualizar un futuro sostenible en nuestro planeta. Como recomendación, el sector de la energía solar debe intensificar sus esfuerzos

para trabajar en todos los aspectos de la sostenibilidad del ciclo de vida de los paneles solares, en comparación con el solo enfoque del producto final "panel solar". Los paneles solares en los mercados que tienen etiquetas ecológicas que garantizan la facilitación del reciclaje al final de su vida útil también pueden contribuir al desarrollo sustentable de esta tecnología. Los autores proponen los siguientes criterios de toma de decisiones en cuatro dimensiones para minimizar la resistencia entre las partes interesadas de la sociedad. Incluye:

- A. Económico: pacto necesario entre los consumidores, el gobierno y las empresas para decidir los costos de reciclaje en función de los hallazgos de los autores.
- B. Técnico: el reciclaje debe ser óptimo para obtener la máxima cantidad de materiales recuperados con el fin de promover una verdadera economía circular.
- C. Ambiental: el reciclaje debe tener un impacto ambiental mínimo cumpliendo con los más altos estándares de calidad.
- D. Social: Favorecer a las empresas y usuarios ejemplares y socialmente responsables, fomentar la educación en materia de reciclaje y considerar el diagnóstico participativo para los proyectos y las políticas públicas.

En resumen, se puede decir que el reciclaje de paneles solares es un paso hacia el desarrollo sostenible de este producto provocando una disminución del riesgo medioambiental de las energías renovables. Sin embargo, dado que la sustentabilidad es siempre relativa, es decir, no absoluta, entonces, en el siguiente paso, es necesario identificar las oportunidades y optimizarlas dentro de los procesos de toda esta industria, no solo para el desarrollo de un 'producto sustentable' sino una 'industria sostenible' que lo produce. El presente trabajo forma parte de una base sólida para investigaciones futuras que brinden evidencia científica para la buena gestión de residuos en México.

APÉNDICE A: ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

Los pasos considerados en el ACV se presentan a continuación

Proceso 1: Fundición de silicio metalúrgico

Entradas:

- Arena de cuarzo 20.48 kg
- Carbón estándar 45.40 kg

Salidas:

- Silicio (99%) 6.08 kg
- Emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera 132.91 kg
- Emisiones de monóxido de carbono a la atmósfera 1.70 kg
- Escoria de la producción de silicio MG para su eliminación 4.38 kg
- Emisiones de óxidos de nitrógeno al aire 279.55 g
- Emisiones de dióxido de silicio a la atmósfera 1.70 kg
- Emisiones de dióxido de azufre a la atmósfera 0.79 kg

Proceso 2: Purificación de silicio multi-Si grado solar

Entradas:

- Silicio metalúrgico (> 99%) 6.08 kg
- Óxido de calcio 6.52 kg.
- Ácido clorhídrico (30%) 2.93 kg
- Ácido fluorhídrico (20%) 0.06 kg
- Hidrógeno (> 99.8%) 0.50 kg
- Ácido nítrico (35%) 0.22 kg
- Nitrógeno gaseoso 71.16 kg
- Tetracloruro de silicio (> 99%) 8.29 kg
- Hidróxido de sodio (20%) 4.81 kg
- Agua 10396.87 kg
- Electricidad 2287.25 MJ
- Vapor 385.02 kg

Salidas:

- Grado solar multi-Si 5.52 kg
- Emisiones de DQO al agua 82.21 g
- Emisiones de clorosilano a la atmósfera 28.56 g

- Emisiones de cloruro de hidrógeno a la atmósfera 36.24 g
- Emisiones de fluoruro de hidrógeno al aire 0.22 g
- Emisiones de dióxido de nitrógeno a la atmósfera 3.15 g
- Polvo de silicio al aire 8.29 g
- Polvo de silicio (99%) para recuperación 0.83 kg
- Emisiones de tetracloruro de silicio a la atmósfera 9.23 g
- Sólidos suspendidos en agua dulce 54.81 g
- Emisiones de triclorosilano a la atmósfera 31.33 g
- Emisiones de agua (evapotranspiración) a la atmósfera 5991.76 kg

Proceso 3: Formación de lingote

Entradas:

- Grado solar multi-Si 5.52 kg
- Carburo de silicio 61.92 g
- Crisol de cuarzo 15.37 kg
- Argón 10.5 kg
- Ácido fluorhídrico (49%) 254.03 g
- Aire comprimido 18.76 m³
- Hidróxido de sodio 46.88 g
- Agua 492.47 kg
- Electricidad 157.54 MJ
- Vapor 7.60 kg

Salidas:

- Lingote Multi-Si 5.47 kg
- Emisiones de fluoruro de hidrógeno al aire 0.60 g
- Carburo de silicio 61,43 g
- Residuos de ácido 348.72 g
- Desechos de crisol de cuarzo para recuperación 15.37 kg
- Agua (evapotranspiración) al aire 375.08 kg

Proceso 4: Cortarte de obleas (formación de célula)

Entradas:

- Lingote Multi-Si 5.47 kg
- Vidrio 2.47 kg
- Carburo de silicio 175.78 g
- Alambre de acero 17.11 kg
- Ácido acético 0.60 kg
- Detergente 2.23 kg
- Aire comprimido 29.05 m³
- Agua 528.63 kg
- Electricidad 24.01 MJ

Salidas:

- Multi-Si Wafer 3.34 kg

- Ácido acético 0.60 kg
- Vidrio 2.47 kg
- Residuos de cola para su eliminación 243,28 g
- Chatarra de silicio para recuperación 2.07 kg
- Aguas residuales 336.94 kg

Proceso 5: Procesamiento celular

Entradas:

- Multi-Si Wafer 3.34 kg
- Amoniac 88.10 g
- Etanol (99.7%) 0.23 kg
- Ácido clorhídrico (37%) 2.57 kg
- Ácido fluorhídrico 0,78 kg
- Ácido nítrico (70%) 1.43 kg
- Nitrógeno 7.62 kg
- Ácido fosfórico (85%) 9.31 g
- KOH (21%) 2.76 kg
- Plata 67.90 g
- Aluminio 0.38 kg
- Agua 866.04 kg
- Gas natural 0.59 kg
- Electricidad 686.69 MJ
- Vapor 26.15 kg

Salidas:

- Celda solar Multi-Si 1.09 kW
- Emisiones de amoniac a la atmósfera 7.86 g
- Emisiones de cloruro de hidrógeno a la atmósfera 4.92 g
- Emisiones de fluoruro de hidrógeno al aire 3.93 g
- Emisiones de óxidos de nitrógeno al aire 61.00 g
- COVs al aire 34.64 g
- Agua 888.13 kg

Proceso 6: Ensamblaje de módulos

Entradas:

- Celda solar Multi-Si 1.09 kW
- Vidrio 63.26 kg
- Aluminio 11.77 kg
- Pieza de tereftalato de polietileno (PET) 3.27 kg
- Película de fluoruro de polivinilo (PVF) 3.27 kg
- Etanol 56,97 g
- Copolímero de etileno y acetato de vinilo (EVA) 7.52 kg
- Isopropanol 17.67 g
- Agua 118.04 kg

- Vapor 16.22 kg
- Electricidad 72.00 MJ

Salidas:

- Paneles solares 1.00 kW
- Carbón activado (cargado) para recuperación 61.11 g
- Emisiones de agua (evapotranspiración) a la atmósfera 94.26 kg
- Emisiones de agua al agua dulce 23.78 kg

Proceso 7: Instalación

Entradas:

- Paneles solares 1.00 kW
- Aluminio 11.77 kg
- Hierro (para montaje) 15 kg

Salidas:

- Paneles solares 1.00 kW
- Aluminio 11.77 kg
- Hierro (para montaje) 15 kg

Proceso 8: Fin de la vida

Entradas:

- Paneles solares 1.00 kW
- Aluminio 11.77 kg
- Hierro (para montaje) 15 kg

Salidas:

- Paneles solares 1.00 kW (Residuos)
- Aluminio 11.77 kg (Residuos)
- Hierro (para montaje) 15 kg (Residuos)
- Consumo de gasolina 27.5 litros

APÉNDICE B: CUESTIONARIO SOBRE RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS

La energía renovable es abundante en la región de Yucatán. Se aprovecha principalmente capturando la energía solar a través de los paneles fotovoltaicos que se están instalando en entornos residenciales, comerciales e industriales. Esta historia de éxito también tiene un lado algo oscuro debido a que los paneles fotovoltaicos, al ser un dispositivo electrónico, pueden generar daños al medio ambiente y a la salud humana al final de su vida útil al dar paso su eliminación en forma de residuo. Esta investigación está orientada a encontrar posibles formas de reciclaje de los paneles fotovoltaicos, implementar normas y estándares, y comprender el papel de los diferentes actores para la implementación final de este proceso. Por lo tanto, el presente cuestionario permitirá evaluar el papel de los usuarios, el gobierno y las empresas de energía y para comprender su perspectiva social sobre las normas y estándares de reciclaje de paneles fotovoltaicos.

La presente encuesta forma parte del desarrollo de una tesis de posgrado en Energías Renovables de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY), por los que los datos derivados de la misma se usarán con fines académicos y serán confidenciales, únicamente se compartirán con la muestra de trabajo.

Agradeceríamos su amable ayuda para completar este cuestionario, que no tomará más de 10 minutos. Gracias.

B.1.1 Sección 1: Datos sociodemográficos y socioeconómicos

Pregunta no. 1:

Sexo :

Opciones:

1. Masculino
2. Femenino
3. Otro

Pregunta no. 2:

¿Cuál es su edad?

Opciones:

1. Menos de 18
2. 18-24
3. 25-34
4. 35-44
5. 45-54
6. 55-64

7. Más de 62

Pregunta no. 3:

¿Cuál es su nivel de estudios?

Opciones:

1. Primaria
2. Secundaria
3. Preparatoria
4. Licenciatura
5. Posgrado
6. Técnico
7. Otro

Pregunta no. 4:

Lugar de residencia:

Opciones:

1. Zona urbana
2. Zona rural

Pregunta no. 5:

¿A cuál municipio de Yucatán pertenece o en cuál nació?

Opciones:

1. Región Poniente (Maxcanú, Celestún, Chocholá, Halachó, Hunucmá, Kinchil, Kopomá, Opichén, Samahil, Tetiz)
2. Región Noroeste I (Abalá, Acancéh, Baca, Conkal, Chicxulub Pueblo, Ixil, Kanasín, Mocochoá, Progreso, Seyé, Tahmek, Tecóh, Timucuy, Tixkokob, Tixpéhuil, Ucú, Umán, Yaxkukul)
3. Región Noroeste II (Mérida)
4. Región Centro (Izamal, Cuzamá, Hocabá, Hochtún, Homún, Huhí, Kantunil, Sanahcat, Sudzal, Tekal de Venegas, Tekantó, Tepakán, Teya, Tunkás, Xocchel)
5. Región Litoral centro (Motul, Bokobá, Cacalchén, Cansahcab, Dzemul, Dzidzantún, Dzilam de Bravo, Dzilam González, Dzoncauich, Muxupip, Sinanché, Suma de Hidalgo, Telchac Pueblo, Telchac Puerto, Temax, Yobaín)
6. Región Noreste (Tizimín, Buctzotz, Calotmul, Cenotillo, Espita, Panabá, Río Lagartos, San Felipe, Sucilá)
7. Región Oriente (Valladolid, Cantamayec, Cuncunul, Chacsinkín, Chankom, Chemax, Chichimilá, Chikindzonot, Dzitás, Kaua, Peto, Quintana Roo, Sotuta, Tahdziú, Tekom, Temozón, Tinum, Tixcacalcupul, Uayma, Yaxcabá)
8. Región Sur (Ticul, Akil, Chapab, Chumayel, Dzan, Mama, Maní, Mayapán, Muna, Oxkutzcab, Sacalum, Santa Elena, Teabo, Tekax, Tekit, Tixméhuac, Tzucacab, Yu)
9. Otro

Pregunta no. 6:

¿Cuántas personas integran su familia?

Respuesta_____

Pregunta no. 7:

¿A que se dedica?

Respuesta_____

Pregunta no. 8:

¿Cuál es su ingreso familiar total?

Opciones:

1. Menos \$5,000 MXN
2. \$5,000 MXN a \$9,999 MXN
3. \$10,000 MXN a \$14,999 MXN
4. \$15,000 MXN a \$19,999 MXN
5. \$20,000 MXN a \$29,999 MXN
6. \$30,000 MXN a \$50,000 MXN
7. Más de \$50,000 MXN

Pregunta no. 9:

De las siguientes opciones, ¿A que grupo pertenece usted?

Opciones:

1. Ciudadano
2. Gobierno
3. Negocios / Empresa

B.1.2 Sección 2: Evaluación de conocimientos sobre las energías renovables y desarrollo del contexto.

Pregunta no. 1:

¿Conoce la diferencia entre energías renovables y no renovables?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 2:

El protocolo de Kioto, acuerdo de París y los objetivos del Desarrollo sustentable de las Naciones Unidas son iniciativas orientadas a la disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y poner fin a la pobreza, luchar contra la desigualdad y la injusticia, y hacer frente al cambio climático.

¿Había usted leído o escuchado sobre las iniciativas descritas en el párrafo anterior?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 3:

¿Cree que es importante crear acciones encaminadas a solucionar los problemas del cambio climático?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 4:

La **huella de carbono** se define como el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO₂ equivalentes, y sirve como una útil herramienta de gestión para conocer las conductas o acciones que están contribuyendo a aumentar nuestras emisiones, cómo podemos mejorarlas y realizar un uso más eficiente de los recursos, (MMA, 2017)

Marque en cada renglón que tan responsable considera que debe ser cada uno para reducir la huella de carbono de México en una escala del 1 al 5 (siendo 5 el más fuerte).

Opciones

	1	2	3	4	5
Usuario					
Gobierno					
Empresas					

Pregunta no. 5:

¿Cuál de los siguientes recursos energéticos renovables puede ayudar a solucionar los problemas ambientales?

Opciones:

1. Energía Solar
2. Energía Eólica
3. Biomasa
4. Energía hidráulica
5. Todas las anteriores
6. Otra. ¿Cuál? _____.

Pregunta no. 6:

¿Cuál de los siguientes recursos energéticos renovables crees que es la que genera menos daños ambientales?

Opciones:

1. Energía Solar
2. Energía Eólica
3. Biomasa
4. Energía hidráulica
5. Todas las anteriores
6. Otra. ¿Cuál? _____.

B.1.3 Sección 3: Evaluación de la aceptación social del reciclaje de paneles fotovoltaicos

Pregunta no. 1:

¿Tiene un sistema de paneles fotovoltaicos instalado en su casa, oficina o empresa?

Opciones:

1. Sí
2. No, y no lo instalaré.
3. No, pero me gustaría instalarlo.
4. No estoy seguro(a).

Pregunta no. 2:

¿Qué factores han limitado la compra e instalación de paneles fotovoltaicos en su casa, oficina o empresa?

Opciones:

1. Precios elevados
2. Falta de información
3. Baja calidad de la energía que proporciona
4. Falta de canales de compra
5. Es contaminante
6. Su mantenimiento es caro
7. No es fácil de usar
8. Otro (especifique)

Pregunta no. 3:

¿Cree que los residuos de paneles fotovoltaicos pueden contribuir como peligro ambiental?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Si su respuesta es "sí", favor de explicar que tipos de peligros ambientales pueden causar

Opciones:

1. Contaminación de suelo
2. Contaminación del agua
3. Contaminación del aire
4. Daño a la salud humana
5. Otro

Pregunta no. 4:

¿Le gustaría tomar una iniciativa para enfrentar los problemas de los residuos fotovoltaicos? Opciones:

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 5:

En los países europeos, junto con muchos otros, existe un estándar bien establecido para el reciclaje de paneles fotovoltaicos. ¿Cree que se puede implementar aquí en México (o al menos en Yucatán)?

Respuesta

1. Me parece buena idea.
2. Me parece que a México le falta mucho.
3. Me parece que no es necesario

Pregunta no. 6:

En su opinión, ¿Quién cree que es el responsable de reciclar los paneles fotovoltaicos? Seleccione una respuesta.

Opciones:

1. Usuarios
2. Empresas que los fabrican
3. Gobierno
4. Empresas instaladoras
5. Usuarios y empresas fabricadoras
6. Empresas fabricadoras y gobierno
7. Usuarios y gobierno
8. Empresas instaladoras y usuarios
9. Gobierno y empresas instaladoras
10. Empresas instaladoras y fabricadoras
11. Todos (usuarios, empresas y gobierno)

Pregunta no. 7:

¿Apoyaría la ley o reglamento (estándar o norma) de reciclaje de paneles fotovoltaicos para el estado de Yucatán?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 8:

En su opinión, ¿Cuáles serían las partes interesadas para implementar y seguir estrictamente la ley o reglamento (estándar o norma) de reciclaje de los paneles fotovoltaicos en el estado de Yucatàn?

Opciones:

1. Sociedad
2. Empresas Instaladoras de panales fotovoltaicos
3. Empresas fabricantes de panales fotovoltaicos
4. Gobierno
5. Depende del seguimiento dado por el Gobierno

Pregunta no. 9:

¿Cree que las autoridades correspondientes deberían sancionar a los usuarios o empresas de un sistema de paneles fotovoltaicos por no seguir la ley de reciclaje (estándar o norma)?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 10:

¿Le interesaría saber si el panel fotovoltaico instalado en su casa, industria u oficina será o está siendo reciclado?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 11:

¿Estaría dispuesto a conservar y almacenar el registro de la certificación de reciclaje de su panel fotovoltaico (en caso de que este sea reciclado)?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 12:

Si pudiera obtener un incentivo de reciclaje en forma de ayuda financiera, ¿apoyaría y consideraría reciclar sus paneles fotovoltaicos?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 13:

¿Preferiría adquirir los paneles fotovoltaicos certificados por las empresas para garantizar el reciclaje al final de su vida útil?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 14:

¿Cree que su rol individual, como público, gobierno o empresa, puede influir y conducir a un cambio social, en este caso, la implementación de una ley, norma o norma para el reciclaje de paneles fotovoltaicos?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 15:

Nuestro análisis ha demostrado que existe un costo adicional asociado con el reciclaje de los paneles fotovoltaicos. ¿Estaría dispuesto a pagar más para reciclar su panel fotovoltaico al final de su vida útil?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 16:

Existe un costo adicional que está involucrado en el reciclaje de paneles fotovoltaicos. Este costo ronda el 15% del costo inicial de los paneles fotovoltaicos. ¿Qué crees que es cuánto debería participar cada actor en la distribución del costo total? Marque la opción más adecuada.

Opciones:

	No debería	Debería pagar menos del	Debe pagar entre el	Debería pagar entre el	Debería pagar alrededor	Debería pagar alrededor
--	------------	-------------------------	---------------------	------------------------	-------------------------	-------------------------

	pagar nada	20% del costo de reciclaje	20% y el 39% del costo de reciclaje	40% y el 59% del costo de reciclaje	del 60% al 79% del costo de reciclaje	del 80% al 100% del costo de reciclaje
Usuario						
Gobierno						
Empresas						

Pregunta no. 17:

¿Cree que necesitas más información sobre este tema?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 18:

¿Qué tipo de información necesita para ampliar su conocimiento sobre el tema?

Opciones:

1. Información técnica
1. Información acerca de costo
2. Información acerca de las normas

Pregunta no. 19

¿Cree que el gobierno y las empresas deberían iniciar talleres para educar a los usuarios del sistema de paneles fotovoltaicos sobre sus políticas de reciclaje?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Pregunta no. 20:

¿Cree que el reciclaje de paneles fotovoltaicos puede ser aceptado socialmente para el contexto mexicano a largo plazo?

Opciones:

1. Sí
2. No
3. No estoy seguro(a)

Comentarios: _____

Este es el final del cuestionario. Agradecemos su valioso tiempo.

APÉNDICE C: ARTÍCULO CIENTÍFICO EN REVISIÓN

Sustainable Cities
and Society

HOME • LOGOUT • HELP • REGISTER • UPDATE MY INFORMATION • JOURNAL OVERVIEW
MAIN MENU • CONTACT US • SUBMIT A MANUSCRIPT • INSTRUCTIONS FOR AUTHORS • PRIVACY

Submissions Being Processed for Author Daniela Abigail Abigail Hernández López, M. Eng

Action ▲	Manuscript Number ▲▼
Action Links	SCSI-D-21-01388

Title ▲▼

Does recycling solar panels make this renewable resource sustainable? Evidence supported by environmental, economic, and social dimensions

Authorship ▲▼	Initial Date Submitted ▲▼	Status Date ▲▼	Current Status ▲▼
Other Author	Mar 30, 2021	Apr 11, 2021	Under Review

APÉNDICE E: CERTIFICADO DE PLATICA SOBRE EL TEMA DE LA TESIS



Otorga el presente

Reconocimiento

a la: **ING. AMB. DANIELA ABIGAIL HERNÁNDEZ LÓPEZ**

Por haber impartido la plática virtual “Desarrollo Sustentable y Evaluación Ambiental de los Paneles Solares” a estudiantes de Ingeniería Industrial de la Universidad Mesoamericana de San Agustín

Mérida, Yucatán, 25 de marzo de 2021



Mtra. Arely Maricela Pavón Uc
Coordinadora Académica en Ingeniería Industrial e
Ing. en Gestión de Tecnologías de la Información.

REFERENCIAS

- Al-Waeli, Ali H.A., Hussein A. Kazem, K. Sopian, and Miqdam T. Chaichan. 2018. "Techno-Economical Assessment of Grid Connected PV/T Using Nanoparticles and Water as Base-Fluid Systems in Malaysia." *International Journal of Sustainable Energy* 37(6): 558–75.
- Ardente, Fulvio, Cynthia E.L. Latunussa, and Gian Andrea Blengini. 2019. "Resource Efficient Recovery of Critical and Precious Metals from Waste Silicon PV Panel Recycling." *Waste Management* 91: 156–67. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.059>.
- Beltrán, Leonardo Rodríguez, Rafael Rionda Alexandri, Juan Romero Herrera, and Oscar Galicia Ojeda. 2018. "Balance Nacional de Energía." *Secretaría de Energía, Subsecretaría de Planeación y Transición Energética*: 15.
- Bogacka, M., K. Pikoń, and M. Landrat. 2017. "Environmental Impact of PV Cell Waste Scenario." *Waste Management* 70: 198–203.
- Cervantes, Juan. 2013. "Ideology, Neoliberalism and Sustainable Development." *Human Geographies*.
- CFE (Comision Federal de Electricidad). 2018. "Consulta Tu Tarifa." 2017.
- Chang, Nathan L. et al. 2017. "A Manufacturing Cost Estimation Method with Uncertainty Analysis and Its Application to Perovskite on Glass Photovoltaic Modules." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 25(5): 390–405.
- Chang, Nathan L., Anita Ho-Baillie, Stuart Wenham, et al. 2018. "A Techno-Economic Analysis Method for Guiding Research and Investment Directions for c-Si Photovoltaics and Its Application to Al-BSF, PERC, LDSE and Advanced Hydrogenation." *Sustainable Energy and Fuels* 2(5): 1007–19.
- Chang, Nathan L., Anita Wing Yi Ho-Baillie, Doojin Vak, et al. 2018. "Manufacturing Cost and Market Potential Analysis of Demonstrated Roll-to-Roll Perovskite Photovoltaic Cell Processes." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 174: 314–24.
- Charles R., Landau. 2017. "Optimum Tilt of Solar Panels."
- Choi, Jun-Ki, and Vasilis Fthenakis. 2010. "Economic Feasibility of Recycling Photovoltaic Modules." *Journal of Industrial Ecology* 14(6): 947–64.
- Choi, Jun Ki, and Vasilis Fthenakis. 2014. "Crystalline Silicon Photovoltaic Recycling Planning: Macro and Micro Perspectives." *Journal of Cleaner Production* 66: 443–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.022>.
- Chowdhury, Md Shahariar et al. 2020. "An Overview of Solar Photovoltaic Panels' End-of-Life Material Recycling." *Energy Strategy Reviews* 27.
- Chung, Jaeshik, Bora Seo, Jooyoung Lee, and Jae Young Kim. 2021. "Comparative Analysis of I2-KI and HNO3 Leaching in a Life Cycle Perspective: Towards Sustainable Recycling of End-of-Life c-Si PV Panel." *Journal of Hazardous*

Materials.

- Coldwell, Pedro Joaquín et al. 2018. "Reporte de Avance de Energías Limpias Primer Semestre 2018 Secretaría de Energía: Elaboración y Revisión." : 21. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/418391/RAEL_Primer_Semestre_2018.pdf.
- Contreras Lisperguer, Rubén, Emilio Muñoz Cerón, Juan de la Casa Higuera, and Ricardo Díaz Martín. 2020. "Environmental Impact Assessment of Crystalline Solar Photovoltaic Panels' End-of-Life Phase: Open and Closed-Loop Material Flow Scenarios." *Sustainable Production and Consumption* 23: 157–73.
- Corcelli, Fabiana et al. 2018. "Sustainable Urban Electricity Supply Chain – Indicators of Material Recovery and Energy Savings from Crystalline Silicon Photovoltaic Panels End-of-Life." *Ecological Indicators* 94: 37–51.
- Creel, Juan E Bezaury et al. 2000. *Conservation of Biodiversity in Mexico: Ecoregions, Sites and Conservation Targets* .
- Cucchiella, Federica, Idiano D'Adamo, and Paolo Rosa. 2015. "End-of-Life of Used Photovoltaic Modules: A Financial Analysis." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47: 552–61.
- Cyrs, William D. et al. 2014. "Landfill Waste and Recycling: Use of a Screening-Level Risk Assessment Tool for End-of-Life Cadmium Telluride (CdTe) Thin-Film Photovoltaic (PV) Panels." *Energy Policy*.
- D'Adamo, Idiano, Michela Miliacca, and Paolo Rosa. 2017. "Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules." *International Journal of Photoenergy* 2017.
- Deng, Rong, Nathan L. Chang, Zi Ouyang, and Chee Mun Chong. 2019. "A Techno-Economic Review of Silicon Photovoltaic Module Recycling." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Dias, Pablo et al. 2021. "Comprehensive Recycling of Silicon Photovoltaic Modules Incorporating Organic Solvent Delamination – Technical, Environmental and Economic Analyses." *Resources, Conservation and Recycling*.
- Doi, Takuya et al. 2001. "Experimental Study on PV Module Recycling with Organic Solvent Method." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 67(1–4): 397–403.
- Domínguez, Adriana, and Roland Geyer. 2017a. "Photovoltaic Waste Assessment in Mexico." *Resources, Conservation and Recycling* 127(February): 29–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.013>.
- . 2017b. "Photovoltaic Waste Assessment in Mexico." *Resources, Conservation and Recycling* 127(February): 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.013>.
- Dubey, Swapnil, Nilesh Y. Jadhav, and Betka Zakirova. 2013. "Socio-Economic and Environmental Impacts of Silicon Based Photovoltaic (PV) Technologies." *Energy Procedia* 33: 322–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.073>.
- Duffie, John A., William A. Beckman. 2013. 4 Solar Energy Laboratory University of

- Wisconsin-Madison *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th ed. New Jersey: Wiley.
- ESMAP, SOLARGIS, WB, and IFC. 2019. "Global Solar Atlas." *Global Solar Atlas*.
- Frisson, L. et al. 2000. "Recent Improvements in Industrial PV Module Recycling." *16th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (May): 1–4.
- Fthenakis, Vasilis, Wenming Wang, and Hyung Chul Kim. 2009. "Life Cycle Inventory Analysis of the Production of Metals Used in Photovoltaics." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(3): 493–517.
- Fu, Yinyin, Xin Liu, and Zengwei Yuan. 2015. "Life-Cycle Assessment of Multi-Crystalline Photovoltaic (PV) Systems in China." *Journal of Cleaner Production* 86: 180–90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.057>.
- Goe, Michele, and Gabrielle Gaustad. 2014. "Strengthening the Case for Recycling Photovoltaics: An Energy Payback Analysis." *Applied Energy* 120: 41–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.036>.
- Huang, Wen Hsi et al. 2017. "Strategy and Technology to Recycle Wafer-Silicon Solar Modules." *Solar Energy* 144: 22–31.
- "Índice Nacional de Precios Al Consumidor (INPC), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)." 2019. *INEGI*.
- INEGI. 2014. Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2014 *Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México)*.
- IRENA. 2018. Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050 *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050*. Abu Dhabi.
- Kang, Sukmin et al. 2012. "Experimental Investigations for Recycling of Silicon and Glass from Waste Photovoltaic Modules." *Renewable Energy* 47: 152–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.030>.
- Kannan, Nadarajah, and Divagar Vakeesan. 2016. "Solar Energy for Future World: - A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62: 1092–1105.
- Klein, S A. 2010. "TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program." *Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA* 1: 1–5.
- Klugmann-Radziemska, Ewa et al. 2010. "Experimental Validation of Crystalline Silicon Solar Cells Recycling by Thermal and Chemical Methods." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94(12): 2275–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.07.025>.
- Klugmann-Radziemska, Ewa, and Anna Kuczyńska-Łażewska. 2020. "The Use of Recycled Semiconductor Material in Crystalline Silicon Photovoltaic Modules Production - A Life Cycle Assessment of Environmental Impacts." *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
- Latunussa, Cynthia E.L., Fulvio Ardente, Gian Andrea Blengini, and Lucia Mancini. 2016. "Life Cycle Assessment of an Innovative Recycling Process for Crystalline Silicon Photovoltaic Panels." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 156: 101–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>.

- “Lead Price (USD / Kilogram) .” 2020.
- Liu, Caijie, Qin Zhang, and Hai Wang. 2020. “Cost-Benefit Analysis of Waste Photovoltaic Module Recycling in China.” *Waste Management*.
- Maani, Thomas et al. 2020. “Environmental Impacts of Recycling Crystalline Silicon (c-Si) and Cadmium Telluride (CDTE) Solar Panels.” *Science of the Total Environment* 735: 138827.
- Mahmoudi, Sajjad, Nazmul Huda, and Masud Behnia. 2020. “Environmental Impacts and Economic Feasibility of End of Life Photovoltaic Panels in Australia: A Comprehensive Assessment.” *Journal of Cleaner Production* 260: 120996. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120996>.
- Mathur, N., S. Singh, and J. W. Sutherland. 2020. “Promoting a Circular Economy in the Solar Photovoltaic Industry Using Life Cycle Symbiosis.” *Resources, Conservation and Recycling* 155(August 2019): 104649. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104649>.
- McDonald, N. C., and J. M. Pearce. 2010. “Producer Responsibility and Recycling Solar Photovoltaic Modules.” *Energy Policy* 38(11): 7041–47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.023>.
- El Mekaoui, Amina, Rasikh Tariq, Othón Baños Ramírez, and P. E. Méndez-Monroy. 2020. “Sustainability, Sociocultural Challenges, and New Power of Capitalism for Renewable Energy Megaprojects in an Indigenous Mayan Community of Mexico.” *Sustainability (Switzerland)* 12(18): 7432.
- Navarro-Pineda, Freddy S., R. Handler, and Julio C. Sacramento-Rivero. 2017. “Potential Effects of the Mexican Energy Reform on Life Cycle Impacts of Electricity Generation in Mexico and the Yucatan Region.” *Journal of Cleaner Production* 164: 1016–25.
- Parisi, M. L. et al. 2020. “Prospective Life Cycle Assessment of Third-Generation Photovoltaics at the Pre-Industrial Scale: A Long-Term Scenario Approach.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 121(January): 109703. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109703>.
- “PerfectHome Solar Panels.” 2020.
- Plecher, H. 2020. “Mexico: Inflation Rate | Statista.” *Statista*.
- “PV Module Data Sheet of N-1J130 Kaneka Belgium N.V. Germany.” 2018.
- Samal Bex, Jose Maria Valenzuela Antonio Erias Cansu Karaka Corinna Grajetzki James Carton Mekalia Paulos Pirjo Jantunen Prajwal Baral. 2016. “World Energy Resources 2016.” *World Energy Council 2016*: 6–46. https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources_SummaryReport_2016.10.03.pdf.
- Sica, Daniela et al. 2018. “Management of End-of-Life Photovoltaic Panels as a Step towards a Circular Economy.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82(June): 2934–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.039>.
- Tariq, Rasikh et al. 2020. “Multidimensional Assessment of a Photovoltaic Air Collector

- Integrated Phase Changing Material Considering Mexican Climatic Conditions.” *Energy* 209: 118304.
- Tobergte, David R., and Shirley Curtis. 2013. 53 *Journal of Chemical Information and Modeling ILCD Handbook*.
- Tripathy, M., H. Joshi, and S. K. Panda. 2017. “Energy Payback Time and Life-Cycle Cost Analysis of Building Integrated Photovoltaic Thermal System Influenced by Adverse Effect of Shadow.” *Applied Energy* 208: 376–89.
- Vellini, Michela, Marco Gambini, and Valentina Prattella. 2017. “Environmental Impacts of PV Technology throughout the Life Cycle: Importance of the End-of-Life Management for Si-Panels and CdTe-Panels.” *Energy*.
- Venkatachary, Sampath Kumar et al. 2020. “Economics and Impact of Recycling Solar Waste Materials on the Environment and Health Care.” *Environmental Technology and Innovation*.
- Wade, Andreas, Parikhith Sinha, Garvin Heath, and Karsten Wambach. 2016. *IRENA And IEA PVPS (2016) - End-of-Life Management : Solar Photovoltaic Panels*.
- Wang, Teng Yu, Jui Chung Hsiao, and Chen Hsun Du. 2012. “Recycling of Materials from Silicon Base Solar Cell Module.” *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*: 2355–58.