

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA – ACV E ÍNDICES DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL
COMO HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN AMBIENTAL DE PANELES SOLARES DEL
PROYECTO “PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO GUAYEPO 400 MW, SU LÍNEA DE
EVACUACIÓN 500 kV Y BAHÍA DE CONEXIÓN”

ANA KATHERINE ARTETA BARRAGÁN
JUAN SEBASTIÁN GELVEZ MIRANDA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS LIMPIAS
BOGOTÁ D.C.
2023

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA – ACV E ÍNDICES DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL
COMO HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN AMBIENTAL DE PANELES SOLARES DEL
PROYECTO “PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO GUAYEPO 400 MW, SU LÍNEA DE
EVACUACIÓN 500 kV Y BAHÍA DE CONEXIÓN”

ANA KATHERINE ARTETA BARRAGÁN
JUAN SEBASTIÁN GELVEZ MIRANDA

Opción Trabajo de Grado

Directora:
Ing. Nidia Isabel Molina Gómez
MBA Sustainability Management
Doctora en Ingeniería del Agua y Medio Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS LIMPIAS
BOGOTÁ D.C.
2023

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, julio de 2023

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes personas:

A nuestras madres por el amor y apoyo incondicional que nos han brindado durante la maestría.

A nuestros padres, que desde el cielo nos acompañan e hicieron parte importante de nuestros sueños de ser mejores personas y profesionales.

A los compañeros que nos acompañaron durante estos dos años y nos brindaron su conocimiento y apoyo, de ellos aprendimos la importancia de la unión para poder cumplir con las metas y objetivos planteados.

A la doctora Nidia Isabel Molina Gómez por su invaluable conocimiento y apoyo para desarrollar este trabajo de grado.

CONTENIDO

GLOSARIO	10
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
1 INTRODUCCIÓN	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo general	16
2.2. Objetivos específicos	16
3 ANTECEDENTES	17
4 MARCO TEÓRICO	18
4.1 ENERGÍAS RENOVABLES	18
4.1.1 Energía solar.....	19
4.1.1.1 Placa solar fotovoltaica.	19
4.1.1.2 Fabricación de células (celdas) solares.	19
4.2 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA – ACV.....	20
4.3 DE LA CUNA A LA CUNA	21
4.4 ÍNDICADORES DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL.....	22
5 METODOLOGÍA.....	24
5.1 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN TEÓRICA	25
5.2 APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	26
5.3 FORMULACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL	27
6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	28
6.1.1 Componentes del Parque Solar Fotovoltaico Guayepo.....	29
6.2 APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	30
6.3 ÍNDICES DE SOSTENIBILIDAD.....	36

6.3.1	Huella de carbono.	36
6.3.2	Huella hídrica	37
6.3.3	Huella energética.....	38
6.4	METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL.....	41
6.4.1	Evaluación Ambiental del proyecto “Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 Mw, su Línea de Evacuación 500 kV y Bahía de Conexión” ..	41
7	IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO.....	47
8	CONCLUSIONES.....	48
9	RECOMENDACIONES.....	49
10	REFERENCIAS.....	50
	ANEXOS	55

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Cantidades de flujos de entrada y salida del proceso de fabricación de paneles solares	35
Tabla 2 Resultados de las huellas energética, hídrica y de carbono	40
Tabla 3 Conversión de los resultados de las huellas energética, hídrica y de carbono	40
Tabla 4 Rangos de importancia establecida en la evaluación ambiental del proyecto	41
Tabla 5 Valores de los estudios tomados en la ponderación.....	44
Tabla 6 Rangos de importancia de la huella hídrica	44
Tabla 7 Rangos de importancia de la huella de carbono	44
Tabla 8 Rangos de importancia de la huella energética	45
Tabla 9 Resultados valoración de importancia de los índices de sostenibilidad ambiental	45

LISTA DE FIGURAS

Fig 1 Proceso de elaboración de células solares.....	20
Fig 2 Esquema metodológico del proyecto.	24
Fig 3 Localización “Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 Mw, su Línea de Evacuación 500 kV y Bahía de Conexión”	28
Fig 4 Proceso de extracción de materias primas e insumos.....	30
Fig 5 Proceso de producción de silicio metalurgico	31
Fig 6 Proceso de purificación de silicio metalurgico	31
Fig 7 Producción de obleas de silicio.....	32
Fig 8 Producción de células.....	32
Fig 9 Ensamblaje del panel solar	33
Fig 10 Empaque y envío	33
Fig 11 Transporte nacional	33
Fig 12 Operación y mantenimiento	34
Fig 13 Desmantelamiento y/o abandono	34
Fig 14 Huella de carbono del proceso de fabricación, operación y desmantelamiento del panel solar	36
Fig 15 Huella de carbono de las etapas de transporte del panel solar	37
Fig 16 Huella hídrica del proceso de fabricación, operación y desmantelamiento del panel solar	38
Fig 17 Huella hídrica de las etapas de transporte del panel solar	38
Fig 18 Huella energética del proceso de fabricación, operación y desmantelamiento del panel solar	39
Fig 19 Huella energética de las etapas de transporte del panel solar	39

LISTA DE ANEXOS

Anexo A Resultados de importancia de los impactos ambientales del proyecto “PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO GUAYEPO 400 MW, SU LÍNEA DE EVACUACIÓN 500 kV Y BAHÍA DE CONEXIÓN”	55
Anexo B Diagrama de bloques del proceso de fabricación, operación y desmantelamiento del panel solar JKM-410-72H del Parque Solar Guayepo.	58

GLOSARIO

Para efectos de la lectura de este documento, se presenta a continuación el conjunto de términos y su correspondiente conceptualización, lo cual permitirá una mejor comprensión de los contenidos de este.

Análisis de ciclo de vida: El análisis de ciclo de vida – ACV es una metodología que evalúa de manera sistemática los impactos ambientales asociados con un producto, proceso o servicio a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas, la producción, el uso y el fin de vida. El ACV tiene en cuenta diferentes categorías de impacto ambiental, como el consumo de recursos naturales, las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación del aire, del agua y del suelo, entre otros. Se basa en la recopilación de datos detallados sobre las entradas y salidas de energía, materiales y emisiones en cada etapa del ciclo de vida, y utiliza modelos y herramientas de evaluación para cuantificar los impactos.

Aspecto ambiental: Un aspecto ambiental se refiere a cualquier elemento o componente de las actividades, productos o servicios de una organización que puede interactuar con el medio ambiente. Estos aspectos pueden tener un impacto positivo o negativo en el entorno natural. Los aspectos ambientales pueden abarcar una amplia gama de categorías, como el consumo de recursos naturales, la emisión de sustancias contaminantes, la generación de residuos, la utilización de energía, la gestión del agua, la biodiversidad, entre otros. Cada actividad o proceso de una organización puede tener múltiples aspectos ambientales asociados.

Célula solar fotovoltaica: Una célula solar fotovoltaica, también conocida como célula solar o célula fotovoltaica, es un dispositivo electrónico que convierte la energía de la luz solar directamente en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Está compuesta por capas de materiales semiconductores, generalmente de silicio, que tienen propiedades especiales para absorber la luz y generar corriente eléctrica.

Energía renovable: La energía renovable se refiere a fuentes de energía que se obtienen de fuentes naturales que son inagotables o que se regeneran de forma continua en un período de tiempo humano. Estas fuentes de energía aprovechan los recursos naturales disponibles, como la radiación solar, el viento, el agua en movimiento, la biomasa y el calor de la Tierra, para generar electricidad, calor o combustibles. A diferencia de los combustibles fósiles, que se agotan con el tiempo y generan emisiones de gases de efecto invernadero, las energías renovables son consideradas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Su uso contribuye a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, mitigar el cambio climático y promover la seguridad energética.

Energía Solar Fotovoltaica: La energía solar fotovoltaica es una forma de energía renovable que se obtiene a partir de la conversión directa de la luz solar en electricidad, utilizando células solares fotovoltaicas. Estas células solares están compuestas de materiales semiconductores, generalmente silicio, que absorben los fotones de la luz solar y generan una corriente eléctrica. El proceso de generación de energía solar fotovoltaica comienza con la radiación solar que incide sobre los paneles solares. Los fotones de la luz solar impactan sobre las células solares, liberando electrones y generando una corriente eléctrica. Los paneles solares están conectados en serie y/o en paralelo para obtener la tensión y corriente necesaria para su uso.

Impacto ambiental: El impacto ambiental se refiere a los efectos o alteraciones que una acción humana o actividad tiene sobre el medio ambiente. Estos impactos pueden ser positivos o negativos y pueden manifestarse en diferentes aspectos ambientales, como los recursos naturales, la biodiversidad, el clima, la calidad del aire, del agua y del suelo, entre otros. Los impactos ambientales pueden ser el resultado de diversas actividades humanas, como la industria, la agricultura, la construcción, el transporte y el consumo de recursos naturales. Estos impactos pueden ser directos, cuando están relacionados con la acción específica, o indirectos, cuando se derivan de efectos secundarios o en cadena.

Inversor: Un inversor, en el contexto de los sistemas fotovoltaicos, es un dispositivo electrónico que convierte la corriente continua (DC) generada por los paneles solares en corriente alterna (AC) utilizable en los sistemas eléctricos convencionales. Cuando los paneles solares captan la luz solar y generan electricidad en forma de corriente continua, el inversor toma esta corriente continua y la transforma en corriente alterna, que es la forma de electricidad que se utiliza en la mayoría de los dispositivos y sistemas eléctricos en hogares, empresas y la red eléctrica.

Panel solar fotovoltaico: Un panel solar fotovoltaico, también conocido como módulo solar, es un dispositivo compuesto por múltiples células solares fotovoltaicas interconectadas. Su función principal es captar la energía solar y convertirla en electricidad utilizable.

Seguidor solar: Un seguidor solar es un dispositivo mecánico que se utiliza en los sistemas fotovoltaicos para orientar los paneles solares de manera óptima hacia la posición del sol a lo largo del día. Su función principal es maximizar la captación de la luz solar y aumentar la eficiencia de los paneles solares. Un seguidor solar utiliza sensores o algoritmos para determinar la posición del sol en tiempo real y ajusta la orientación de los paneles solares para seguir su movimiento a lo largo del día. De esta manera, los paneles solares se mantienen siempre perpendiculares a los rayos del sol, lo que maximiza la radiación solar incidente y aumenta la producción de electricidad.

Sistema fotovoltaico: Un sistema fotovoltaico es un conjunto de componentes que se utilizan para captar la energía solar y convertirla en electricidad utilizable. Estos sistemas se basan en el principio de la conversión fotovoltaica, donde las células solares fotovoltaicas convierten la radiación solar en corriente eléctrica.

RESUMEN

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) estipula los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), el séptimo objetivo define que la energía debe ser limpia y accesible para todos, el término de “energía limpia” se asocia con energía renovable (ER), verde o sostenible, relacionada con tecnologías de bajo impacto ambiental, no obstante, las ERs presentan impactos negativos identificables principalmente a través del uso de herramientas como la Evaluación de Impactos Ambientales – EIA y el Análisis de Ciclo de Vida – ACV. El presente trabajo tuvo como fin evaluar desde la dimensión ambiental la sostenibilidad del proyecto Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 MW, su línea de evacuación 500 kV y Bahía de conexión mediante la aplicación de ACV e índices de sostenibilidad tales como huella de carbono, hídrica y energética para las etapas de fabricación de paneles (cuna) y termina con la eliminación o el reciclaje (tumba) de los componentes fotovoltaicos del proyecto.

Este trabajo inició con el análisis de la información del Estudio de Impacto Ambiental utilizado para otorgar la Licencia Ambiental del proyecto, en este proceso el enfoque estuvo en las actividades descritas en el EIA y los impactos ambientales que se evaluaron en cada una de las etapas. Con esta información se conocieron los componentes que hacen parte del parque solar. A partir de dicho conocimiento se realizó el análisis de ciclo de vida, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ISO 14040 y la aplicación del software aplicativo (SimaPRO). La información generada permitió determinar los índices de sostenibilidad del proyecto, incluyendo los relacionados con la fabricación de los paneles solares.

Dentro de los índices de sostenibilidad se calcularon los relacionados con la huella hídrica, de carbono y energética, que se utilizaron para formular la evaluación de impactos ambientales de la fabricación de los paneles solares que se integró a la evaluación del proyecto caso de estudio. Así mismo, el análisis de los resultados de SimaPRO y los índices de sostenibilidad de la fabricación de los paneles solares, fueron el insumo para aplicar la metodología de evaluación de impactos ambientales que servirán para los proyectos solares fotovoltaicos que se desarrollen en el país y su sostenibilidad desde el inicio y hasta su desmantelamiento y abandono.

De los resultados obtenidos, se tiene una huella hídrica de 0,35 m³, una huella de carbono de 328,21 kTon CO₂ eq y una huella energética de 536,28 Gwh durante la fase de fabricación de los paneles solares (para la totalidad de paneles requeridos en el parque solar Guayepo), estos valores fueron ponderados con el fin de calcular la importancia de estos impactos ambientales e integrarlos a la evaluación ambiental del proyecto caso de estudio, cuyos resultados de importancia de los tres índices fue irrelevante.

Lo anterior, permitió concluir que aun cuando dentro de la evaluación ambiental se involucre la fabricación de los paneles solares, los proyectos solares fotovoltaicos siguen siendo sostenibles ambientalmente, siempre y cuando se implementen las medidas de manejo de prevención, mitigación, control y compensación de los impactos ambientales identificados y evaluados.

ABSTRACT

The United Nations (UN) establishes the sustainable development goals (SDGs), the seventh goal states that energy must be clean and accessible for all. The term "clean energy" is associated with renewable (RE), green, or sustainable energy, related to low environmental impact technologies. However, REs present identifiable negative impacts mainly through the use of tools such as Environmental Impact Assessment – EIA and Life Cycle Analysis (LCA). This study aimed to evaluate the environmental sustainability of the Guayepo 400 MW Photovoltaic Solar Park project, its 500 kV evacuation line, and connection bay through the application of LCA and sustainability indices such as carbon, water, and energy footprint for the stages of panel manufacturing (cradle) and end-of-life disposal or recycling (grave) of the photovoltaic components of the project.

This work began with the analysis of the information from the Environmental Impact Assessment used to grant the Environmental License for the project. In this process, the focus was on the activities described in the EIA and the environmental impacts evaluated at each stage. This information allowed understanding the components that are part of the solar park. Based on this knowledge, a life cycle analysis was conducted following the guidelines established in ISO 14040 and using the SimaPRO software application. The generated information allowed determining the sustainability indices of the project, including those related to the manufacturing of solar panels.

Within the sustainability indices, those related to water, carbon, and energy footprints were calculated, which were used to formulate the environmental impact assessment of solar panel manufacturing integrated into the evaluation of the case study project. Likewise, the analysis of the SimaPRO results and the sustainability indices of solar panel manufacturing were inputs in the methodology for assessing the environmental impacts of photovoltaic solar projects developed in the country, from their inception to dismantling and abandonment.

From the obtained results, a water footprint of 0.35 m³, a carbon footprint of 328.21 kTon CO₂ eq, and an energy footprint of 536.28 GWh were obtained during the manufacturing phase of the solar panels (for the total number of panels required in the Guayepo solar park). These values were weighted to assess the significance of these environmental impacts and integrate them into the environmental assessment of the case study project, where the importance of the three indices was found to be irrelevant.

The above allowed us to conclude that even when the manufacturing of solar panels is included in the environmental assessment, photovoltaic solar projects remain environmentally sustainable if preventive, mitigating, controlling, and compensating measures for the identified and evaluated environmental impacts are implemented.

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de satisfacer y proveer energía para el desarrollo social y económico, para el bienestar humano, está aumentando considerablemente en relación con el incremento de la población mundial (Owusu & Asumadu-Sarkodie, 2016) y por ende, esta creciente demanda resulta en dos desafíos globales asociados a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y en el aseguramiento en el suministro de energía frente al cambio climático en el camino hacia un futuro sostenible (Asumadu-Sarkodie & Owusu, 2016).

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) indicó que un incremento de 1,5°C en la temperatura de la tierra producirá cambios en las dinámicas naturales del planeta (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022), por lo anterior, es de resaltar que las Naciones Unidas en el marco de la Conferencia de las Partes – COP26, tomó la decisión mediante el Pacto de Glasgow que para *“limitar el calentamiento global a 1,5 °C se requiere una intervención rápida, profunda y sostenida”*, además propender por la *“reducción de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, incluida la reducción del dióxido de carbono global en un 45 por ciento para 2030 en relación con el nivel de 2010 y hasta llegar a cero neto hacia mediados de siglo, así como profundas reducciones de otros gases de efecto invernadero”* (UNFCCC, 2021). Por esto, en el mundo se ha visto la necesidad de implementar medidas de transición energética como parte de la lucha contra el cambio climático, ya que el sector energético es un contribuyente esencial de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global por el uso de combustibles fósiles, por lo tanto, para enfrentar el cambio climático, se debe acelerar la transición hacia la descarbonización mediante el despliegue a gran escala de fuentes de energía renovable (Nik & Perera, 2020).

De acuerdo con el Plan Energético Nacional – PEN 2020-2050 (Unidad de Planeación Minero Energética, 2020), se plantea la reducción de Gases Efecto Invernadero a partir del cambio en la matriz energética nacional, la cual se basa principalmente en el uso de combustibles fósiles, con el fin de contar con diversas fuentes de energía y tecnologías que generen menos emisiones, entre las que se encuentra la implementación de proyectos de Parques Solares Fotovoltaicos, puesto que el país tiene un alto potencial solar energético. Si bien, este tipo de proyectos son considerados limpios por su baja generación de emisiones, no se pueden desconocer los posibles impactos ambientales que se producen durante la extracción de los materiales para la fabricación de los paneles solares y su posterior disposición en las etapas de desmantelamiento y abandono y por lo tanto, se debe identificar desde la perspectiva del Análisis de Ciclo de Vida – ACV.

Es el caso del proyecto “Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 MW, su línea de evacuación 500 kV y Bahía de conexión”, ubicado en los municipios de Ponedera y Sabanalarga, Departamento del Atlántico, el cual trae consigo beneficios ambientales y sociales para las comunidades que hacen parte de su área de influencia y para el país, puesto que, de acuerdo al Estudio de Impacto Ambiental – EIA, en el capítulo de Evaluación de Impacto Ambiental, el proyecto aportará a la generación de empleo, dinamización de la economía regional, aumento del potencial de generación eléctrica y promoción de acceso más equitativo al servicio eléctrico en zonas no interconectadas (ZNI); sin embargo, se hace

necesaria la cuantificación de la huella de carbono, hídrica y energética en la totalidad de etapas de este tipo de proyectos para conocer el impacto ambiental y social sobre la región.

Así las cosas, es necesario resaltar que la evaluación de impactos ambientales de dicho proyecto se realizó para sus etapas constructiva y operativa, sin incluir los generados en la fabricación de los componentes del parque solar, así como en el manejo y tratamiento de los residuos, posterior al desmantelamiento del proyecto.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario para el proyecto caso de estudio, la aplicación de un ACV dado que no se ha implementado este tipo de herramientas de análisis y por tanto no se ha cuantificado la huella de carbono, hídrica y energética, desconociendo los impactos que se generan desde la extracción de materias primas e insumos para la fabricación de paneles (cuna) hasta el tratamiento y disposición final (tumba) de los componentes fotovoltaicos del proyecto.

El objetivo principal del presente trabajo es la aplicación de un Análisis de Ciclo de Vida – ACV y los respectivos índices de sostenibilidad para la fabricación de paneles solares del proyecto escogido como caso de estudio “Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 MW, su línea de evacuación 500 kV y Bahía de conexión”. Para el desarrollo de la investigación, se realizó inicialmente la revisión documental del Estudio de Impacto Ambiental – EIA del proyecto caso de estudio, así como la información teórica relacionada con la fabricación de paneles solares incluyendo sus procesos, materiales, cantidades y residuos generados, con el fin de aplicar la información en el desarrollo del Análisis de Ciclo de Vida – ACV mediante el uso del software SimaPRO.

Por otro lado, se utilizaron los resultados obtenidos del ACV e índices de sostenibilidad ambiental en la aplicación de una metodología de evaluación de los impactos ambientales relacionados con la fabricación de los paneles solares que fue integrada con la evaluación ambiental del proyecto caso de estudio, generando una herramienta innovadora para la evaluación ambiental de los parques solares fotovoltaicos y que será un valor agregado para los proyectos del sector energético colombiano que cuentan con Licenciamiento Ambiental otorgado por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y las demás Autoridades Ambientales existentes en el país.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Aplicar un Análisis de Ciclo de Vida – ACV e Índices de Sostenibilidad Ambiental para evaluar ambientalmente los paneles solares del proyecto “Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 MW, su línea de evacuación 500 kV y Bahía de conexión”.

2.2. Objetivos específicos

- 2.2.1 Analizar la información en el marco del licenciamiento ambiental del proyecto “Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 MW, su línea de evacuación 500 kV y Bahía de conexión” incluyendo sus etapas preoperativas, constructiva y desmantelamiento y abandono.
- 2.2.2 Implementar el análisis de ciclo de vida para el proyecto caso de estudio, utilizando un software aplicativo, de acuerdo con la normatividad ISO 14040 y determinar los índices de sostenibilidad del proyecto con base en los resultados obtenidos del Análisis del Ciclo de Vida.
- 2.2.3 Estructurar una metodología de evaluación ambiental de los paneles solares por medio del análisis de los datos obtenidos en el ACV y los índices de sostenibilidad del proyecto evaluado.

3 ANTECEDENTES

La evaluación mediante el análisis de ciclo de vida – ACV es una herramienta ampliamente usada para conocer los impactos ambientales y el uso de energía de un producto a lo largo de su ciclo de vida (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015). Ludin et al., (2018) revisaron y evaluaron estudios de ACV sobre tecnologías fotovoltaicas como silicio, película delgada, célula solar de perovskita y célula solar sensibilizada con puntos cuánticos mediante diferentes metodologías de ACV como tiempo de recuperación de energía (EPBT), demanda acumulada de energía (CED) y tasa de emisión de GEI en donde se concluye que las tecnologías fotovoltaicas de silicio monocristalino presentan un mayor consumo de energía y la tasa de emisión de GEI más alta en comparación con las otras tecnologías de aprovechamiento solar fotovoltaica. Así mismo, Sherwani et al., (2010) presentaron una revisión del ACV de sistemas de generación de electricidad basados en energía solar fotovoltaica, desde la extracción de sílice hasta el ensamble final del panel, en donde se concluye que las células solares de módulos de película delgada consumen menos energía primaria en comparación con otro tipo de células sugiriendo más desarrollo en la eficiencia de las células solares y cantidad de material utilizado en el sistema, lo cual reducirá el requerimiento energético y las emisiones de GEI.

De manera integrada, Herrando et al., (2022) realizaron el análisis de ciclo de vida desde la cuna hasta la tumba de un sistema de energía solar para el suministro de calefacción, energía y refrigeración en un edificio mediante metodologías como el RéCiPe 2016 endpoint y la huella de carbono IPCC 2013 100 años, estableciendo al final del análisis que la energía solar presenta un 30% menos de impactos ambientales que el sistema de suministro basado en la red; además, propone que sistemas S-CCHP (refrigeración, calefacción y generación de electricidad) funcionales a partir de energía solar son una alternativa prometedora para reducir los impactos ambientales de los edificios, incluso en escenarios donde se presenten niveles bajos de irradiancia. El rendimiento energético y medioambiental de los sistemas de energía solar desde una perspectiva de ACV se ha evaluado ampliamente (Carolina et al., 2022; de Paula Teixeira, 2020; Ochoski Machado et al., 2020); sin embargo, la mayoría de los estudios se han enfocado en planes piloto o a pequeña escala, para el caso de energía solar fotovoltaica a escala de servicios públicos es insuficiente dado que principalmente se han evaluado las condiciones técnicas y operativas del sistema como el caso de Boddapati & Daniel, (2020) que evaluaron el rendimiento técnico-económico de un sistema de energía solar conectado a la red de 50 MW en la India.

A nivel local, en Colombia, Pasqualino et al., (2015) evaluaron los impactos ambientales producidos en el litoral del Caribe por la implementación de proyectos de energías eólica y solar, mediante la evaluación ambiental establecieron que los impactos no son significativos en las etapas de construcción y desmonte en cuanto a un sistema solar fotovoltaico, debido a que se trata de procesos temporales; durante la operación los impactos fueron prácticamente nulos. Sin embargo, este análisis no contempló una evaluación más profunda en cuanto a las materias primas e insumos utilizados para la fabricación de los paneles fotovoltaicos. Algo similar a la investigación realizada por Guzman Niño (2017) que evaluó los impactos ambientales asociados a diferentes materiales de fabricación de paneles solares bajo la metodología señalada en la norma técnica colombiana NTC 14040 y 14041, la huella de carbono fue de 11,65 kg CO₂ para la producción de paneles de Cd-Te mientras que para paneles de silicio el total calculado fue de 65,08 kg CO₂.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 ENERGÍAS RENOVABLES

El consumo energético mundial se ha disparado por la necesidad de mantener en funcionamiento todos los sectores que dan sustento a la sociedad, según (Enerdata, 2023), para el año 2022 el consumo energético se ralentizó, sin embargo, tuvo un crecimiento promedio de 2,1%, esto de acuerdo con las tendencias mundiales de crecimiento económico. Así las cosas, países como China (3.808 Megatoneladas de petróleo equivalente – Mtoe), Estados Unidos (2.182 Mtoe) e India (1.005 Mtoe) siguen siendo los más grandes consumidores de energía a nivel mundial. La misma fuente, establece que la matriz energética mundial está conformada por petróleo (30%), gas (23%), carbón (27%), electricidad (10%), biomasa (10%) y calor (0%).

Este exagerado uso de energía ha sido causante en gran parte del cambio climático, producido principalmente por los Gases Efecto Invernadero (GEI) generados por los combustibles fósiles, que han llevado al aumento de temperatura del planeta, el deshielo y consecuente aumento en el nivel del mar. Por lo anterior, el ser humano se ha visto en la necesidad de proponer soluciones que disminuyan los efectos del uso indiscriminado de combustibles fósiles, entre las que se encuentran el uso de las energías renovables.

Colombia enfrenta varios desafíos para asegurar el suministro de energía confiable, asequible y sostenible con el clima. Las bajas proporciones de reserva y producción de petróleo y gas, junto con el avance del cambio climático, están poniendo en riesgo el sistema energético del país. El Plan Energético Nacional prevé una hoja de ruta para la transición energética de combustibles fósiles hacia el uso de fuentes renovables, con el ánimo de disminuir las emisiones de GEI y cumplir las metas de reducción ratificadas para Colombia en el Acuerdo de París (Unidad de Planeación Minero Energética, 2020).

Se define como energías renovables, *“las que pueden producir trabajo a partir de fuentes inagotables, por lo menos a escala humana.”* (Jarauta Rovira, 2015, p. 7). Dentro de las energías de este tipo se encuentran la energía hidroeléctrica (utiliza el movimiento del agua), la energía eólica (usa la velocidad del viento), la biomasa (tiene como insumo la materia orgánica), la energía solar (utiliza la radiación solar), la energía geotérmica (transformación de la energía térmica de la tierra) y la energía del mar (denominada mareomotriz o undimotriz).

A continuación, se presenta el marco teórico referido a la energía solar, teniendo en cuenta que el presente trabajo de grado se relaciona al ciclo de vida de paneles solares, índices de sostenibilidad y evaluación de impactos de la fabricación de estos componentes de los parques solares fotovoltaicos:

4.1.1 Energía solar. Se cataloga como una de las fuentes de energía renovable con mayor potencial de aprovechamiento, debido a que la energía solar recibida por la tierra es 7500 veces la energía consumida mundialmente (Jarauta Rovira, 2015). Esta se usa de tres formas diferentes: energía solar térmica, la energía solar fotovoltaica y la energía termoeléctrica.

La energía solar fotovoltaica se considera una fuente de energía limpia, puesto que su funcionamiento presenta una afectación mínima en términos de emisiones atmosféricas. Para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica, se utilizan semiconductores que transforman la energía recibida en corriente continua denominados células solares (Tobajas, 2018, p. 8).

Las instalaciones fotovoltaicas se componen por: placa solar fotovoltaica, seguidor o estructura soporte, cableados para el transporte de electricidad y elementos de seguridad, acumulador, regulador, inversor, contador de energía eléctrica (Jarauta Rovira, 2015).

Placa solar fotovoltaica. Encargada de captar la radiación solar para transformarla en energía eléctrica. Está formada por celdas de silicio conectadas entre sí. Según (SUNFIELDS EUROPA, s.f.) los paneles solares existentes pueden ser monocristalino (rendimiento del 19% al 21%), policristalino (rendimiento del 15% al 19%) y amorfo (rendimiento del 6% al 7%).

Así mismo, (SUNFIELDS EUROPE, s.f.) informa que la superficie de los paneles solares oscila entre 1,7 m² y 2 m², la cual, según (Tobajas, 2018), es ensamblada en dos estratos, uno superior de silicio y otro inferior de material plástico y se colocan en un horno de alta temperatura, resultando en un solo bloque laminado al cual se le añaden los marcos de aluminio.

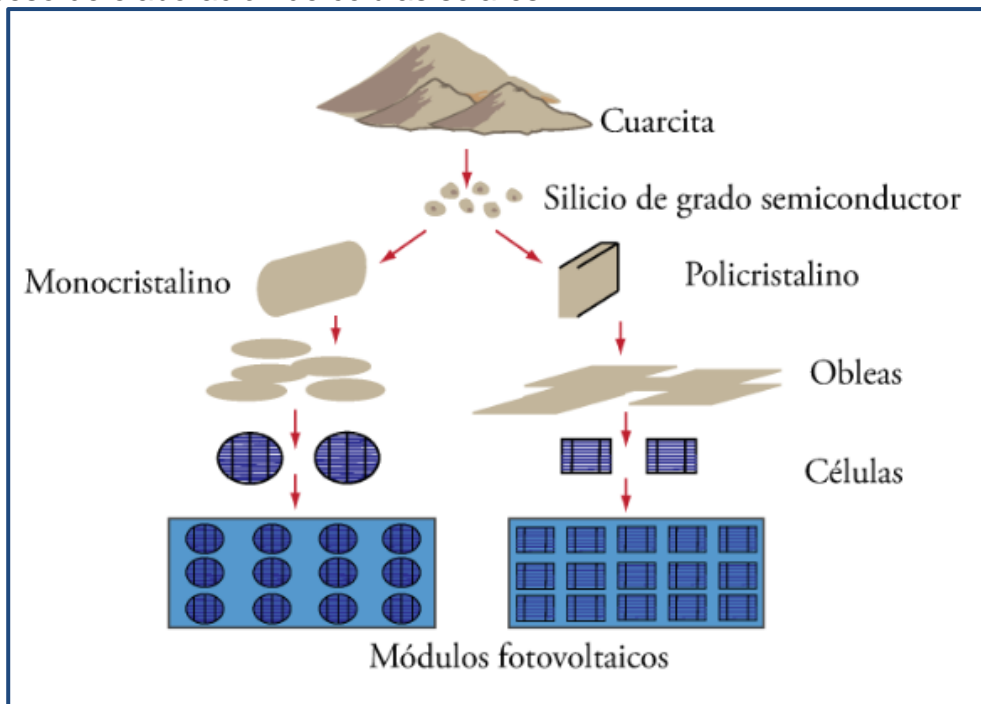
4.1.1.1 Fabricación de células (celdas) solares. Están formadas por la unión de dos materiales semiconductores de silicio dopado (impurezas en el silicio). El proceso de fabricación se da en tres etapas:

- Obtención de silicio de alta pureza: se obtiene a partir del óxido de silicio (SiO₂ – cuarzo), al cual se le extrae el oxígeno para posteriormente ser sometido a un proceso de purificación y ser transformado en plaquitas de silicio fotovoltaico.
- Obtención de obleas: a partir del polvo de silicio de alta pureza se hace crecer el monocristalino para obtener una pieza cilíndrica. La barra de silicio se corta para producir obleas de espesor aproximado de 300 µm.
- Procesado de la oblea: se realiza el pulido, formación de unión P-N, decapado y limpieza, capa ante reflectante, fotografía para formación de contactos, material para soldadura de electrodos y limpieza del decapante. Por último, se encapsulan y se forman los módulos o paneles.

En la

Fig 1, se presenta el proceso de fabricación de los paneles solares:

Fig 1 Proceso de elaboración de células solares.



Fuente: Tobajas, M. C. (2018). Energía solar fotovoltaica. Cano Pina. <https://elibro.net/es/ereader/usta/45047?page=10>

4.2 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA – ACV

El Análisis de Ciclo de Vida – ACV, se define como una herramienta metodológica que mide el impacto ambiental de un sistema a lo largo de todo su ciclo de vida, desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida. Así las cosas, el ACV se basa en el análisis de las entradas y salidas del sistema con el fin de obtener los resultados que muestren los impactos ambientales potenciales y así determinar estrategias de reducción (Alvarez Gallego, 2017).

Es de mencionar que para el análisis de ciclo de vida existen las normas ISO 14040 Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia y la ISO 14044 de 2021 Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. Requisitos del ciclo de vida.

Es así como en (ICONTEC, 2022) se establece que el ACV es una “*Recopilación y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida.*” Así mismo define que, un ACV ayuda a la identificación de oportunidades de mejora del desempeño ambiental de los productos, aporte de información a los tomadores de decisiones en la industria, organizaciones

gubernamentales o no gubernamentales, selección de indicadores de desempeño ambiental y en el marketing.

Según la mencionada norma, el ACV se desarrolla en cuatro fases a saber:

- Definición del objetivo y alcance: se define la profundidad y amplitud del ACV.
- Análisis del inventario: se realiza el inventario de los datos de entrada/salida. Se deben recopilar los datos para cumplir los objetivos.
- Evaluación del impacto ambiental: proporciona información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario de ciclo de vida.
- Interpretación: se resumen y discuten los resultados del inventario del ciclo de vida (ICV) y/o de la evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV), con el fin de tomar decisiones de acuerdo con el objetivo planteado.

Por otra parte, es de resaltar que (ICONTEC, 2022) define que el ciclo de vida de un producto debe contemplar desde la extracción de la materia prima, la producción de energía y materia y la fabricación, hasta el uso y el tratamiento al final de la vida útil y la disposición final.

4.3 DE LA CUNA A LA CUNA

Según (McDonough, 2012), el concepto de la cuna a la cuna es un paradigma en donde se plantea que los productos deben ser fabricados de una manera sostenible implementando ciclos cerrados de materiales, que al final de su vida útil puedan ser considerados como materias primas de alto valor, sin perder la calidad en todos sus ciclos de uso. Así las cosas, en su libro *Cradle to Cradle*, el autor compara este paradigma con el sistema de la naturaleza en donde el concepto de desecho no existe, así las cosas, plantea *“Eliminar el concepto de residuo significa diseñar las cosas -los productos, los embalajes y los sistemas- desde su puro origen, pensando que no existe el residuo.”*

De la cuna a la cuna es un instrumento consistente con el modelo de economía circular, el cual según (Albaladejo, Mirazo, & Franco Henao, 2021) se basa en los principios de eliminación de residuos y contaminación; mantener productos y materiales en uso y regenerar sistemas naturales. Es un modelo impulsado por el diseño y sustentado en el uso de energías y materiales renovables, generando así, soluciones para el desarrollo económico y las problemáticas *“como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, el incremento de residuos y de contaminación”*.

Por su parte, en el trabajo (Contreras, 2020) se ha definido que, para aplicar la filosofía de la cuna a la cuna en los proyectos de tecnología fotovoltaica, se debe apostar por la innovación, con el fin de tener control sobre los flujos de materiales y reducir costos de producción.

4.4 ÍNDICADORES DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

Los indicadores de sostenibilidad ambiental son una herramienta enfocada en la evaluación del progreso hacia el desarrollo sostenible permitiendo fortalecer procesos y políticas enfocadas a la sostenibilidad (Quiroga, 2001).

4.4.1 Principales indicadores de sostenibilidad ambiental. A continuación, se presentan los conceptos básicos de los indicadores más comunes:

4.4.1.1 Huella de carbono (HC). Cuantifica los gases de efecto invernadero (GEI) generados y emitidos por un producto durante la cadena de producción, donde en algunos casos, se incluyen las etapas de consumo y eliminación. El cálculo de la HC considera los seis (6) gases identificados en el Protocolo de Kioto los cuales son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (S_6); con el fin de expresar las emisiones de los diferentes gases en una unidad común, la HC se mide en toneladas equivalentes de dióxido de carbono (tCO_2e), a partir del potencial de calentamiento global (PCG) al cabo de 100 años.

La implementación de la HC permite formular actividades de mitigación y/o compensaciones enfocadas a la reducción de emisiones de GEI en el proceso que haya sido evaluada, lo cual implica, adaptación a nuevos procesos productivos, cálculos recientes de la HC y evaluación de resultados con el objetivo de medir la eficiencia de las actividades establecidas para tal fin (Frohmann & Olmos, 2013).

4.4.1.2 Huella hídrica. Es un indicador que busca calcular el consumo y contaminación del agua dulce de una empresa o proceso de manera directa o indirecta, dentro de su metodología de cálculo se incluye el agua verde, azul y gris, el primer concepto se define al consumo de agua almacenada en el suelo que mantiene la cobertura vegetal, es decir, satisface una demanda natural sin la intervención antrópica. Por otro lado, el concepto de agua azul hace referencia al consumo de agua asociado a la extracción del recurso de alguna fuente superficial o subterránea para satisfacer una demanda originada en un proceso, dentro de este concepto, se cuantifica el agua perdida por evaporación, trasvase de cuenca o incorporación de un producto, finalmente, el agua gris, se define como el volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga contaminante por parte de una fuente hídrica receptora de un vertimiento, para tal fin, se debe asociar sus resultados con los límites permisibles establecidos en la normatividad legal vigente (Jeswani & Azapagic, 2011; Vanham & Bidoglio, 2013).

4.4.1.3 Huella energética. La huella energética se refiere a la cantidad total de energía utilizada directa o indirectamente por un individuo, organización, producto o país a lo largo de su ciclo de vida. Es una medida que evalúa el impacto ambiental relacionado con el consumo de energía, teniendo en cuenta tanto el consumo

directo de combustibles fósiles y electricidad como el consumo indirecto de energía incorporada en los productos y servicios utilizados.

La huella energética abarca todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción y producción de los recursos energéticos hasta su transporte, transformación y uso final, así como la gestión de residuos y emisiones resultantes. Incluye tanto las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción y consumo de energía, como otros impactos ambientales, como la contaminación del aire, la degradación del agua y la generación de residuos.

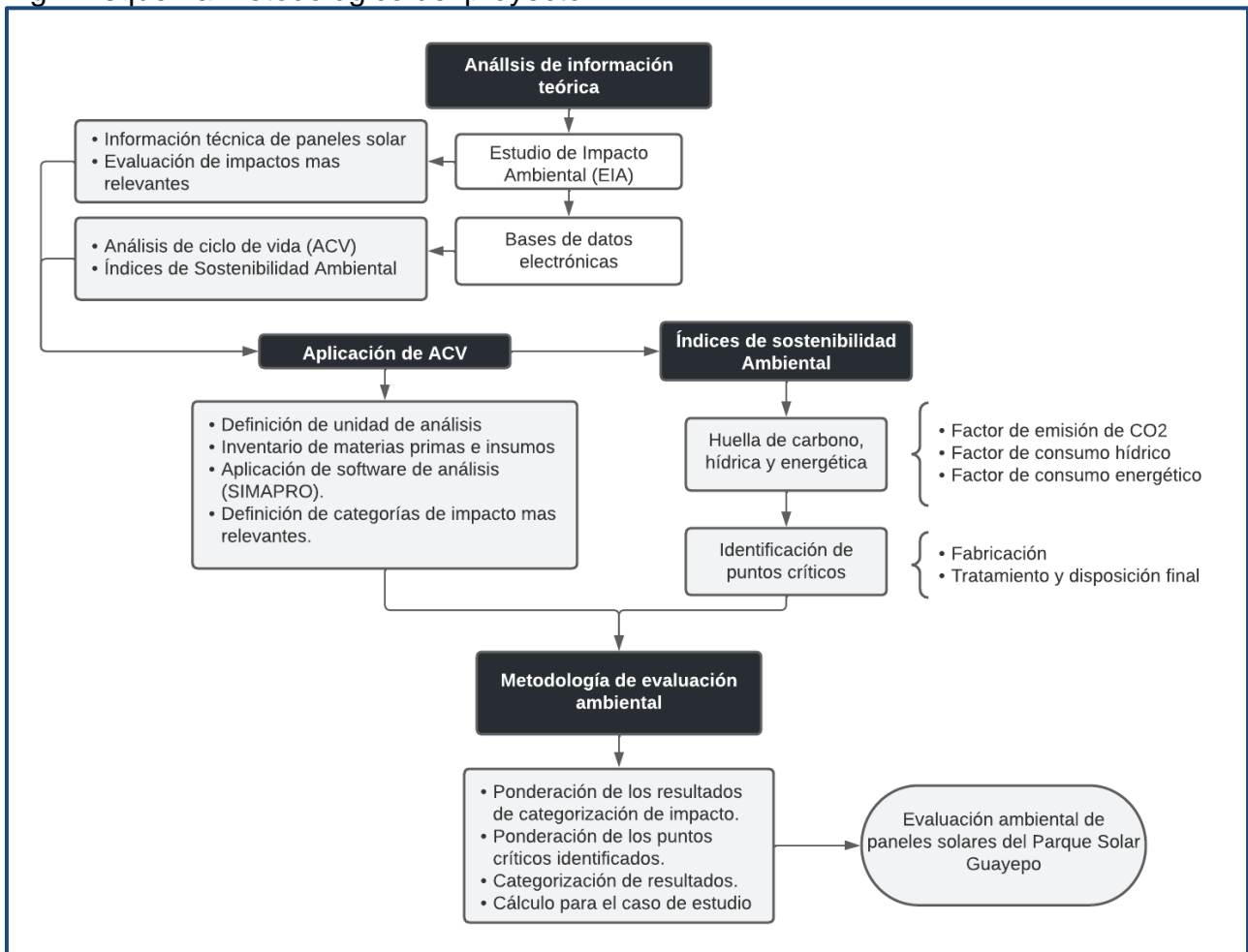
Calcular y reducir la huella energética es crucial para abordar el cambio climático y promover la sostenibilidad. Puede lograrse a través de medidas como la eficiencia energética, la adopción de fuentes de energía renovable, la optimización de procesos industriales y la elección de productos y servicios con menor impacto energético (Tarr et al., 2014).

5 METODOLOGÍA

El presente trabajo, consiste en la aplicación de un ACV y los índices de sostenibilidad ambiental, con el fin de evaluar ambientalmente los paneles solares del proyecto caso de estudio.

Para tal fin se inició con el análisis de la información relacionada con el proyecto caso de estudio, así como también la recolección de la información sobre análisis de ciclo de vida – ACV, la metodología existente para su aplicación en las normas estándares ICONTEC 14040 y 14044 y los Índices de Sostenibilidad Ambiental. Posteriormente se definieron las unidades funcionales para el desarrollo del ACV y se utilizó el software SimaPRO (versión 9.4.0.2, licenciado por la Universidad Santo Tomás) para dicho análisis. Finalmente, se realizó el cálculo de los índices de sostenibilidad ambiental, que fueron insumo junto con el ACV en la valoración de la metodología de evaluación ambiental de los paneles solares. En la Fig 2 se presenta el esquema metodológico, cuyas etapas se describen a continuación:

Fig 2 Esquema metodológico del proyecto.



Fuente: Los Autores

A continuación, se presenta el desarrollo metodológico del proyecto de grado:

5.1 ANALISIS DE INFORMACIÓN TEÓRICA

Se obtuvo el Estudio de Impacto Ambiental – EIA del proyecto caso de estudio del presente trabajo, por medio de la ventanilla del Centro de Asesoría al Ciudadano – CAC de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA. Dentro del análisis realizado de la información, se tomó la descripción general del proyecto, su localización y la evaluación de los impactos ambientales presentados para el licenciamiento ambiental, con el fin de conocer la metodología utilizada para tal fin, así como las actividades que se tuvieron en cuenta para su identificación y valoración.

Por otra parte, se tomó la información relacionada con el tipo de paneles a utilizar para la construcción y operación del parque, esto se constituyó en un insumo para definir las etapas de su fabricación y las materias primas a utilizar. Así las cosas, se recopiló información con el fin de realizar el inventario e identificar las materias primas, insumos y materiales utilizados en las diferentes etapas de fabricación del panel solar; dicho inventario se especificó para cada una de las etapas del proceso de fabricación que se obtuvo mediante la aplicación de la metodología de entradas y salidas definido en la ISO 14041.

Para la obtención de los datos utilizados en la elaboración del ACV se tuvo en cuenta la información reportada en el artículo Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review (Sherwani et al., 2010) donde se especifican los principales flujos en el proceso de fabricación de un panel de silicio de características similares a la unidad funcional evaluada en el presente documento. Es de mencionar que, hasta donde está el conocimiento de los autores, el proceso para la fabricación del panel objeto de estudio comprende las etapas de acuerdo con el autor mencionado anteriormente, aunado a que esta investigación es teórica, comprender a fondo este proceso implica la comunicación con los fabricantes, sin embargo en el desarrollo metodológico no se incluyó esta actividad, aunado que se tienen políticas de confiabilidad y por tanto la información no está disponible por parte del fabricante ni tiene fácil accesibilidad.

Adicionalmente, se realizó la revisión documental donde se define la metodología del Análisis de Ciclo de Vida y el cálculo de los índices de sostenibilidad tales como la huella hídrica, huella de carbono y huella energética.

Por último, dentro de la información teórica, se tomaron documentos oficiales tales como: Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero – Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (IDEAM, PNUD, MADS, DNP & CANCELLETERÍA., 2016), el Estudio Nacional del Agua 2022 (IDEAM, 2023) y el Informe proyección de demanda energía eléctrica, gas natural y combustibles fósiles 2022 – 2036 (UPME, 2023) con el fin de utilizar esta información para la ponderación en la evaluación ambiental de los resultados del ACV para la fabricación de los paneles solares.

5.2 APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Para la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida, se utilizó el Software SimaPRO (versión 9.4.0.2, licenciado por la Universidad Santo Tomás), en el cual inicialmente se realizó la definición del alcance del ACV, se recolectaron los datos que fueron incluidos dentro del Software, incluyendo el diagrama de flujo del proceso de fabricación de los paneles (Anexo B), así como los materiales e insumos con sus respectivas cantidades (Tabla 1), adicionalmente, se tuvieron en cuenta las emisiones asociadas a cada proceso, tal como se observará en el análisis de resultados. Posteriormente, se realiza la evaluación de impactos ambientales, aplicando las bases de datos aplicables del software que para el caso del presente trabajo de grado son los índices de sostenibilidad como huella de carbono, huella hídrica y huella energética, con el fin de realizar los cálculos y obtener los resultados.

A continuación, se presenta detalladamente la metodología utilizada para la aplicación del ACV para la fabricación de los paneles solares:

Unidad funcional: actúa como una medida de referencia en el sistema, con la que se puede comparar el comportamiento de las entradas y salidas de este, por lo tanto, en el presente estudio se tomó como unidad funcional un (1) panel solar de referencia JKM410M-72HL-V de 410 Wp, el cual constituye el sistema fotovoltaico del Parque Solar Guayepo.

El ACV de este tipo de panel solar muestra los once procesos involucrados desde la cuna a la tumba del panel. En general, los siete primeros procesos se relacionan directamente con la extracción de materias primas e insumos y la producción de las células de silicio que conforman el panel solar, seguidamente se tiene en cuenta el transporte aéreo y terrestre que conforma el tránsito del panel desde China hasta Colombia, finalmente se procede a su eliminación como residuo.

Para el cálculo de la huella de carbono se tomaron los datos de Calentamiento Global de la metodología RicePe 2016 Mindpoint (2016) que es una nueva versión del método ReCiPe 2008, creado por el RIVM (Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente), la Universidad Radboud, la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología y PRé Sustainability. En ReCiPe, se puede elegir utilizar indicadores de punto medio o indicadores de punto final.

Para la estimación de la huella hídrica se usa el método desarrollado por Berger et al., (2014) (Water Scarcity), el cual analiza la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas a la escasez de agua dulce. Basado en la escasez local de agua azul, el índice de agotamiento de agua (WDI, por sus siglas en inglés) indica el riesgo de que el consumo de agua pueda llevar al agotamiento de los recursos de agua dulce. La escasez de agua se determina relacionando el consumo anual de agua con la disponibilidad en más de 11,000 cuencas hidrográficas. Además, el WDI tiene en cuenta la presencia de lagos y acuíferos, que han sido descuidados en evaluaciones de escasez de agua hasta ahora.

Finalmente, la huella energética se calculó mediante el método de Demanda Energética Acumulada (CED, por sus siglas en inglés), basado en lo publicado porecoinvent versión 2.0 y ampliado por PRé Consultants para materiales primas disponibles en la base de datos de SimaPro 7. El método se basa en los valores de poder calorífico superior.

5.3 FORMULACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL

Para la formulación de la metodología de evaluación ambiental, se tomó como base la evaluación ambiental realizada al proyecto “Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 MW, su línea de evacuación 500 kV y Bahía de conexión”, en la cual por medio de la aplicación de Conessa Fernandez-Víttora, (2010) se identificaron las actividades del proyecto y los respectivos impactos ambientales generados, para posteriormente evaluar su importancia y clasificarlos según su naturaleza.

Con el fin de ponderar la importancia de los índices de sostenibilidad calculados con el ACV de la fabricación de los paneles solares, se utilizó la información de (IDEAM, 2023) sobre demanda hídrica nacional para el año 2022, así mismo el estudio de (IDEAM, PNUD, MADS, DNP & CANCELERÍA., 2016) en donde se presenta el inventario de emisiones del departamento del Atlántico en el año 2012 (donde se localiza el proyecto caso de estudio) por cada sector y para el caso de la huella energética se toma el estudio (UPME, 2023), en donde se encuentra la información de demanda comercial por región, para el caso se tomará el dato de la región Caribe.

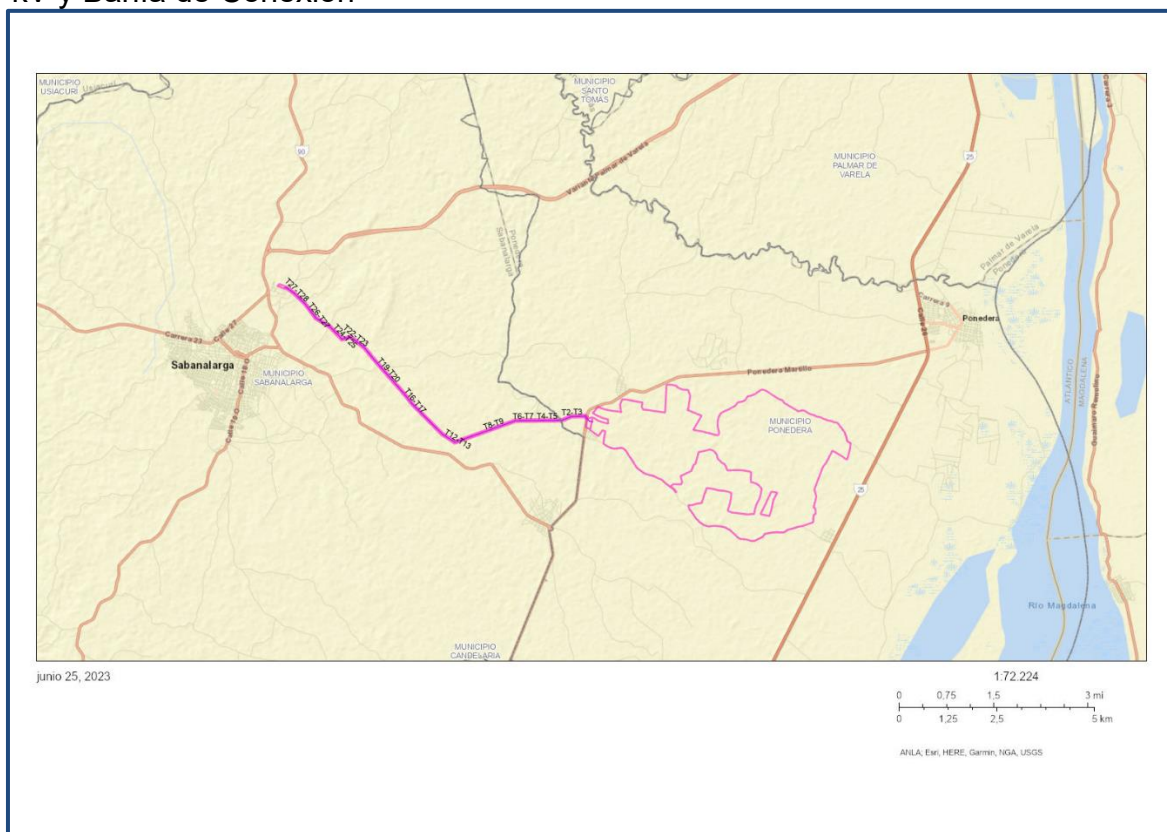
6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las generalidades del proyecto “Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 Mw, su Línea de Evacuación 500 kV y Bahía de Conexión”, así como los impactos ambientales identificados y evaluados en el documento del EIA se analizaron por medio de la revisión del Estudio de Impacto Ambiental (WSP, 2020), el cual reposa en los archivos de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA, a continuación, se presentan los resultados:

6.1 El “Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 Mw, su Línea de Evacuación 500 kV y Bahía de Conexión” es un proyecto de generación de energía eléctrica a partir de energías renovables no convencionales, con el fin de construir una central solar fotovoltaica que transmitirá la energía a la subestación existente Sabanalarga.

El proyecto, se localiza en el departamento del Atlántico, entre los municipios de Ponedera y Sabanalarga, así: en Ponedera se localiza el Parque Solar Fotovoltaico con un área de 1.339,32 ha, (polígono de color rosado claro), la servidumbre de la línea y la bahía de conexión; la línea de evacuación eléctrica partirá del parque, de la subestación Martillo y se dirigirá de oriente a occidente sobre el municipio de Sabanalarga hacia la subestación del mismo nombre (línea continua de color fucsia), como se observa en la Fig 3.

Fig 3 Localización “Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 Mw, su Línea de Evacuación 500 kV y Bahía de Conexión”



Fuente: Los Autores a partir del Sistema para el Análisis y Gestión de Información de Licenciamiento Ambiental – AGIL de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA. Consultado el 25/06/2023.

Es de mencionar que la localización del proyecto fue un referente para la información utilizada en la ponderación de los índices de sostenibilidad ambiental que fueron incorporados en la metodología de evaluación ambiental para el proyecto caso de estudio.

6.1.1 Componentes del Parque Solar Fotovoltaico Guayepo. El parque constará de 856.880 módulos o paneles aproximadamente con seguidores que los hacen estar perpendicularmente al sol con el fin de optimizar la producción de energía. Su organización es por filas de 48 módulos, con un total de 17.850 seguidores y 65 centros de transformación. A continuación, se realiza una breve descripción de los componentes del proyecto, caso de estudio:

- Generador fotovoltaico: dentro del Estudio de Impacto Ambiental del proyecto, se establece que se utilizarán los módulos fotovoltaicos JKM410M-72HL-V de 410 Wp, del fabricante JinkoSolar.
- Estructura de soporte y seguidores: según el EIA, se instalarán seguidores de estructura fija soportada por perfiles metálicos tipo C hincados directamente sobre el suelo.
- Cajas de conexión o cajas de string: las cajas de agrupación primaria, cajas de strings, serán de Poliéster de doble aislamiento, con grado de protección mínima IP65 para trabajar a la intemperie en condiciones severas de temperatura, radiación solar y humedad.
- Centro de transformación – CT: en el EIA se establece que el parque solar estará conectado a la red a través de un centro de transformación de instalación en superficie y maniobra exterior, el cual incluirá el equipo inversor, transformador de potencia, celdas de media tensión, cuadros de agrupación, cuadro auxiliar de BT, UPS local, cuadro de monitorización, transformador para servicios auxiliares.
- Inversor.
- Transformador de potencia: teniendo en cuenta que la electricidad producida por el parque es de baja tensión, es necesario elevarla a media tensión por medio del transformador al sistema.
- Celdas de media tensión de tipo modulares aisladas, sumando en cada CT dos celdas de línea y dos de protección con interruptor automático para el transformador.
- Integración: el Centro de transformación estará completamente integrado e interconectado interiormente para el correcto funcionamiento de todos los equipos instalados.
- Contador de energía y protecciones de interconexión: la generación de electricidad se mide mediante contadores bidireccionales de producción y autoconsumo. El autoconsumo es muy bajo gracias al régimen de switch-off de los convertidores durante la noche.

La descripción de las actividades y la infraestructura del proyecto es utilizada en la metodología de evaluación ambiental dentro de la identificación de impactos ambientales del proyecto sobre los medios abiótico, biótico y socioeconómico, así mismo, es relevante conocer esta información, ya que da cuenta que los resultados de la evaluación corresponden únicamente a las actividades del proyecto caso de estudio, desconociendo la fase de fabricación de paneles solares. Por otra parte, la información como el tipo de

paneles solares que utilizará el proyecto, junto con el fabricante y la cantidad, será tomada como insumo para la aplicación del ACV objeto del presente trabajo.

6.2 APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Para el Análisis de Ciclo de Vida, se usó del software SimaPro, el cual es un programa desarrollado por la empresa holandesa Pre Consultants para realizar estudios de ACV. Este software desarrolla el análisis, siguiendo la metodología establecida en la ISO 14040 con el fin de evaluar los impactos ambientales de un producto o proceso. Los resultados que se obtienen con la utilización de este programa se pueden visualizar a través de diagramas de barras, de flujos, de árbol y tablas exportables a formato *.xls Excel (Alvarez Gallego, 2017).

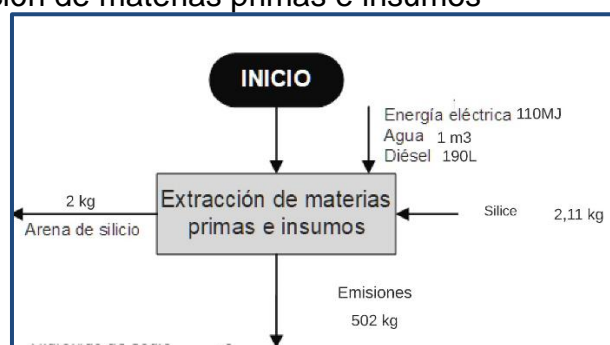
El alcance de un análisis de ciclo de vida – ACV evalúa y cuantifica los impactos ambientales asociados con todas las etapas del ciclo de vida del panel solar, desde la extracción de las materias primas utilizadas en su fabricación, pasando por el proceso de producción, distribución, instalación, uso y mantenimiento, hasta su disposición final o reciclaje.

Este enfoque integral permite comprender y evaluar el impacto ambiental total del panel solar a lo largo de su vida útil, considerando no solo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la huella de carbono, sino también otros indicadores ambientales como la huella hídrica y energética.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, se realiza a continuación una descripción de cada uno de los procesos que fueron incluidos en el ACV para el panel objeto de estudio, los cuales se observan en el Anexo B y cuyas cantidades se incluyen en la Tabla 1:

- Extracción de materias primas e insumos: las células solares producidas (incluida el panel objeto de estudio) usan como materia prima el silicio cristalino, el cual es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y en su forma natural se combina solo con el oxígeno, dióxido de silicio y silicatos. En el Fig 4 se observa el diagrama de flujo para este proceso:

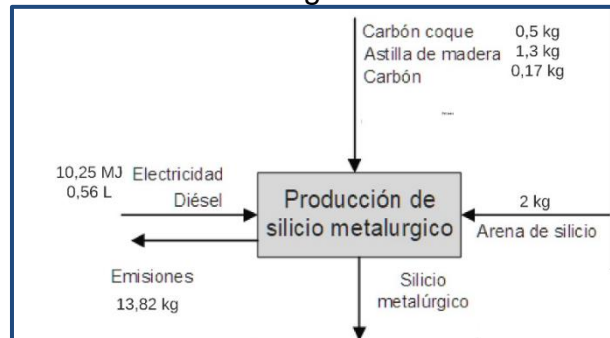
Fig 4 Proceso de extracción de materias primas e insumos



Fuente: Los Autores

- Producción de silicio metalúrgico: la producción de silicio metalúrgico involucra un consumo significativo de electricidad y se lleva a cabo en un horno de arco eléctrico. En este proceso, se obtiene silicio metálico a partir de la reacción de cuarzo a altas temperaturas y mediante la reducción de ciertos materiales, como el carbón. En la Fig 5, se incluye el diagrama de flujo de este proceso:

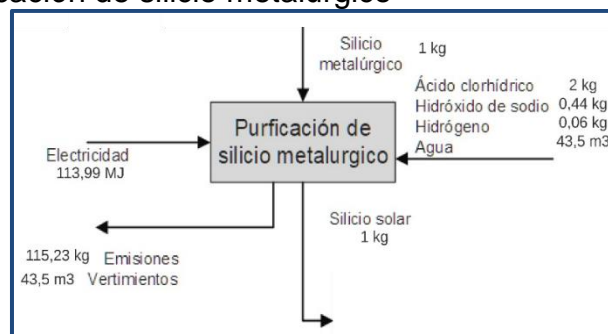
Fig 5 Proceso de producción de silicio metalúrgico



Fuente: Los Autores

- Purificación del silicio metalúrgico: la purificación del silicio metalúrgico es un proceso utilizado para eliminar las impurezas presentes en el silicio obtenido durante la producción metalúrgica. Estas impurezas pueden incluir elementos como hierro, aluminio, calcio y otros contaminantes que afectan la calidad del silicio y su uso en diversas aplicaciones. En la Fig 6 se presenta el diagrama de flujo de este proceso:

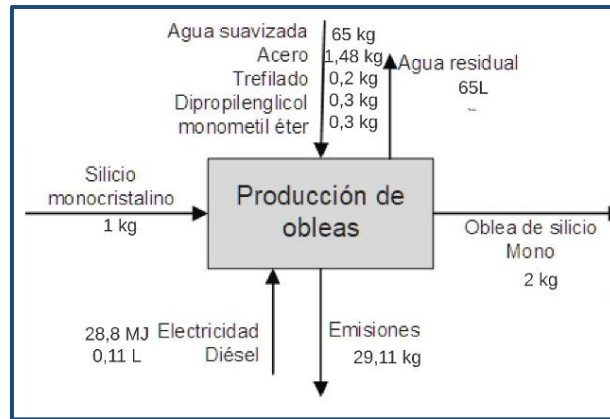
Fig 6 Proceso de purificación de silicio metalúrgico



Fuente: Los Autores

- Producción de obleas de silicio: el proceso de fabricación de obleas de silicio comienza con la realización de cortes en lingotes de silicio utilizando sierras de cinta o sierras de alambre en columnas. Posteriormente, las obleas resultantes se colocan en una sierra de múltiples hilos para dividir las en rodajas más delgadas. Luego, se lleva a cabo una etapa de limpieza utilizando diversos productos químicos para asegurar la eliminación de impurezas y garantizar la calidad de las obleas. En la Fig 7 se incluye el diagrama de flujo de este proceso:

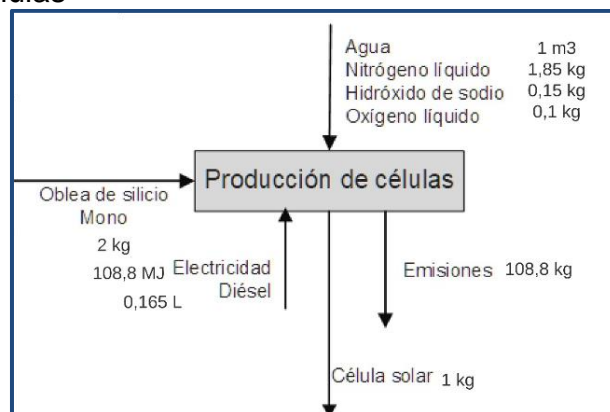
Fig 7 Producción de obleas de silicio



Fuente: Los Autores

- Producción de células: tras someterse a un tratamiento químico para eliminar impurezas e imperfecciones, las obleas pasan por un proceso de dopaje para crear la unión p-n. Una vez completado este proceso, se realiza una metalización en la parte delantera y trasera para permitir la conexión eléctrica. Posteriormente, se aplica un revestimiento antirreflectante con el objetivo de mejorar la eficiencia del panel solar (Guzman et al., 2017). En la Fig 8, se encuentra el diagrama de flujo de este proceso:

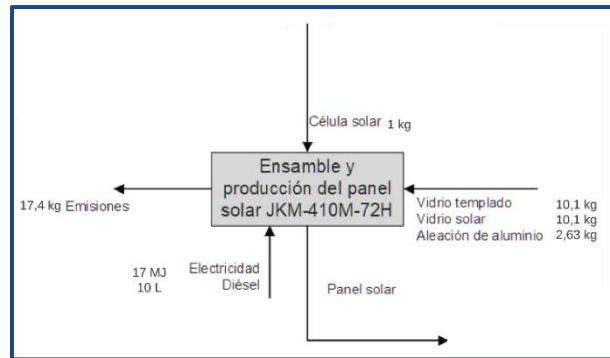
Fig 8 Producción de células



Fuente: Los Autores

- Ensamblaje del panel solar: el ensamblaje de un panel solar implica la integración de diferentes componentes para crear un sistema funcional que convierte la energía solar en electricidad. Comienza con la construcción del marco y la estructura, seguido de la unión de las obleas de silicio dopadas a las celdas solares. Se aplica una capa antirreflectante en la parte superior de las celdas y se añade una capa posterior y contactos eléctricos. Luego, las celdas solares y las capas anteriores se encapsulan entre láminas de vidrio o plástico para brindar protección y rigidez estructural. Se realizan las conexiones eléctricas finales y se llevan a cabo pruebas de calidad antes de la instalación del panel solar. En la Fig 9, se encuentra el diagrama de flujo de este proceso:

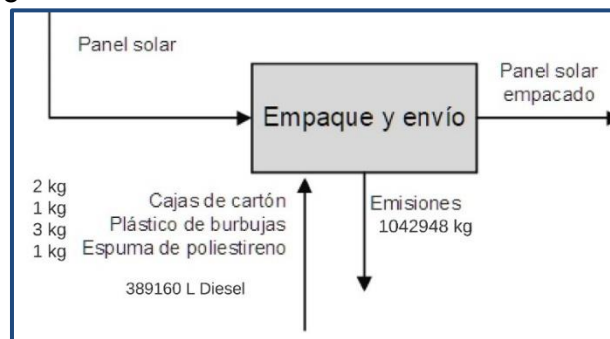
Fig 9 Ensamblaje del panel solar



Fuente: Los Autores

- Empaque y envío (transporte marítimo): esta etapa corresponde al transporte vía aérea desde el país de procedencia del panel (China) hacia Colombia donde se encuentra ubicado el proyecto objeto de estudio. En la Fig 10, se encuentra el diagrama de flujo de este proceso:

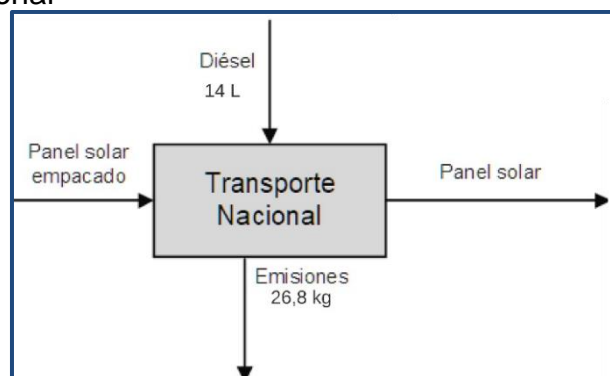
Fig 10 Empaque y envío



Fuente: Los Autores.

- Transporte nacional: una vez el panel llega a Colombia, este es recogido por camiones que realizan el traslado hacia la zona donde se instalarán. En la Fig 11 se incluyen el diagrama de flujo de este proceso:

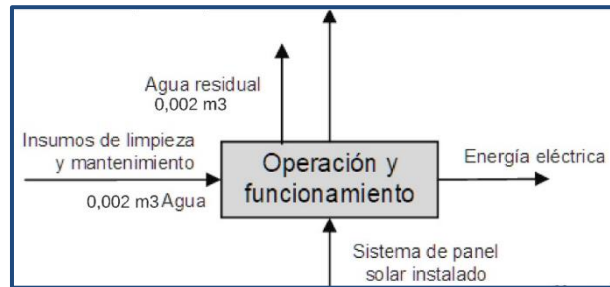
Fig 11 Transporte nacional



Fuente: Los Autores.

- Operación y funcionamiento: corresponde a la entrada en funcionamiento del sistema fotovoltaico y actividades de mantenimiento como limpieza. En la Fig 12 se incluye el diagrama de flujo de este proceso:

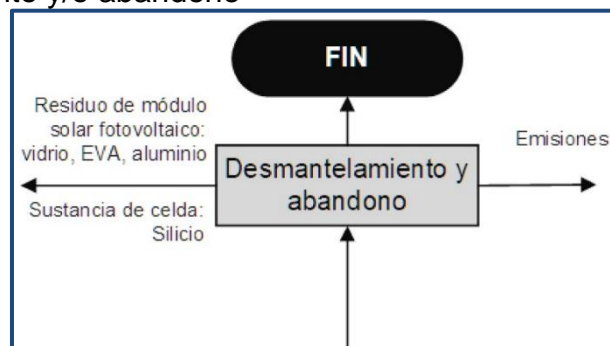
Fig 12 Operación y mantenimiento



Fuente: Los Autores.

- Desmantelamiento y/o abandono: etapa final donde se desmantela el parque solar y el panel se convierte en un residuo. En la Fig 13 se encuentra el diagrama de flujo de este proceso:

Fig 13 Desmantelamiento y/o abandono



Fuente: Los Autores.

Para los procesos anteriores al transporte y envío se utiliza la información de la base de datos del software registrado para el país de China, respecto a las materias primas e insumos, teniendo en cuenta que corresponde al país de origen y fabricación del panel objeto de estudio. Se seleccionó cada materia y se incluyó la cantidad expresada en la Tabla 1 con su respectiva unidad. Para los demás procesos, se obtuvo la información de la base de datos para Colombia, siguiendo la misma metodología mencionada.

Constituido el proceso completo de fabricación del panel, se evalúa mediante las metodologías de los índices de sostenibilidad descritas en el presente trabajo de grado.

Con base en las descripciones realizadas y los diagramas de flujo de cada proceso presentados anteriormente y con base la información disponible en los antecedentes de análisis de ciclo de vida realizado a paneles solares similares al objeto de estudio del presente documento, se establecieron las cantidades de los flujos de entradas y salidas en

el proceso de fabricación de 1 panel solar (referencia JKM410M-72HL-V de 410 Wp del fabricante JinkoSolar), las cuales se presentan en la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1 Cantidades de flujos de entrada y salida del proceso de fabricación de 1 panel solar JKM410M-72HL-V de 410 Wp del fabricante JinkoSolar

#	ETAPA	ENTRADAS	CANTIDAD	UNIDAD	SALIDAS	CANTIDAD	UNIDAD
1	Extracción de materias primas e insumos	Electricidad	110	MJ	Arena de sílice	2000	Kg
		Diesel	190	L	Emisiones	502	Kg
		Agua	1	m ³			
2	Producción de silicio metalúrgico	Arena de silicio	2,7	kg	Silicio metalúrgico	1	Kg
		Carbón coque	0,5	kg	Emisiones	13,82	kg CO ₂
		Astilla de madera	1,35	kg			
		Carbón	0,17	kg			
		Electricidad	10,25	MJ			
		Diesel	0,56	L			
3	Purificación de silicio metalúrgico	Silicio metalúrgico	1	kg	Silicio solar	1	Kg
		ácido clorhídrico	2	kg	Emisiones	115,23	kg CO ₂
		Agua	43,5	m ³			
		Hidróxido de sodio	0,44	kg			
		Hidrógeno	0,06	kg			
		Electricidad	113,99	MJ			
4	Producción de silicio monocristalino	Argón	0,27	kg	Emisiones	69,5	kg CO ₂
		Nitrógeno	0,05	kg	Silicio monocristalino	1	Kg
		Electricidad	69,5	MJ			
		Silicio solar	1	kg			
5	Producción de obleas	Agua	65	Kg	Agua residual	65	
		Acero	1,48	Kg	Emisiones	29,11	kg CO ₂
		Poliestireno	0,2	kg	Oblea de Silicio	2	Kg
		Alambre	1,49	kg			
		Monometil éter	0,3	kg			
		Electricidad	28,8	MJ			
		Diesel	0,11	L			
		Silicio monocristalino	1				
6	Producción de células	Oblea de silicio	2	kg	Agua residual	70	
		Agua	1	m ³	Emisiones	108,8	
		Nitrógeno líquido	1,85	kg	Célula solar	1	Kg
		Hidróxido de sodio	0,15	kg			
		Oxígeno líquido	0,1				
		Electricidad	108,8	MJ			
		Diesel	0,165				
7	Ensamblaje	Célula solar	1	kg	Emisiones	17,4	
		vidrio templado	10,1	kg	Panel	1	

#	ETAPA	ENTRADAS	CANTIDAD	UNIDAD	SALIDAS	CANTIDAD	UNIDAD
		vidrio solar	10,1	kg			
		Aleación de aluminio	2,63	kg			
		Electricidad	17				
		Diesel					
8	Empaque - envío	Cajas de cartón	2	kg	Emisiones	1042948,8	kg CO ₂
		Plástico	1	kg			
		Poliestireno	3	kg			
		Diesel	389160	L			
9	Transporte nacional	Diésel	14	L	Emisiones	26,8	Kg CO ₂
		Panel solar empacado	1	kg			

Fuente: Los Autores a partir de (Sherwani et al., 2010)

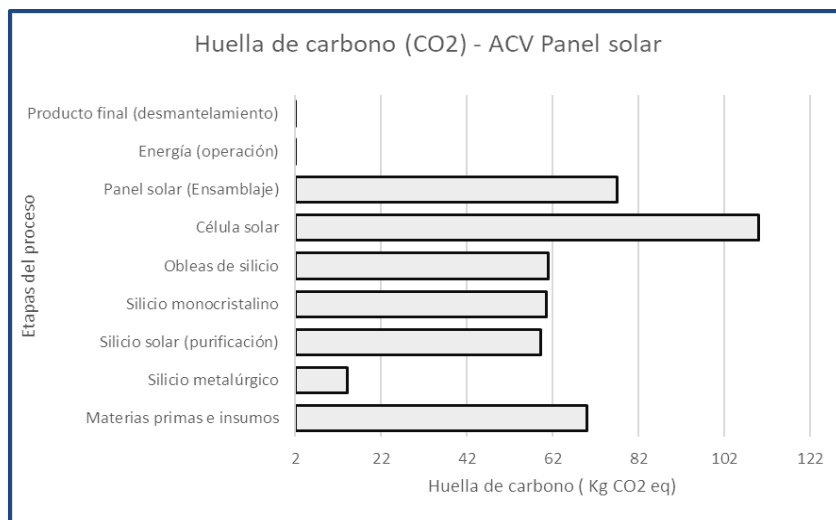
6.3 ÍNDICES DE SOSTENIBILIDAD

Inicialmente es pertinente mencionar que, los valores presentados en la Tabla 1 son el insumo principal para la construcción del modelo en el software SimaPRO y con estos se procedió a calcular los índices de sostenibilidad que se seleccionaron para el presente trabajo de grado, aplicando tres diferentes metodologías propias del software. En el software mencionado, se introdujo todo el proceso de fabricación por cada etapa descrita, incluyendo las materias primas e insumos, con sus respectivas cantidades.

6.3.1 Huella de carbono.

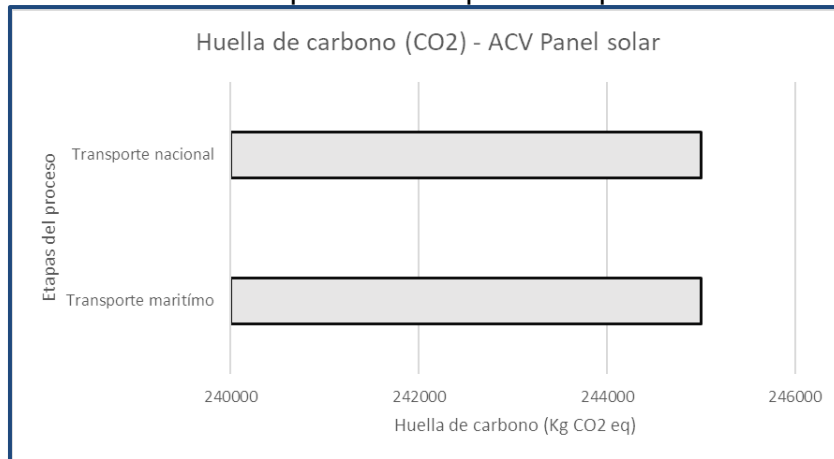
Con base en la metodología aplicada se presentan los resultados de la estimación de la huella de carbono, donde se expresa para cada etapa el resultado en unidades de kg CO₂ eq., a continuación, en las Fig 14 y Fig 15:

Fig 14 Huella de carbono del proceso de fabricación, operación y desmantelamiento del panel solar



Fuente: Los Autores

Fig 15 Huella de carbono de las etapas de transporte del panel solar



Fuente: Los Autores

A partir de la información presentada en las figuras 5 y 6, se puede indicar que, en el proceso productivo, la fabricación de célula solar es la etapa que más huella de carbono presenta, con un valor de 110 kg CO₂ eq, esto en relación con las materias primas del proceso donde se encuentra el silicio metalúrgico y el uso de energía requerida para el funcionamiento de equipos en el proceso, además de la quema de diésel que contribuye significativamente a la emisión de CO₂ en dicha etapa. Por otro lado, la etapa donde menos se genera dióxido de carbono, es la etapa operativa donde no se encuentra una emisión directa de CO₂ a la atmósfera, además, la huella en cadena del proceso se compensa en esta etapa por la producción de energía limpia por la operación de paneles. En total, se calcula una huella de carbono de 381,9 kg CO₂ eq.

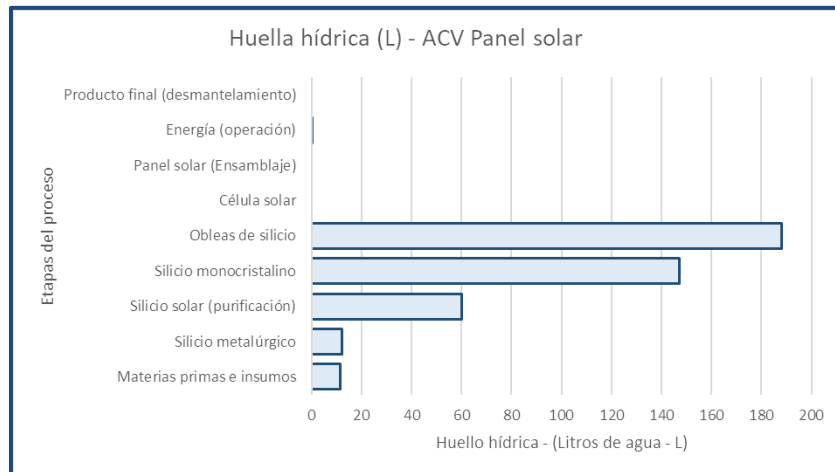
Por su parte, las actividades de transporte marítimo (de China a Colombia) y transporte nacional tienen una huella de carbono elevada, producto del uso de combustible en fuentes móviles como barcos y los vehículos de carga utilizados en el traslado de los paneles hacia el área del Parque.

6.3.2 Huella hídrica

En las

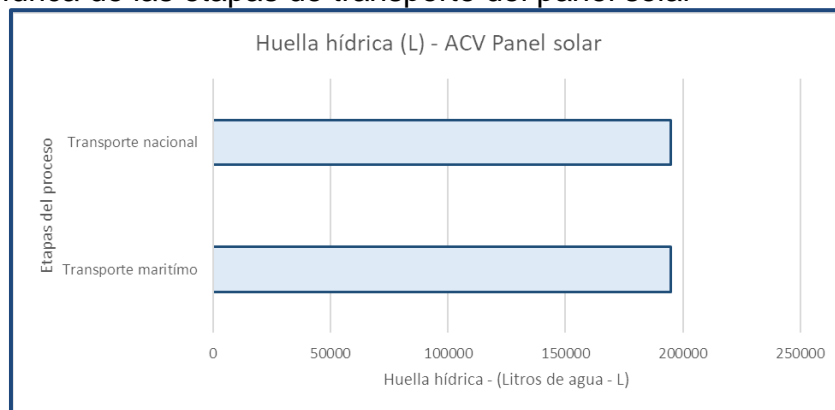
Fig 16 y Fig 17 se presentan los resultados del cálculo de la huella hídrica para las diferentes etapas del proceso evaluado.

Fig 16 Huella hídrica del proceso de fabricación, operación y desmantelamiento del panel solar



Fuente: Los Autores

Fig 17 Huella hídrica de las etapas de transporte del panel solar



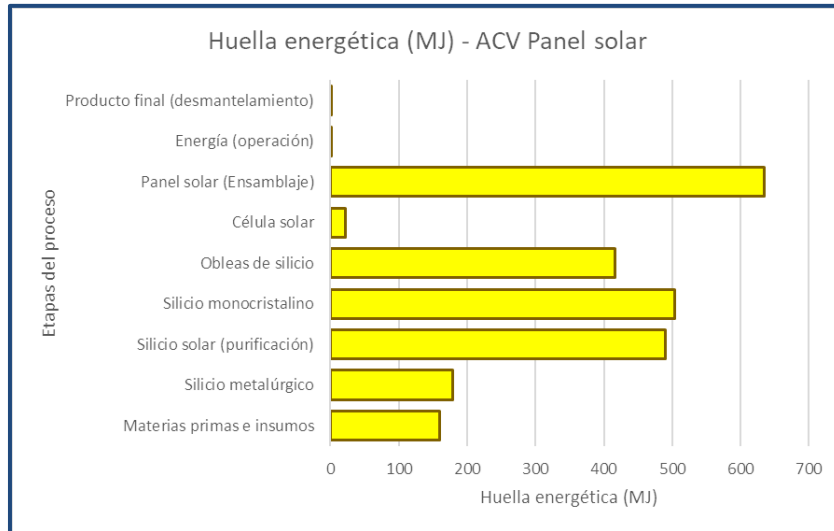
Fuente: Los Autores

En cuanto a la huella hídrica, se observa que la fabricación de la oblea de silicio es la etapa que más consumo de agua presenta, esto debido a que el proceso de purificación del mismo puede requerir grandes cantidades de agua para disolver y eliminar las impurezas; del mismo modo, durante la fabricación de obleas, se realizan procesos de corte y laminado para obtener la forma y el grosor deseados. Estos procesos pueden requerir refrigeración con agua para mantener las temperaturas adecuadas y garantizar la precisión del corte y el laminado, donde finalmente, las obleas de silicio deben ser sometidas a varios procesos de limpieza y acabado para eliminar cualquier contaminante y mejorar su calidad involucrando el uso de agua para enjuagar y limpiar las obleas, lo que contribuye a la huella hídrica. En total se estima el uso de 470,37 litros de agua en la fabricación de un solo panel solar

6.3.3 Huella energética

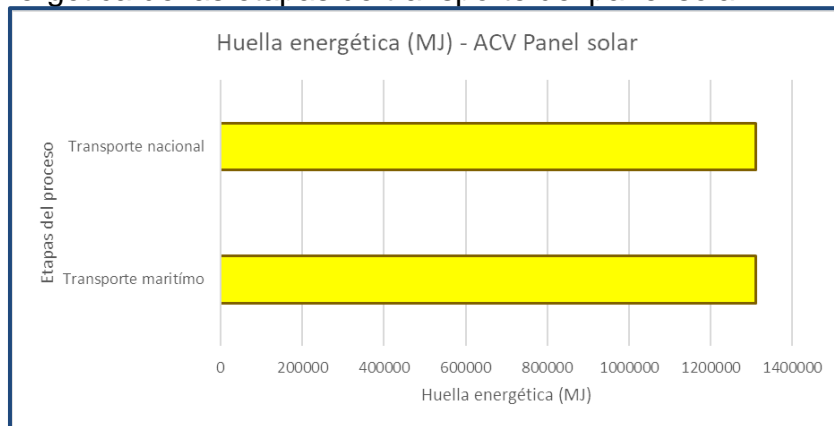
Finalmente, en las Fig 18 y Fig 19 se presentan los resultados obtenidos en la cuantificación de la huella energética del proceso evaluado.

Fig 18 Huella energética del proceso de fabricación, operación y desmantelamiento del panel solar



Fuente: Los Autores

Fig 19 Huella energética de las etapas de transporte del panel solar



Fuente: Los Autores

Los resultados del cálculo de la huella energética permiten establecer que la etapa de ensamblaje del panel solar presenta la mayor demanda energética con un valor de 635 MJ debido a que se requiere del uso de maquinaria y equipos que consumen energía, incluyendo la energía necesaria para cortar, soldar, laminar y ensamblar los diferentes componentes del panel solar. Así mismo, el transporte de los materiales desde los proveedores hasta la planta de fabricación requiere de energía para el sostenimiento de sus sistemas auxiliares, sistemas de comunicación, radares entre otros. Se estima una huella energética igual a 2246,86 MJ.

En cuanto a los medios de transporte de paneles solares hasta el área del parque solar, la principal demanda energética está relacionada con la propulsión de los buques. La mayoría de los buques utilizan motores diésel o motores de combustión interna que queman combustibles fósiles para generar energía y propulsar el buque. Esta energía se utiliza para girar las hélices o las turbinas y mover el buque a través del agua.

Los resultados obtenidos para los tres (3) índices aplicados corresponde al análisis ambiental de un solo módulo fotovoltaico, por lo que, para dimensionarlo al nivel del proyecto del parque Fotovoltaico Guayepo, cada índice se multiplica por los 856.880 módulos totales que constituyen en totalidad al proyecto. Se aclara, que no se tienen en cuenta las etapas de transporte debido a que, por el tamaño de los medios de transporte utilizados, estos no transportan únicamente un módulo fotovoltaico. Es así, que en la Tabla 2 se presenta la totalización de las diferentes huellas para el proyecto:

Tabla 2 Resultados de las huellas energética, hídrica y de carbono

Índice de sostenibilidad	Unidad	1 módulo fotovoltaico	Total Parque Solar Guayepo
Huella energética	MJ	2246,9467	1.927.983.688,30
Huella hídrica	L	407,367	349.454.634,96
Huella de carbono	kg CO ₂ eq	381,8846	327.719.276,05

Fuente: Los Autores

Los resultados obtenidos de las tres huellas analizadas se convierten a unidades de Gwh, millones de metros cúbicos (m³) y kilo toneladas de dióxido de carbono (CO₂), como se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3 Conversión de los resultados de las huellas energética, hídrica y de carbono

Índice de sostenibilidad	Unidad	Total Parque Solar Guayepo
Huella energética	Gwh	536,28
Huella hídrica	millones de m ³	0,35
Huella de carbono	kTon CO ₂ eq	328,21

Fuente: Los Autores

Dentro de los resultados logrados en el análisis del proceso del panel solar y los estudios leídos se han analizado diferentes tipos de paneles solares, aunque este estudio solo recoja los datos del panel solar de Silicio. Dentro de esta investigación de tipos de paneles solares el estudio de (Michela Vellini, 2017) muestra que la contaminación generada por el panel de Cd-Te (teluro de cadmio) es inferior.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo dicho por (Aguirre Telleria et al., 2022.) dónde se estipula que la producción de célula solar y ensamblaje del panel son los procesos más contaminantes en la cadena productiva por lo que mayoritariamente las medidas de mitigación deben enfocarse puntualmente en dichas etapas, así mismo, de acuerdo (Del Río et al., n.d.) los resultados cuantitativos del ACV permiten conformar un estudio medible y comparable sobre las afecciones al medio ambiente. Se observa igualmente, que el transporte constituye como tal el proceso con más impacto ambiental generado, sin embargo, se omite puesto que durante dicha actividad se transporta cierta cantidad de paneles y no solamente uno, lo anterior, teniendo en cuenta que la unidad de análisis del ACV elaborado es 1 solo panel solar.

6.4 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL

6.4.1 Evaluación Ambiental del proyecto “Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 Mw, su Línea de Evacuación 500 kV y Bahía de Conexión”. Dentro del EIA del proyecto, se realiza la evaluación de impacto ambiental por medio de la aplicación de la metodología propuesta por Conessa Fernandez-Vitora (2010). Dicha evaluación, se realizó teniendo en cuenta la caracterización de la línea base del área de influencia y la caracterización de las etapas y actividades propias del proyecto, con el fin de identificar y evaluar los impactos para los medios abiótico, biótico y socioeconómico.

A continuación, en la Tabla 4 se muestran los rangos de importancia utilizados en esta metodología de evaluación ambiental, los cuales son utilizados para equipararse con la ponderación de los índices de sostenibilidad calculados a partir del ACV para la fabricación de paneles.

Tabla 4 Rangos de importancia establecida en la evaluación ambiental del proyecto

Naturaleza	Importancia	Rango
Impactos naturaleza negativa	Irrelevante	-13 a -22
	Moderado	-23 a -40
	Severo	-41 a -59
	Grave	-60 a -77
	Crítico	>-78
Impactos naturaleza positiva	Considerable	13 a 30
	Relevantes	31 a 47
	Muy relevantes	48 a 100

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental EIA del Parque solar fotovoltaico Guayepo con capacidad de generación de 400mw, su línea de evacuación 500kv y bahía de conexión.

De acuerdo con la metodología presentada en el EIA, cada una de las categorías de importancia, se pueden definir de la siguiente manera:

- Irrelevante: en esta categoría se encuentran aquellos impactos ambientales que son considerados no significativos y que la afectación o efecto es mínima sobre el ambiente. Así las cosas, estos impactos en el EIA presentan las siguientes características: recuperabilidad inmediata; reversibilidad inmediata; persistencia momentánea.
- Moderado: son aquellos impactos ambientales considerados significativos pero que pueden ser manejados mediante medidas de manejo ambiental de prevención, mitigación, control y compensación. Estos impactos presentan las siguientes características, según el EIA: recuperabilidad corto plazo y mediano plazo; reversibilidad en el corto y mediano plazo y persistencia temporal en el mediano plazo.
- Severo: son aquellos impactos ambientales que se consideran muy significativos y cuyos efectos en el medio ambiente son de gran magnitud. Dentro del EIA se incluyen para esta categoría, las siguientes características: recuperable a largo plazo, así mismo, se consideran mitigables; así mismo es reversible a largo plazo

y persistente a largo plazo. Así mismo, se consideran que podrían ser mitigables e irreversibles, por lo que se hace necesario la implementación de medidas de manejo ambiental.

- Grave: son aquellos impactos muy significativos que pueden generar daños al ambiente. Caracterizados en el EIA como reemplazables, sustituibles y compensables, reversibles en el corto, mediano y largo plazo o irreversibles y de persistencia temporal (en el caso de los reversibles) y permanentes en el caso de los irreversibles. Por lo general estos impactos pueden contar con medidas de manejo ambiental o deben ser compensados.
- Critico: son aquellos impactos ambientales que generan efectos negativos muy significativos inmediatos y de largo alcance. Según el EIA, se caracterizan por ser irrecuperables, irreversibles y permanentes. De acuerdo con lo incluido en el EIA del proyecto caso de estudio, estos impactos no son deseables ya que inviabilizan ambientalmente este tipo de proyectos, ya que las medidas de manejo no podrían manejarlos en su totalidad.
- En cuanto a los impactos de naturaleza positiva, se consideran considerables, relevantes y muy relevantes y están asociados a todos aquellos que generan un beneficio ambiental y social, para el caso del EIA, son los asociados al medio socioeconómico y actividades de desmantelamiento que producen la recuperación del ambiente del área de influencia del proyecto.

Es de mencionar que dentro de la evaluación ambiental que se realizó en el EIA presentado a la Autoridad Ambiental para licenciamiento ambiental, se identificaron las actividades asociadas a las fases preoperativa, gestión y preparación, constructiva (actividades transversales), constructiva del parque solar, constructiva de la línea de evacuación, operativa de la línea de evacuación y post-operativa de la línea de evacuación, para el caso de estudio, se revisan las actividades asociadas al parque solar. En el presente trabajo, se presentan los resultados de la identificación y posterior evaluación de impactos ambientales realizada de acuerdo con la metodología establecida en el estudio de impacto ambiental. En el Anexo A, se presenta la matriz de evaluación de impactos ambientales, con base en el EIA aportado para el licenciamiento ambiental.

Dentro de los resultados principales del análisis de la evaluación de impactos realizada en el EIA, se tiene:

- Se identificaron un total de 28 actividades que potencialmente generarían impactos ambientales por parte del proyecto caso de estudio, las cuales se dividen así: 8 actividades de la fase transversal, 10 actividades asociadas a la fase constructiva, 3 actividades asociadas a la operación y 7 asociadas a la fase post-operativa.
- En la fase de actividades transversales de la construcción, se observa en general que se dieron un total de 58 interacciones entre actividades e impactos ambientales. El impacto ambiental modificación en las coberturas vegetales fue valorado como grave y en interacción con la actividad remoción cobertura vegetal, descapote y aprovechamiento forestal y los impactos ambientales alteración de hábitats de la fauna local, alteración de las especies florísticas endémicas, amenazadas, vedadas y de importancia ecológica, económica y cultural, cambios en la composición y estructura de la fauna silvestre,

modificación de la conectividad de ecosistemas y modificación en las coberturas vegetales, fueron valorados como severos. Así mismo se identificaron y valoraron impactos ambientales moderados e irrelevantes, así como algunos positivos, asociados generalmente a actividades de desmantelamiento que producen recuperación del ambiente y la generación de bienes y servicios.

- Para las actividades constructivas, se presentaron un total de 46 interacciones. Dentro de los impactos ambientales identificados y valorados como severos se tienen: alteración de hábitats de la fauna local por el desarrollo de las actividades adecuación y construcción de obras de drenaje y explanación, movimiento de tierra y nivelación del terreno; alteración de la calidad y fragilidad visual del paisaje por la actividad montaje de paneles, alteración de las propiedades fisicoquímicas y/o microbiológicas del suelo asociado a las actividades apertura de zanjas e instalación de cableado y explanación, movimiento de tierra y nivelación del terreno; alteración de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del agua superficial por la actividad de explanación, movimiento de tierra y nivelación del terreno; cambio en la actividad económica del suelo generado por montaje de paneles y cambios en la composición y estructura de la fauna silvestre asociados a las actividades de adecuación y construcción de obras de drenaje y explanación, movimiento de tierra y nivelación del terreno. Los demás impactos ambientales identificados y valorados fueron considerados moderados e irrelevantes, así como algunos de carácter positivo.
- Para la fase operativa del parque solar, se encontraron 7 interacciones entre impactos ambientales y actividades. Dentro de los impactos ambientales identificados y valorados se tienen: alteración de hábitats de la fauna local (irrelevante), alteración en los niveles de radiación (severo), cambio de las condiciones de seguridad (severo), cambio en la oferta y demanda de bienes y/o servicios (positivo relevante), cambio en los niveles eléctricos y magnéticos (severo) y cambios en la composición y estructura de la fauna silvestre (irrelevante).
- Para la fase post-operativa del Parque Solar y subestaciones, se presentan un total de 32 interacciones. Se identificaron y valoraron 6 impactos severos así: alteración de la calidad del aire por material particulado, alteración de la infraestructura social y de servicios existente, alteración de las propiedades fisicoquímicas y/o microbiológicas del suelo, alteración de los niveles de presión sonora, alteración del patrimonio histórico y arqueológico, cambios en el riesgo de accidentalidad y modificación de las condiciones de movilidad. Los demás impactos ambientales identificados y valorados son positivos considerables y relevantes.

Es de mencionar que en esta evaluación de impactos realizada dentro del EIA no se tienen en cuenta los impactos ambientales generados por la fabricación de paneles solares, por lo que mediante el uso de los resultados del ACV y los índices de sostenibilidad se realizó la integración de estos para el proyecto caso de estudio.

Lo anterior, realizando la ponderación en donde se establecen los valores de importancia, equiparables con la valoración cualitativa de la metodología de Conessa Fernández-Vittora (2010) (usada en la evaluación ambiental para el proyecto caso de estudio), relacionando los valores de huella hídrica azul del sector industrial para el año 2020, emisión de gases efecto invernadero para las industrias manufactureras del departamento del Atlántico y la

Demanda comercial por región para la Costa – Caribe, los cuales se incluyen en la Tabla 5:

Tabla 5 Valores de los estudios tomados en la ponderación

Nombre	Valor
Valor huella hídrica azul sector industrial (millones m ³ /año)	212
Valor emisión gases efecto invernadero - GEI industria manufacturera – Atlántico (kTon CO ₂ eq)	1629,71
Valor Demanda comercial por región (GWh-año)	20.107

Fuente: Los autores a partir de IDEAM, (2023) Estudio Nacional del Agua, (IDEAM, PNUD, MADS, DNP & CANCELLERÍA., 2016) Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero – Colombia y UPME (2023) Proyección demanda energía eléctrica, gas natural y combustibles líquidos 2022 – 2036.

Posteriormente, se establecieron los rangos con su calificación y su valoración cualitativa de importancia, dividiendo los valores obtenidos de los estudios en porcentajes iguales del 20%. Así mismo, para hacer comparables los valores obtenidos en el ACV, se convierte la unidad teniendo en cuenta que las cantidades se generarían en un año.

En la Tabla 6, se presentan los rangos de importancia de la huella hídrica incluyendo la calificación y valoración cualitativa de importancia.

Tabla 6 Rangos de importancia de la huella hídrica

Valor huella hídrica azul (millones m ³)	Calificación	Valoración importancia
≤53	0,2	Irrelevante
54 - 107	0,4	Moderado
108 - 161	0,6	Severo
162 - 211	0,8	Grave
≥212	1	Crítico

Fuente: Los Autores, tomando como referencia tabla 47 del IDEAM (2023). Estudio Nacional del Agua. p 256

En la Tabla 7, se presentan los rangos de importancia de la huella de carbono incluyendo la calificación y valoración cualitativa de importancia.

Tabla 7 Rangos de importancia de la huella de carbono

Valor emisión gases efecto invernadero - GEI (kTon CO ₂ eq)	Calificación	Valoración importancia
≤407	0,2	Irrelevante
408 - 815	0,4	Moderado
817 - 1222	0,6	Severo
1223 - 1628	0,8	Grave

Valor emisión gases efecto invernadero - GEI (kTon CO2 eq)	Calificación	Valoración importancia
≥1629,71	1	Crítico

Fuente: Los Autores, tomando como referencia gráfica del IDEAM, PNUD, MADS, DNP & CANCELLERIA (2016). Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero – Colombia. p 73

En la Tabla 8, se presentan los rangos de importancia de la huella energética incluyendo la calificación y valoración cualitativa de importancia.

Tabla 8 Rangos de importancia de la huella energética

Valor Demanda comercial por región (GWh)	Calificación	Valoración importancia
≤5027	0,2	Irrelevante
5028 - 10054	0,4	Moderado
10055 - 15081	0,6	Severo
15082 - 20106	0,8	Grave
≥20107	1	Crítico

Fuente: Los Autores, tomando como referencia tabla del UPME (2023) Proyección demanda energía eléctrica, gas natural y combustibles líquidos 2022 – 2036. p 22.

Finalmente, con los datos obtenidos de los índices de sostenibilidad ambiental de ACV, se realiza la ponderación para obtener la calificación y respectiva valoración cualitativa de importancia, la cual arrojó los resultados de la Tabla 9:

Tabla 9 Resultados valoración de importancia de los índices de sostenibilidad ambiental

Índice de sostenibilidad	Resultado	Calificación	Valoración importancia
Huella hídrica (millones de m ³)	0,35	0,2	Irrelevante
Huella de carbono (kTon CO ₂ eq)	328,21	0,2	Irrelevante
Huella energética (GWh)	536,28	0,2	Irrelevante

Fuente: Los Autores

De acuerdo con los resultados presentados anteriormente, se encuentra que los valores de huella hídrica, de carbono y energética para la fabricación de 856.880 paneles solares requeridos para el parque solar Guayepo se consideran impactos ambientales irrelevantes. Es de resaltar entonces, que este instrumento permite integrar en la evaluación de impactos de un proyecto para la etapa de licenciamiento ambiental, los impactos ambientales que se generan durante la etapa de fabricación de los paneles solares, que, si bien en este caso son irrelevantes, presentan resultados que permitirán la implementación de medidas de manejo ambiental que prevengan, mitiguen, controlen y compensen los impactos ambientales del proyecto.

En cuanto a la evaluación de impacto ambiental coincide con los estudios realizados por (Marcela & Castillo, 2014.; Pasqualino et al., 2015) quienes evaluaron los impactos y aspectos de la energía solar en el caribe colombiano, concluyendo que dentro de los componentes más afectados se encuentra el paisaje y el suelo, producto de las modificación y alteraciones que se pueden producir durante la construcción de los parques solares debido que se requiere de remoción de cobertura vegetal, descapote, construcción de obras de drenaje y vía entre otros que impactan los patrones naturales del área de influencia de los proyectos.

Finalmente, se destaca que en el análisis del ACV y los índices de sostenibilidad no se tuvo en cuenta los residuos que se generan en la fabricación de los paneles solares ni los provenientes de las fases operativas o de desmantelamiento del proyecto, lo cual explica en alguna manera los resultados obtenidos en la homologación de los valores para evaluar su importancia ambiental dentro de la evaluación de impactos ambientales del proyecto caso de estudio. Así mismo, no se incluyeron los resultados del transporte ya que la unidad de análisis para este Análisis de Ciclo de Vida es para un solo panel solar y la huella de esta actividad debe totalizarse con la cantidad de viajes y paneles a transportar, lo cual no está en el objeto ni en lo establecido para el ACV.

7 IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO

Con este proyecto, se desarrolló la metodología del ACV para la fase de fabricación de los paneles solares mediante la cual se calcularon los índices de sostenibilidad tales como la huella hídrica, huella de carbono y huella energética, los cuales fueron incorporados en la metodología de evaluación ambiental del proyecto caso de estudio, que complementó la evaluación de la prefactibilidad y factibilidad de los proyectos solares fotovoltaicos en el marco del licenciamiento ambiental.

Adicionalmente, el presente proyecto es un precedente en las bases teóricas para la aplicación de índices de sostenibilidad ambiental y ACV en la evaluación de proyectos solares y como antecedente en futuras investigaciones, lo que a su vez permitirá

8 CONCLUSIONES

- Del análisis documental realizado al Estudio de Impacto Ambiental – EIA para el proyecto caso de estudio “Parque solar fotovoltaico Guayepo 400 Mw, su línea de evacuación 500 kV y bahía de conexión”, se concluye que la evaluación ambiental no contempla instrumentos como el “Análisis de Ciclo de Vida” – ACV que permitan evaluar índices de sostenibilidad ambiental; este proyecto solamente contempla las actividades asociadas a la construcción, operación y desmantelamiento del parque solar, sin tener en cuenta las actividades previas tales como la fabricación de los paneles solares que generan impactos ambientales asociados a cada una de sus etapas.
- La aplicación del análisis de ciclo de vida – ACV para calcular la huella de carbono, energética e hídrica proporciona una visión integral y cuantitativa de los impactos ambientales asociados a las diferentes etapas que componen la vida útil del panel solar integrando las diferentes tecnologías o materiales utilizados en dicho proceso, por ende, el ACV se constituye como una herramienta de evaluación ambiental más integral.
- La evaluación ambiental integrada con los índices de sostenibilidad muestra que las actividades de fabricación para la totalidad de paneles solares requeridos para el proyecto presentan importancia irrelevante para los tres índices de sostenibilidad calculados con el ACV, que al verse también compensando por la función del panel solar que es generar energía renovable, se puede inferir que este tipo de fuentes representan un mayor beneficio ambiental en comparación con las que utilizan combustible fósil para el mismo fin.

9 RECOMENDACIONES

En este trabajo se hizo una aproximación a una metodología para la evaluación ambiental de un proyecto solar fotovoltaico contemplando no solo las actividades de construcción y operación sino aquellas caracterizadas en el Análisis de Ciclo de Vida – ACV que involucraron específicamente la fabricación de los paneles solares y que dio como resultado los índices de sostenibilidad desde la cuna a la tumba de estos elementos tan importantes en estos proyectos, así las cosas, se considera importante continuar las investigaciones de tal manera que se complemente la evaluación ambiental no solo para este componente sino para los demás que se utilizan en la puesta en marcha de la infraestructura requerida para la generación de energía solar a gran escala.

Adicionalmente, se debe continuar con la línea de investigación de tal manera que se complemente el análisis del ciclo de vida de los demás componentes de un parque solar fotovoltaico tales como los soportes, inversores, transformadores, entre otros elementos que podrían presentar impactos ambientales que deben ser analizados desde la cuna a la tumba. De igual forma, con la identificación de las etapas más críticas para cada una de las huellas evaluadas, se pueden evaluar posibles alternativas enfocadas en reducir, mitigar y/o compensar el impacto generado por dichas actividades y hacer más sostenible la generación de energía solar.

Finalmente, debido al alcance del trabajo, no se tuvieron en cuenta dentro del ACV los residuos generados durante la fabricación de los paneles solares y los que se generarían una vez el parque solar termine su vida útil, se recomienda complementar esta investigación incluyendo los impactos ambientales que se puedan generar por la gestión de residuos y si es el caso, implementar la economía circular para la minimización de la afectación por este aspecto.

10 REFERENCIAS

- Albaladejo, M., Mirazo, P., & Franco Henao, L. (22 de Marzo de 2021). *United Nations Industrial Development Organization*. Obtenido de <https://www.unido.org/stories/la-economia-circular-un-cambio-de-paradigma-para-soluciones-globales>
- Alvarez Gallego, S. (2017). La huella de carbono y el análisis de ciclo de vida. AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. <https://elibro.net/es/lc/usta/titulos/53619>
- Arias-Gaviria, J., Carvajal-Quintero, S. X., & Arango-Aramburo, S. (2019). Understanding dynamics and policy for renewable energy diffusion in Colombia. *Renewable Energy*, 139, 1111–1119. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.02.138>
- Asumadu-Sarkodie, S., & Owusu, P. A. (2016). Feasibility of biomass heating system in middle east technical university, northern Cyprus Campus. *Cogent Engineering*, 3(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1134304>
- Boddapati, V., & Daniel, S. A. (2020). Performance analysis and investigations of grid-connected Solar Power Park in Kurnool, South India. *Energy for Sustainable Development*, 55, 161–169. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2020.02.001>
- Carolina, M., Pereira, R., & Coria, A. S. (2022). Impactos ambientales de sistemas de energía solar fotovoltaica: una revisión de análisis de ciclo de vida y otros estudios. *Revista EIA*, 19(38), 3825 pp. 1–18. <https://doi.org/10.24050/REIA.V19I38.1570>
- de Paula Teixeira, W. (2020). Life Cycle Assessment (LCA) Photovoltaic Solar Energy: A Bibliometric Literature Review. *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics*, 337, 67–76. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56920-4_6/COVER
- Del Río, J., Navas, L. M., Sánchez, L. F., Ruiz, N., Guimaraes, A. C., Hernández, S., Martín, J., & Sanz, J. F. (n.d.). *Análisis del ciclo de vida de un panel solar fotovoltaico empleado para la alimentación eléctrica de instalaciones de riego, comparando las metodologías ECO-Indicador 99 y EPS-2000*.
- Enerdata. (2023). *Energía y clima mundial - Anuario estadístico 2023*. Obtenido de <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>
- Frohmann, A., & Olmos, X. (2013). *Huella de Carbono, exportaciones y estrategias empresariales frente al cambio climático*. <https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/4101/S2013998rev1.pdf>

- Gúzman Niño, C. A. (2017). *Análisis del impacto ambiental de diferentes tipos de paneles solares según los materiales utilizados y los componentes tóxicos generados*. Fundación Universidad De América.
- Herrando, M., Elduque, D., Javierre, C., & Fueyo, N. (2022). Life Cycle Assessment of solar energy systems for the provision of heating, cooling and electricity in buildings: A comparative analysis. *Energy Conversion and Management*, 257, 115402. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.115402>
- ICONTE. (2021). Norma Técnica Colombiana 14044. *Gestión ambiental. Analisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. Requisitos del ciclo de vida*.
- ICONTEC. (2022). Norma Técnica Colombiana NTC 14040. *Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLEERÍA. (2016). *Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero – Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*.
- IDEAM. (2023). Estudio Nacional del Agua. 464.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. www.ipcc.ch
- International Energy Agency. (2016). Energy, Climate Change and Environment. *Energy, Climate Change and Environment*. <https://doi.org/10.1787/9789264266834-EN>
- Jarauta Rovira, L. (2015). *Las energías renovables*. Editorial UOC. <https://elibro.net/es/lc/usta/titulos/57883>
- Jefatura de Inteligencia de Negocio. (2022). *Estudio del sector energético colombiano*
- Jeswani, H. K., & Azapagic, A. (2011). Water footprint: methodologies and a case study for assessing the impacts of water use. *Journal of Cleaner Production*, 19(12), 1288–1299. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2011.04.003>
- López, A. R., Krumm, A., Schattenhofer, L., Burandt, T., Montoya, F. C., Oberländer, N., & Oei, P. Y. (2020). Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market. *Renewable Energy*, 148, 1266–1279. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.10.066>

- Ludin, N. A., Mustafa, N. I., Hanafiah, M. M., Ibrahim, M. A., Asri Mat Teridi, M., Sepeai, S., Zaharim, A., & Sopian, K. (2018). Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 11–28. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.07.048>
- McDonough, W. (2012). *Cradle to cradle (de la cuna a la cuna): rediseñando la forma en que hacemos las cosas*. McGraw-Hill Espana. <https://elibro.net/es/lc/usta/titulos/50197>
- Marcela, A., & Castillo, T. (n.d.). *EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE LA ENERGÍA SOLAR Y EÓLICA EN LA ABIOTA DE COLOMBIA ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF SOLAR AND WIND ENERGY IN ABIOTIC OF COLOMBIA*. Retrieved July 7, 2023, from http://www.allpe.com/seccion_detalle.php?idseccion=268
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, M. (2017). Resolución 1670 de 2017. In *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS* (p. 10). <https://www.minambiente.gov.co/index.php>
- Naranjo, C., Alzate, J. D., & Salazar, J. (2011). Future scenarios of Smart Grids in Colombia and their impact on climate change. *2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Latin America SGT LA 2011 - Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2011.6083200>
- Nik, V. M., & Perera, A. T. D. (2020). The Importance of Developing Climate-Resilient Pathways for Energy Transition and Climate Change Adaptation. *One Earth*, 3(4), 423–424. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2020.09.013>
- Ochoski Machado, P. L., Ochoski Machado, V. otávio, Tadano Souza, de Y., & Alves Antonini, T. (2020). Análise da Produção Científica sobre a Avaliação do Ciclo de Vida de Painéis Fotovoltaicos Utilizando Methodi Ordinatio. *Anais Do VII Congresso Brasileiro Sobre Gestao Do Ciclo de Vida*. https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Lermen/publication/348607043_Avaliacao_do_desempenho_ambiental_de_sistema_de_isolamento_termico_externo_tipo_EIFS_em_fachada_de_edificacao_em_Light_Steel_Frame/links/6007357745851553a058277f/Avaliacao-do-desempenho-ambiental-de-sistema-de-isolamento-termico-externo-tipo-EIFS-em-fachada-de-edificacao-em-Light-Steel-Frame.pdf#page=68
- Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Http://Www.Editorialmanager.Com/Cogenteng*, 3 (1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>

- Pasqualino, J. C., Cabrera, C., & Vanegas Chamorro, M. (2015). Los impactos ambientales de la implementación de las energías eólica y solar en el Caribe Colombiano. *Prospectiva*, ISSN-e 2216-1368, ISSN 1692-8261, Vol. 13, Nº. 1 (Enero-Junio), 2015, Págs. 68-75, 13(1), 68–75. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5158298&info=resumen&idioma=EN>
[G](https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5158298&info=resumen&idioma=EN)
- Quiroga, R. (2001). *Indicadores de sostenibilidad ambiental y desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas*.
- Sherwani, A. F., Usmani, J. A., & Varun. (2010). Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 540–544. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.08.003>
- SUNFIELDS EUROPA. (s.f.). *Tipos de Placas Solares*. Obtenido de SUNFIELDS EUROPA: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/tipos-de-placas-solares/>
- SUNFIELDS EUROPE. (s.f.). *Rendimiento de placas solares*. Obtenido de SUNFIELDS EUROPE: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/paneles-solares-rendimiento/#Que-es-la-eficiencia-de-un-panel-solar>
- Tobajas, M. C. (2018). *Energía solar fotovoltaica*. Cano Pina. <https://elibro.net/es/lc/usta/titulos/45047>
- UNEP. (2022). *Emissions Gap Report 2022*. https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021?_cldee=bmRIY29vcG1hbkbjMmcyLm5ldA%3D%3D&recipientid=contact-ecd2390327e8e81181465065f38a3ba1-b91824f65e3d49c9b5a32c23e390fbfd&esid=a361a8b3-8d38-ec11-b6e6-002248242f47
- UNFCCC. (2021). CMA3 - Glasgow Climate Pact. *Cma3*, 2, 1–11.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2020). Plan Energético Nacional 2020-2050. *Plan Energético Nacional 2020-2050*, 34. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf
- UPME. (2023). Informe proyección de demanda energía eléctrica, gas natural y combustibles fósiles 2022 - 2036. 92.

Vanham, D., & Bidoglio, G. (2013). A review on the indicator water footprint for the EU28. *Ecological Indicators*, 26, 61–75. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2012.10.021>

WSP. (2020). *Estudio de impacto ambiental (EIA) del parque solar fotovoltaico Guayepo con capacidad de generación de 400mw, su línea de evacuación 500kv y bahía de conexión.*

Anexo B Diagrama de bloques del proceso de fabricación, operación y desmantelamiento del panel solar JKM-410-72H del Parque Solar Guayepo.

