



Resultados

Pacto Educativo para la Planeación Energética en Colombia y la Transición Energética Justa



Análisis de riesgo y oportunidades en los procesos de cierre de minería de carbón y parques solares del corredor vida Cesar- Magdalena.

**Resultados Convenio Pacto Educativo para la Planeación Energética en Colombia
y la Transición Energética Justa**

República de Colombia

Unidad de Planeación Minero Energética

Omar Andrés Camacho Morales

Ministro de Minas y Energía

Carlos Adrián Correa Florez

Director UPME

Indira Portocarrero Ospina

Asesora Dirección General

Gerente Proyecto territorial

Equipo de revisión

Diego Vanegas

Catalina Londoño

Edinson Bohorquez

Oliver Diaz Iglesias

Maria Alejandra Acosta

Natali Carmona Giraldo

Olga Carranza

Maria Alejandra Acosta

Informe de oportunidades tecnológicas del cierre de los
parques solares en el Corredor Vida Cesar-Magdalena, con el
objeto de facilitar su aprovechamiento comunitario en el
territorio

Convenio Interadministrativo No. CO1.PCCNTR.5495859 suscrito entre la Unidad
De Planeación Minero-Energética - UPME y la Universidad del Magdalena

Aunar esfuerzos técnicos, financieros y administrativos para elaborar el Mapa de
riesgos frente a las situaciones que llevaron al estado actual de los procesos de
cierre de la minería de Carbón que faciliten iniciativas de Economía Circular en los
cierres de los parques solares del Corredor vía del Cesar-Magdalena en términos
tecnológicos, ambientales, sociales y de género.

Presentado a:

Unidad de Planeación Minero-Energética UPME

Por:

Universidad del Magdalena

Semillero de Transición Energética

Grupo de Investigación Magma Ingeniería

Santa Marta, diciembre de 2023

CONTENIDO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	4
LISTADO DE FIGURAS.....	6
LISTADO DE TABLAS.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DE LOS PARQUES SOLARES EN EL CORREDOR VIDA CESAR-MAGDALENA.....	11
2.1. Nombre del proyecto.....	13
2.2. Ubicación o georreferencia.....	14
2.3. Tamaño o área.....	16
2.4. Estado actual del proyecto.....	16
2.5. Potencia total.....	17
2.6. Factor de capacidad comparativo:.....	17
Se presentan de forma comparativa los tres proyectos de parques fotovoltaicos más grande de mundo y los tres parques solares del corredor vida Cesar-Magdalena bajo estudio:.....	17
3. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO CONSIDERANDO ASPECTOS TECNOLÓGICOS Y COMUNITARIOS (ECONOMÍA CIRCULAR, REUTILIZACIÓN, COMUNIDADES).....	18
3.1. Análisis de resultados.....	19
3.1.1. Documentos por país o territorio.....	19
3.1.2. Documentos por año.....	20
3.1.3. Documentos por tipo.....	21
3.1.4. Documentos por editorial.....	22
3.1.5. Documentos por afiliaciones.....	23
3.1.6. Documentos por patrocinadores de financiación.....	23
3.1.7. Documentos por área temática.....	24
3.2. Análisis con VOSViewer.....	25
3.2.1 Scopus.....	25
3.2.2 Web of Science.....	27
4. OPORTUNIDADES EN LOS PROCESOS DE CIERRE DE PARQUES SOLARES.....	30

4.1. Oportunidades ambientales, manejo de residuos y de sostenibilidad asociadas al cierre de parques solares.	31
4.1.1 Oportunidades ambientales	31
4.1.2 Oportunidades en el manejo de residuos.....	33
4.1.3 Oportunidades de sostenibilidad	35
4.2. Oportunidades económicas y financieras asociadas al cierre de parques solares.	37
4.2.1 Reutilización de Infraestructura	37
4.2.2 Reciclaje de Materiales	37
4.2.3 Creación de Empleo Local	37
4.2.4 Desarrollo de Nuevas Tecnologías y Servicios.....	38
4.2.5 Desarrollo de Proyectos Mixtos	39
4.2.6 Incentivos financieros y fiscales.....	40
4.3. Oportunidades de reciclaje de materiales valiosos asociadas al cierre de parques solares.....	41
4.4. Oportunidades de desarrollo comunitario en los procesos de cierre de parques solares.	44
5. APROVECHAMIENTO COMUNITARIO EN EL CIERRE DE PARQUES SOLARES.....	46
5.1. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible como marco para la asociatividad y el trabajo comunitario	46
5.2. Las comunidades energéticas en el contexto colombiano	50
5.3. Comunidades solares de autoconsumo compartido	55
5.4. Sistemas de bombeo de agua comunitario	58
5.5. Transición de vehículos de combustión a alternativas eléctricas	60
5.6. Sistemas de monitoreo de calidad del aire	62
5.7. Mejoramiento de la iluminación del espacio público.....	63
5.8. Oportunidades de formación técnica en la comunidad.....	65
5.9. Conversión a edificaciones sostenibles.....	67
6. REUTILIZACIÓN, RECICLAJE O DESECHO TECNOLÓGICO EN PARQUES SOLARES ...	72
6.1. Reutilización de paneles solares fotovoltaicos	72
6.2. Procesos de reciclaje en la industria fotovoltaica y parques solares	78
6.3. Disposición del desecho tecnológico de los paneles solares	93

LISTA DE ABREVIATURAS

AC	Autogeneración colectiva
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
DOE	Department of Energy
E.S.P.C.	Empresa de Servicios Públicos Comunitaria
IEA	Agencia Internacional de la Energía
EIA	Evaluación del Impacto Ambiental
EPSRC	Engineering and Physical Sciences Research Council
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energía Renovable
FV	Solar Fotovoltaica
GDC	Generación Distribuida Colectiva
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IMPE	Índice Multidimensional de Pobreza Energética
IRENA	International Renewable Energy Agency
LED	light-emitting diode
MDPI	Multidisciplinary Digital Publishing Institute
MinMinas	Ministerio de Minas y Energía
NCEPU	North China Electric Power University
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NSFC	National Natural Science Foundation of China
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PDET	Programa de Desarrollo con Enfoque Territorial
PND	Plan Nacional de Desarrollo
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
RIS	Research Information Systems
ROSI	Return of Silicon
RSE	Responsabilidad Social Empresarial
SIN	Sistema de Interconexión Nacional
SDL	Sistema de Distribución Local
STR	Sistema de Transmisión Regional
SVCA	Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire
TIR	Tasa Interna de Retorno
UKRI	UK Research and Innovation

UNSW	University of New South Wales
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WOS	Web of Science
ZOMAC	Zonas Más Afectadas por el Conflicto Armado

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Participación de la capacidad energética acumulada por tecnología, 2010-2027	11
Figura 2. Capacidad eléctrica acumulada por tecnología, 2010-2027	12
Figura 3. Matriz energética colombiana: capacidad instalada actual y futura	12
Figura 4. Criterios considerados en la caracterización.....	13
Figura 5. Ubicación parques solares corredor vida Cesar-Magdalena.	14
Figura 6. Ubicación geoespacial de los parques solares del corredor vida Cesar-Magdalena.	15
Figura 7. Estado actual de los proyectos.	16
Figura 8. Comparación de los parques solares más grande del mundo vs parque solares corredor vida.	17
Figura 9. Número de publicaciones por países.	20
Figura 10. Número de publicaciones por año.	21
Figura 11. Número de publicaciones por tipo. a) Scopus; b) Web of Science.	22
Figura 12. Número de publicaciones por editoriales. a) Scopus; b) Web of Science.	22
Figura 13. Número de publicaciones por afiliaciones. a) Scopus; b) Web of Science.	23
Figura 14. Número de publicaciones por patrocinadores de financiación. a) Scopus; b) Web of Science.	24
Figura 15. Número de publicaciones por área temática. a) Scopus; b) Web of Science.....	25
Figura 16. Redes de coocurrencia de palabras clave utilizando los datos de Scopus.....	26
Figura 17. Enlaces para el clúster 1 del mapa de coocurrencias.	27
Figura 18. Redes de coocurrencia de palabras clave utilizando los datos de Web of Science.....	28
Figura 19. Enlaces para el clúster 3 del mapa de coocurrencias.	29
Figura 20. Identificación de oportunidades en los cierres de parques solares.	30
Figura 21. Planta de reciclaje de la empresa ROSI (Return of Silicon) en Grenoble, Francia	34
Figura 22. Costo asociado de las materias primas que componen un panel solar.	42
Figura 23. Marco de los ODS para el aprovechamiento comunitario en el cierre de parques solares.....	47
Figura 24. Objetivos de la asociatividad y desarrollo comunitario.	48
Figura 25. Registro de comunidades energéticas en la zona de influencia del parque solar - Municipio de El Paso, Cesar	53
Figura 26. Registro de comunidades energéticas en la zona de influencia del parque solar - municipio de Fundación, Magdalena.....	53
Figura 27. Registro de comunidades energéticas en la zona de influencia del parque solar - municipio de Ciénaga, Magdalena	54
Figura 28. Condiciones para el acceso al autoconsumo compartido en el modelo de comunidad solar.	55
Figura 29. Esquema de una comunidad solar.	56

Figura 30. Identificación de zonas agrícolas cercanas a los parques solares ubicados en el corredor vida Cesar-Magdalena.....	57
Figura 31. Sistema de bombeo de agua alimentado por paneles solares.....	59
Figura 32. Sistema de propulsión eléctrica para motocarros	61
Figura 33. Sistema de monitoreo de calidad del aire.....	63
Figura 34. Sistema de iluminación LED con paneles solares	64
Figura 35. Diplomado en transición energética realizado en Cesar.....	66
Figura 36. Ejes temáticos de la construcción sostenible	67
Figura 37. Pasos para lograr la reconversión de una edificación.	68
Figura 38. Proceso de retorno de envases plásticos.....	72
Figura 39. Ciclo de vida de un panel solar.....	73
Figura 40. Daños materiales en un panel solar. a) Puntos calientes; b) Grietas; c) Delaminación; d) Amarilleamiento	74
Figura 41. Curva característica de un panel solar.....	76
Figura 42. Proceso para analizar la aptitud de un panel para reutilización	77
Figura 43. Modelo y procesos de economía circular	79
Figura 44. Jerarquía de la gestión de residuos electrónicos (E-Waste)	79
Figura 45. Déficit ecológico global	80
Figura 46. Tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos (%).	81
Figura 47. Residuos electrónicos generados y reciclados, 2010 y 2019 (kilogramos per cápita). ...	81
Figura 48. Metas del ODS 12 asociadas al reciclaje y reutilización de desechos.....	82
Figura 49. Oportunidades de recuperación de materiales en las energías renovables.....	83
Figura 50. Numero de módulos parques solares corredor vida Cesar-Magdalena.	84
Figura 51. Estructura interna modulo solar fotovoltaico.....	85
Figura 52. Cuota de mercado de paneles fotovoltaicos por tipo de tecnología (2014-2030).....	86
Figura 53. Diferentes tipos de procesos de reciclaje de energía solar fotovoltaica	87
Figura 54. Estimación de los materiales que conforman el parque solar El Paso según los datos de la Tabla 9.....	89
Figura 55. Estimación de los materiales que conforman el parque solar Fundación según los datos de la Tabla 9.....	90
Figura 56. Estimación de los materiales que conforman el parque solar Caimán Cienaguero según los datos de la Tabla 9.	90
Figura 57. Cantidad de materiales potencialmente reciclables por cada kWp.....	94
Figura 58. Ilustración de un panel solar de silicio cristalino	95
Figura 59. Proceso general de reciclaje para paneles solares de silicio cristalino.....	96

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Denominación proyectos corredor vida Cesar-Magdalena.....	13
Tabla 2. Ubicación proyectos corredor vida Cesar-Magdalena.....	14
Tabla 3. Tamaño o área proyectos corredor vida Cesar-Magdalena.....	16
Tabla 4. Potencia y energía proyectos corredor vida Cesar-Magdalena.	17
Tabla 5. Mapa de actores en el desarrollo comunitario.	69
Tabla 6. Categorización de los fallos de acuerdo con la pérdida de potencia.	75
Tabla 7. Categorización de los fallos de acuerdo con la seguridad.....	75
Tabla 8. Procesos de reciclaje de módulos solares de silicio	88
Tabla 9. Composición de módulos solares cristalinos.....	89

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, la adopción de la energía solar fotovoltaica ha experimentado un crecimiento exponencial, desempeñando un papel crucial en la transición hacia fuentes de energía sostenibles. A medida que los parques solares fotovoltaicos entran en operación, surge una cuestión igualmente relevante, pero, a menudo, subestimada: ¿qué sucede al final de la vida útil de los módulos solares y cómo gestionamos el cierre de estos parques? ¿Cómo pueden procesos previos de cierre brindar una prospectiva para visionar oportunidades en el cierre de parques solares?

El cierre de parques solares fotovoltaicos no solo representa un desafío logístico y ambiental, sino también una oportunidad estratégica para innovar y transformar la gestión de los recursos y los materiales que conforman la cadena de valor esta actividad. En este contexto, el presente proyecto de investigación se enfoca en explorar las diversas facetas asociadas al cierre de parques solares, destacando especialmente las oportunidades emergentes que surgen cuando los módulos solares alcanzan el término de su vida útil proyectada.

A medida que la primera generación de instalaciones solares enfrenta la inevitable necesidad de renovación y retiro, es imperativo examinar detenidamente cómo se puede maximizar el valor de estos activos. Esto implica no solo considerar los aspectos económicos, sino también evaluar su contribución en términos de sostenibilidad ambiental, explorar oportunidades tecnológicas, beneficios económicos y responsabilidades sociales.

Ambientalmente, el cierre de parques solares ofrece la posibilidad de minimizar los impactos ecológicos mediante prácticas de reciclaje avanzadas y la adopción de técnicas de desmantelamiento respetuosas con el medio ambiente. Se investigarán estrategias para mitigar la huella ambiental y fomentar la transición hacia una economía más sostenible y baja en carbono.

Desde un punto de vista económico, se analizarán las oportunidades financieras asociadas a la reutilización de módulos solares y al desarrollo de nuevos modelos de negocio en torno a la gestión de activos solares al final de su vida útil. La investigación buscará identificar vías para maximizar el retorno de inversión y crear incentivos económicos para la adopción de prácticas sostenibles.

En el ámbito social, se explorarán las posibilidades de aprovechamiento comunitario de los módulos solares retirados. La investigación examinará cómo estas comunidades pueden beneficiarse, ya sea a través de la obtención de energía renovable para uso local o la creación de oportunidades de empleo en el proceso de cierre y reciclaje.

Dentro del ámbito del reciclaje y la reutilización, se examinarán los métodos eficaces destinados a la recuperación y reintegración de componentes valiosos de los módulos solares. Este enfoque no solo busca optimizar el aprovechamiento de recursos, sino que también aspira a apoyar en la creación de una cadena de suministro circular que respalde la sostenibilidad a largo plazo de la industria solar.

El propósito de este proyecto es contribuir al conocimiento, facilitar la identificación de oportunidades y respaldar la toma de decisiones informadas en un momento crucial para la transición hacia una matriz energética más sostenible. A medida que avanzamos hacia un futuro donde la energía solar desempeñará un papel aún más predominante, entender y optimizar el cierre de parques solares se vuelve esencial para forjar un camino hacia un mundo más limpio, resiliente y lleno de oportunidades.

2. CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DE LOS PARQUES SOLARES EN EL CORREDOR VIDA CESAR-MAGDALENA

La energía solar fotovoltaica es la tecnología de energía renovable de mayor crecimiento y expansión que apunta hacia la diversificación y democratización de la generación de energía. El aprovechamiento o generación de energía a partir de módulos solares fotovoltaicos ha superado a la energía eólica y bioenergía en 2023, y se espera que supere a la hidroenergía para 2024. Asimismo, según las proyecciones de la Agencia Internacional de la energía (EIA, por sus siglas en inglés), se espera que para 2027 supere al carbón y al gas natural, y se convierta en la fuente de energía más importante en el mundo con un aporte del 22% que equivalen a 1.500GW.

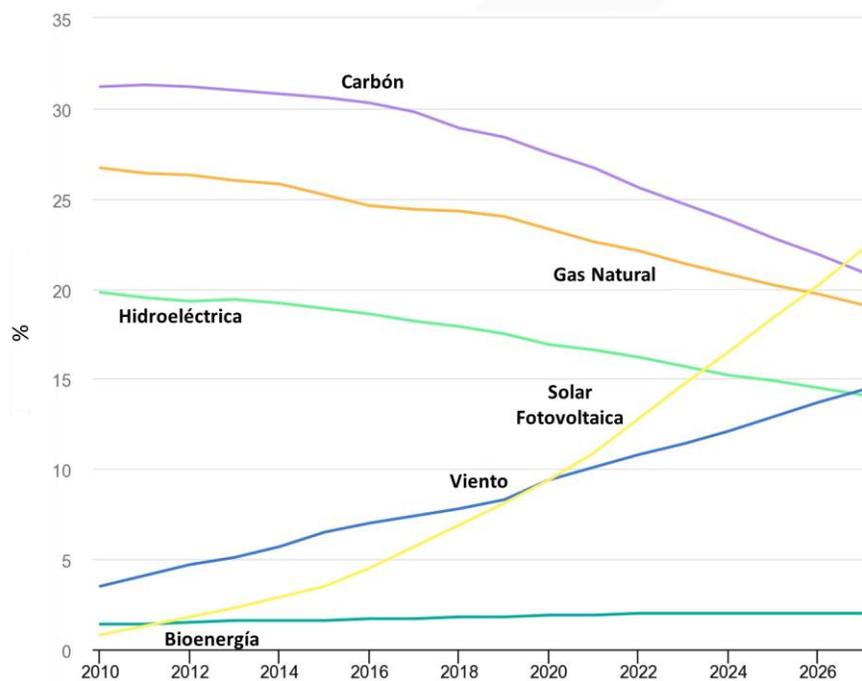


Figura 1. Participación de la capacidad energética acumulada por tecnología, 2010-2027. Fuente: Adaptado de [1].

En este mismo sentido, a pesar del alto costo inicial de su implementación en comparación con otras tecnologías, la energía solar fotovoltaica a gran escala como parques o huertas solares (*utility-scale*), siguen acaparando gran parte de la inversión de los nuevos proyectos de generación de energía de forma significativa en todo el mundo [[1]. De esta forma, se crean escenarios de gran crecimiento de este tipo de proyectos, lo que debería también incidir en la gran cantidad de materiales y productos que generaran al completar su vida útil operacional.

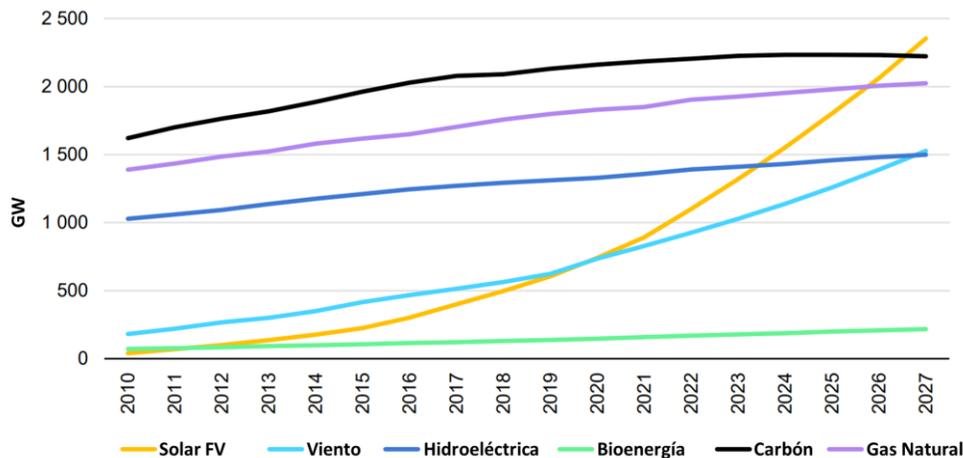


Figura 2. Capacidad eléctrica acumulada por tecnología, 2010-2027. Fuente: Adaptado de [2].

Por su parte, Colombia ha apostado por diversificar de forma significativa su matriz energética, de tal forma que los proyectos de energía solar han aumentado considerablemente en los últimos 5 años. Entidades como el Ministerio de Minas y energía (MinMinas), la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), y diferentes actores privados, han contribuido a que el país lograra pasar de 28MW fotovoltaicos en 2018 a 258,66MW operando en el Sistema de Interconexión Nacional (SIN) a septiembre de 2022.

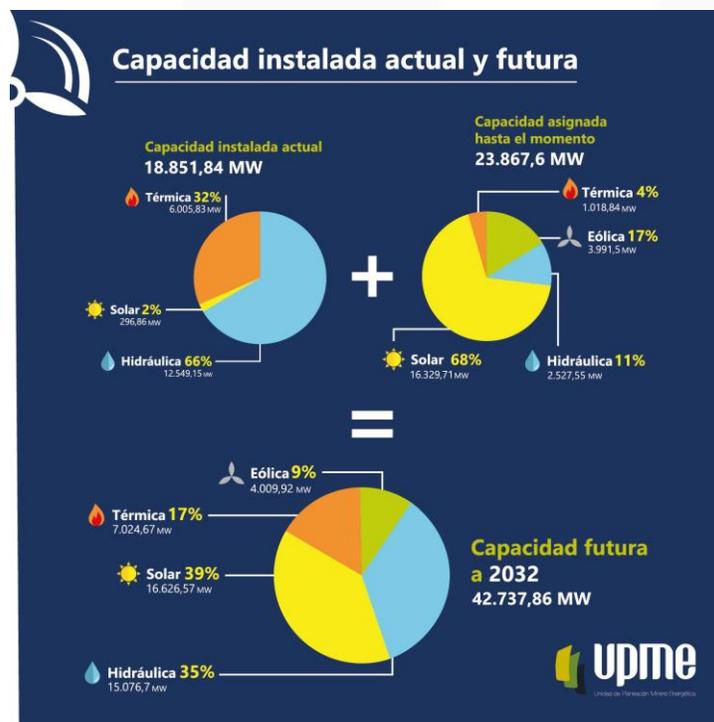


Figura 3. Matriz energética colombiana: capacidad instalada actual y futura. Fuente: Tomado de [3].

Según las solicitudes de conexión hacia una Transición Energética Justa y su clasificación por tipo de recurso, ubicación, capacidad instalada actual y futura como se muestra en la Figura 3, la matriz energética colombiana pasara de 18.851,84MW con participación solar fotovoltaica del 2% a 42.737,86MW en 2032 con una participación de este recurso del 39%, alcanzando 16.626,57MW, multiplicando 56 veces la capacidad instalada actual.

En lo concerniente a los proyectos desarrollados en el corredor vida Cesar-Magdalena se han identificado los más representativos y que se encuentran en operación o construcción actualmente, siendo seleccionados el parque solar El Paso y Fundación Solar del grupo Enel, y el parque solar Caimán Cienaguero de GreenYellow. De esta forma, se propone una caracterización tecnológica que tendrá en cuenta los aspectos indicados en la Figura 4, los cuales se describirán desde lo técnico y tecnológico, pero también desde lo geográfico, ambiental y comunitario.

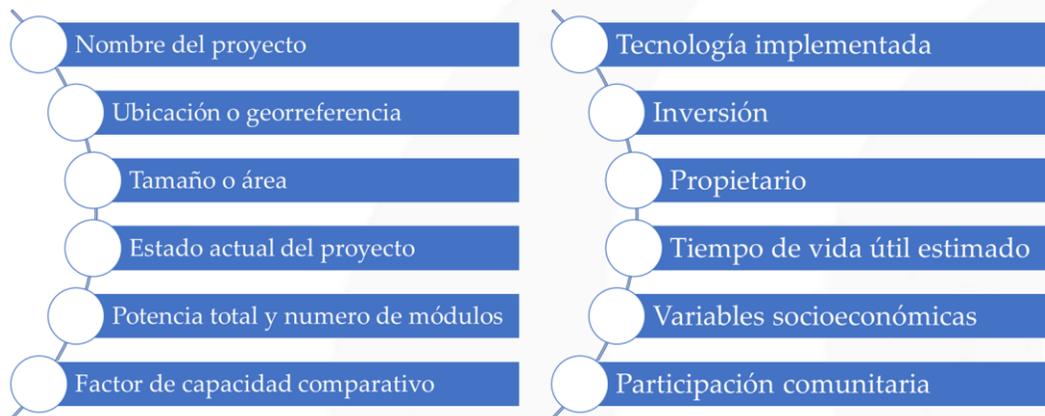


Figura 4. Criterios considerados en la caracterización

2.1. Nombre del proyecto

En el corredor vida Cesar-Magdalena se desarrollan actualmente tres proyectos cuya denominación se presenta a continuación:

Tabla 1. Denominación proyectos corredor vida Cesar-Magdalena.

Departamento	Municipio	Nombre	Año
Cesar	El Paso	El Paso Solar	2018
Magdalena	Ciénaga	Caimán Cienaguero	2022
Magdalena	Pivijay	Fundación	2022

2.2. Ubicación o georreferencia

Los proyectos se encuentran ubicados en jurisdicción de zona rural de los municipios de Ciénaga, El Paso y Fundación.

Tabla 2. Ubicación proyectos corredor vida Cesar-Magdalena.

Nombre	Ubicación (Latitud, Longitud)	Distancia centro urbano
El Paso Solar	9.789135, -73.722650	Aprox. 15km de El Paso
Caimán Cienaguero	10.972715, -74.216434	Aprox. 5km de Ciénaga
Fundación	10.480754, -74.221729	Aprox. 5 km de Fundación

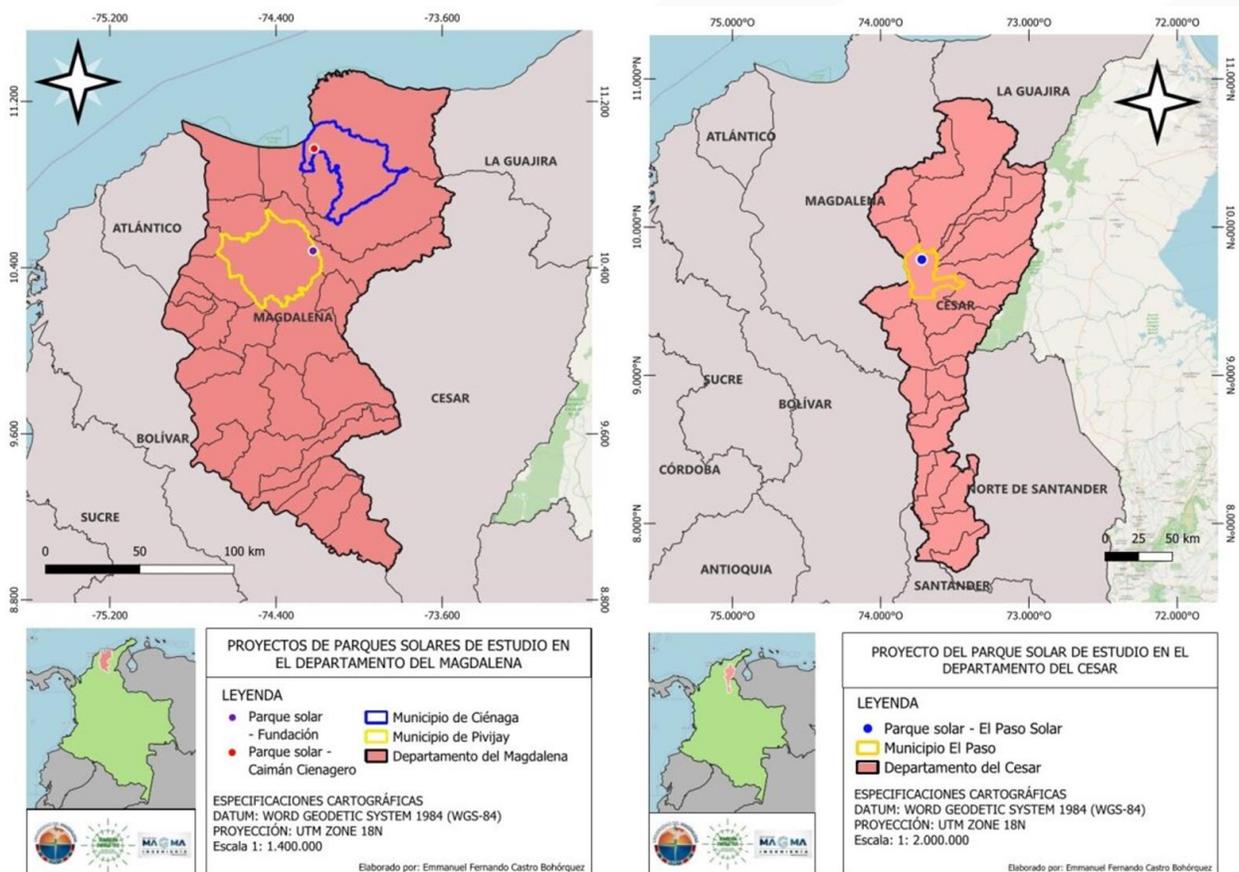


Figura 5. Ubicación parques solares corredor vida Cesar-Magdalena.

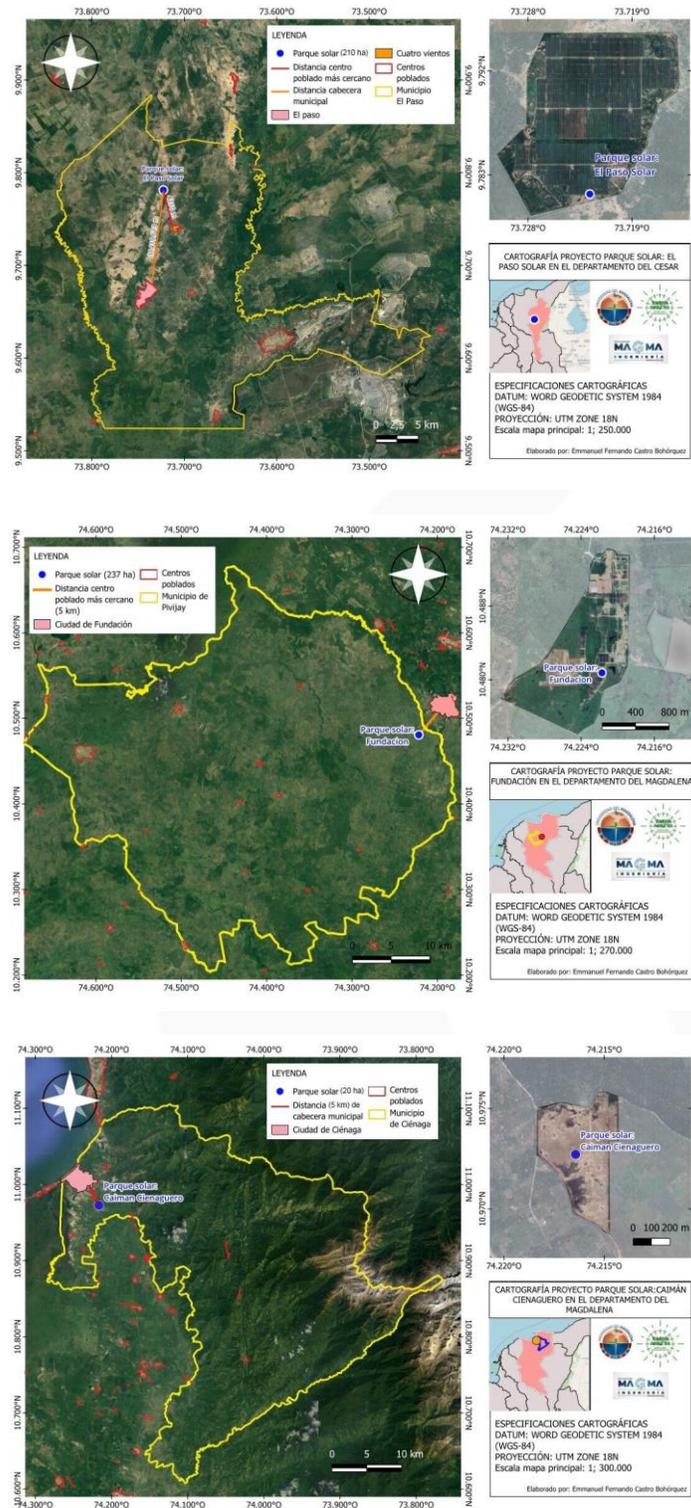


Figura 6. Ubicación geoespacial de los parques solares del corredor vida Cesar-Magdalena.

2.3. Tamaño o área

Los proyectos impactan un área importante principalmente en zona rural, se presenta el área de construcción reportada por los constructores de cada proyecto y se presenta una equivalencia:

Tabla 3. Tamaño o área proyectos corredor vida Cesar-Magdalena.

Nombre	Tamaño o área	Equivalencias
El Paso Solar	210 ha	294 campos de futbol
Caimán Cienaguero	20 ha	28 campos de futbol
Fundación	237 ha	334 campos de futbol

2.4. Estado actual del proyecto

Los proyectos se encuentran ubicados en jurisdicción de zona rural de los municipios de Ciénaga, El Paso y Fundación.

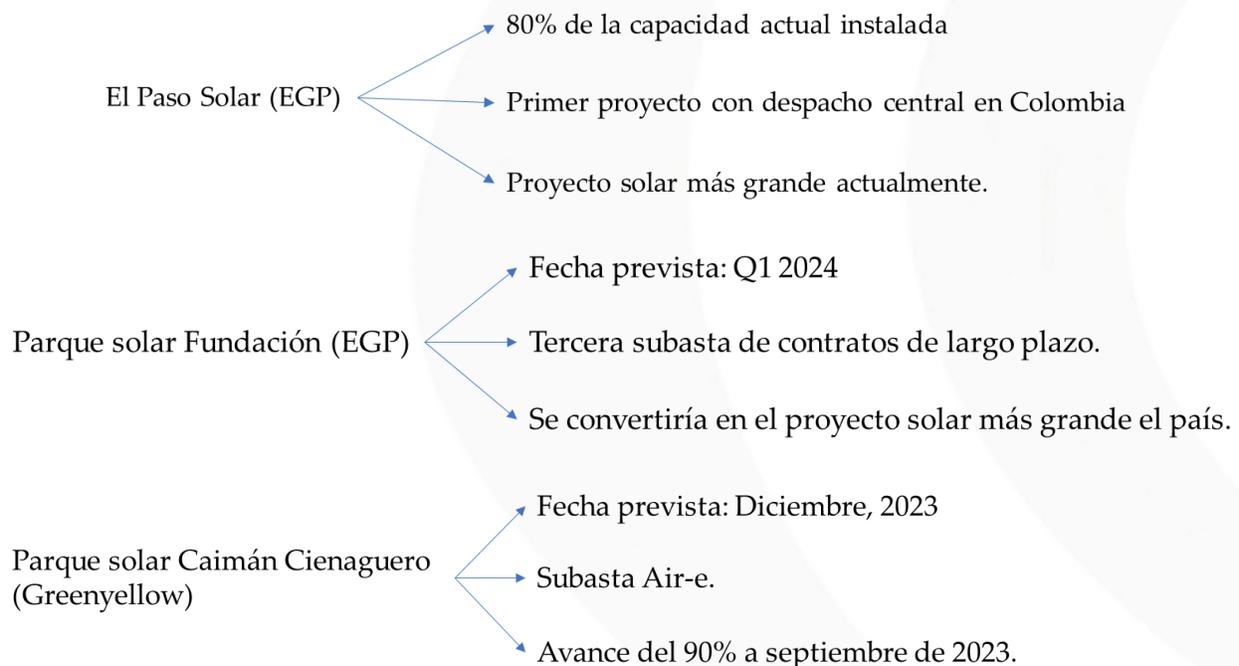


Figura 7. Estado actual de los proyectos.

2.5. Potencia total

Los proyectos tendrán una potencia total instalada de 232,7 MWp los cuales entregarán energía al SIN o a los Sistemas de Transmisión Regional (STR):

Tabla 4. Potencia y energía proyectos corredor vida Cesar-Magdalena.

Nombre	Potencia total	Energía esperada	# módulos solares
El Paso Solar	86,2 MWp	176 GWh al año	250.000
Caimán Cienaguero	14,3 MWp	26,4 MWh al año	22.000
Fundación	132,2 MWp	227 GWh al año	244.800

2.6. Factor de capacidad comparativo:

Se presentan de forma comparativa los tres proyectos de parques fotovoltaicos más grande de mundo y los tres parques solares del corredor vida Cesar-Magdalena bajo estudio:

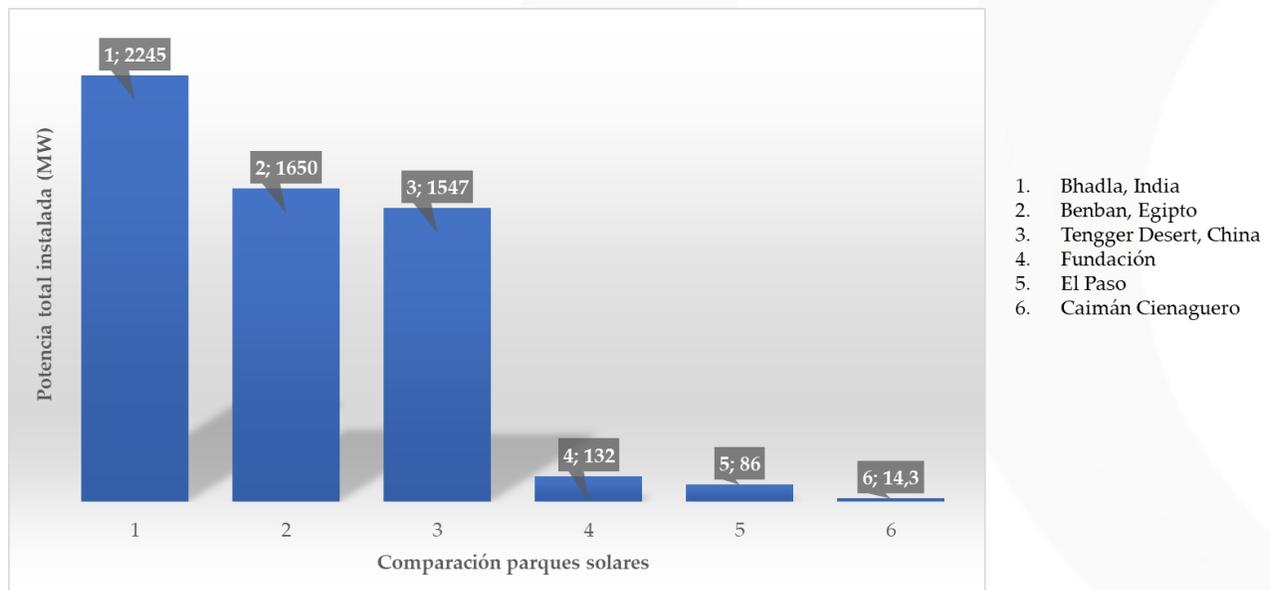


Figura 8. Comparación de los parques solares más grande del mundo vs parque solares corredor vida.

3. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO CONSIDERANDO ASPECTOS TECNOLÓGICOS Y COMUNITARIOS (ECONOMÍA CIRCULAR, REUTILIZACIÓN, COMUNIDADES)

Se realizó un análisis bibliométrico como herramienta para estudiar la producción científica relacionada con temas relacionados con aspectos tecnológicos en el contexto de la economía circular, la reutilización y las comunidades en los procesos de cierre de parque solares. Lo anterior, con el fin de identificar las tecnologías clave y su relevancia en los ámbitos mencionados. Para realizar este análisis se establecieron tres fases:

Fase I. Definición de la ecuación de búsqueda

Con el fin de optimizar la búsqueda de información y obtener resultados precisos y relevantes, se emplean los operadores lógicos AND y OR para construir una ecuación de búsqueda. Por su parte, el operador AND permite determinar el conjunto de términos que debe incluir el resultado de la búsqueda, mientras que el operador OR permite incluir sinónimos, por lo que, los resultados deben incluir por lo menos uno de los términos que se especifiquen mediante este operador.

Luego de realizar varias pruebas, de las cuales se identificaron palabras claves y sinónimos relacionados con el contexto del presente análisis bibliométrico, la ecuación de búsqueda queda de la siguiente manera:

- ("solar power" OR "solar energy" OR "solar panel" OR "solar photovoltaic" OR "solar PV" OR "photovoltaic*") AND ("end-of-life" OR "end of life" OR "end-of-use" OR closing OR shutdown OR decommissioning) AND ("circular economy" OR "waste management" OR "management*" OR recycling OR "sustainable development") AND (population OR "social*" OR stakeholders OR community OR society)

Fase II. Revisión bibliométrica

Se realiza la búsqueda de publicaciones en las bases de datos científicas Web of Science (WoS) y Scopus, utilizando la ecuación de búsqueda que se definió previamente. Luego, se descargan los archivos que contienen el conjunto de datos de las métricas claves como lo son publicaciones según país de publicación, año de divulgación, editores, tipo de publicación, instituciones u organizaciones afiliadas, patrocinadores y áreas temáticas. Los datos correspondientes a cada métrica arrojados por la plataforma de WoS son guardados en archivos de texto plano (.txt), mientras que los que arroja Scopus se descargan en formato de valores separados por comas (.csv). Asimismo, se obtienen archivos con extensión RIS (Research Information Systems) desde ambas bases de datos,

los cuales se utilizan para el intercambio de información y metadatos entre diversas herramientas de gestión bibliométrica y de visualización.

Fase III. Análisis de resultados

Los datos obtenidos fueron posteriormente organizados y tabulados en Microsoft Excel. Seguidamente, se procede a la generación de gráficos descriptivos de interés utilizando Power BI. Además, se utiliza VOSviewer, la cual es una herramienta de visualización ampliamente adoptada en la comunidad académica debido a su capacidad para representar y analizar relaciones entre términos, autores, palabras clave y otras entidades que pueden visualizarse como una red. Estos gráficos son examinados con el fin de describir de forma detallada la información relacionada con las métricas pertinentes.

3.1. Análisis de resultados

Luego de emplear la ecuación de búsqueda en las bases de datos señaladas como fuente de información para este análisis bibliométrico, se obtiene como resultado un total de 313 publicaciones divulgadas durante el periodo comprendido entre 2005 y 2023. Scopus por su parte arrojó 119 documentos y Web Of Science 194 unidades. A continuación, se presenta el análisis de la información obtenida como resultado por cada una de las métricas establecidas con anterioridad.

3.1.1. Documentos por país o territorio

Los 20 países que lideran en cuanto a la divulgación de investigaciones sobre los temas que se establecen en la ecuación de búsqueda se presentan en la Figura 9. Esta muestra que tanto China con un total de 50 publicaciones (39 en WoS y 11 en Scopus), Estados Unidos con 55 (28 en WoS y 27 en Scopus) y Australia con 38 documentos (20 en WoS y 18 en Scopus), se establecen como los países referentes en la divulgación de trabajos de investigación afines a dichas temáticas.

Es interesante notar que Brasil es el único representante de América Latina entre los 20 países referentes, con un total de siete publicaciones (cinco en WoS y dos en Scopus). Esto señala una oportunidad para que otros países de la región, como Colombia, aumenten su participación en la investigación, contribuyan al conocimiento y fomenten la intervención de las comunidades locales en procesos relacionados al cierre de parques solares.

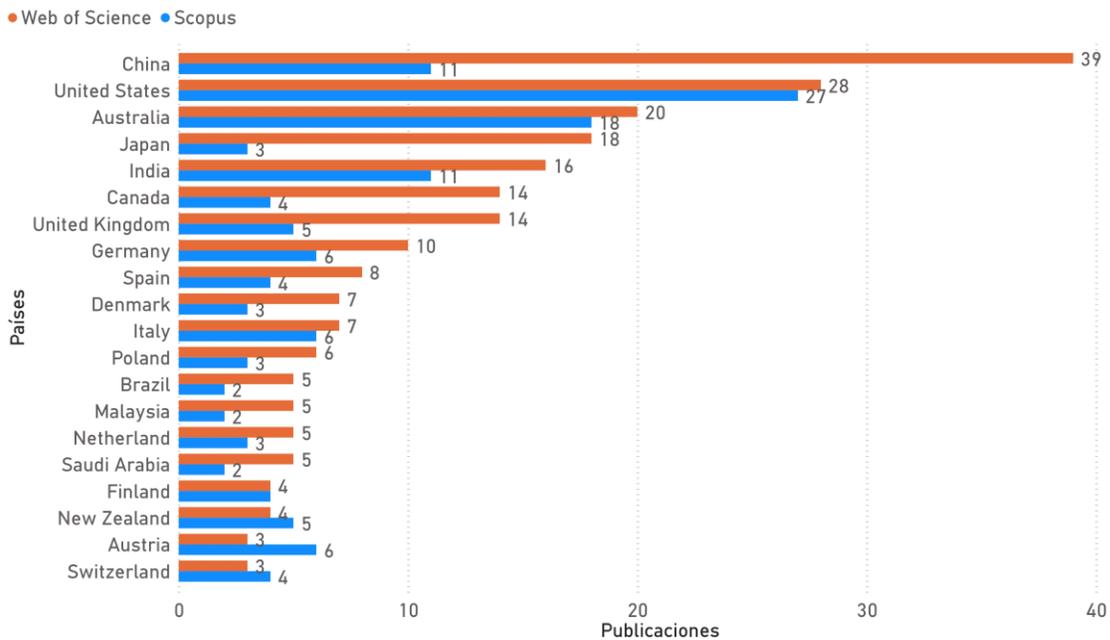


Figura 9. Número de publicaciones por países.

3.1.2. Documentos por año

La Figura 10 proporciona una visión interesante de la evolución en el número de publicaciones por año en ambas bases de datos (WoS y Scopus), en relación con los temas de interés. A continuación, se presentan algunas tendencias notables:

- **Período 2005-2014:** Durante estos años, se observan oscilaciones en la cantidad de documentos publicados, con valores que varían entre cero y cinco publicaciones por año. Esto puede indicar un interés variable o en desarrollo en el tema durante este período.
- **WoS a partir de 2015:** Se observa un aumento significativo en el número de publicaciones a partir del año 2015 en WoS, alcanzando su punto máximo en 2021 con 39 publicaciones. Sin embargo, desde ese año hasta el presente, se aprecia una tendencia a la baja. El aumento seguido de una disminución puede deberse a cambios en el interés de investigación, eventos específicos, o factores institucionales.
- **Scopus a partir de 2015:** A diferencia de WoS, en Scopus, la tendencia del número de publicaciones no siguió un aumento constante. Después de un aumento en 2015, se observa una tendencia a la baja hasta 2019. Sin embargo, en 2020 se produce un aumento notable, alcanzando su punto máximo en 2022 con 26 publicaciones. Este

patrón irregular podría estar relacionado con cambios en la visibilidad de las revistas indexadas en Scopus, así como con cambios en la dirección de la investigación en el campo.

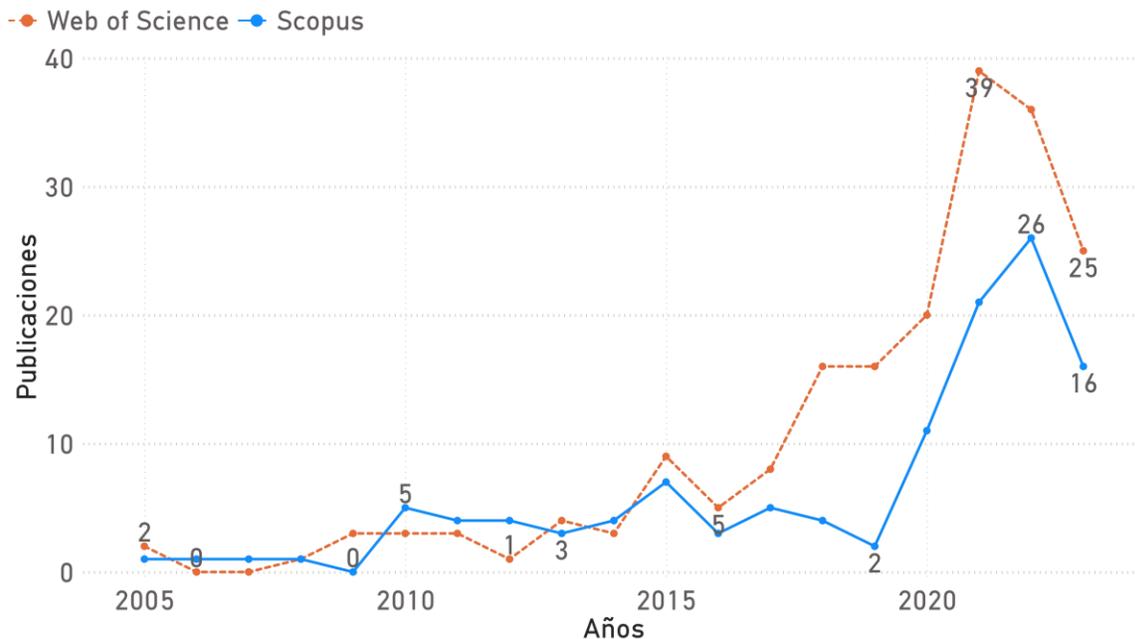


Figura 10. Número de publicaciones por año.

3.1.3. Documentos por tipo

La Figura 11 proporciona información detallada sobre el tipo de documentos predominantes en las publicaciones relacionadas con los temas de interés en las bases de datos Scopus y Web of Science. Para el caso de Scopus, en la Figura 11a se aprecia que los artículos científicos son el tipo de documento predominante, representando el 68,39% del total. En segundo lugar, se encuentran los artículos de conferencia con un 17,65% de representación y los artículos de revisión ocupan el tercer lugar con un 10,92% de participación.

En WoS, como lo muestra la Figura 11b, los artículos científicos también son dominantes en esta base de datos, constituyendo el 81,16% de las publicaciones. Los artículos de revisión ocupan el segundo lugar, representando el 13,04% del total. La presencia significativa de artículos de revisión destaca la importancia de resumir y sintetizar información, proporcionando una visión general y recursos de referencia valiosos para investigadores y profesionales interesados en estos temas.

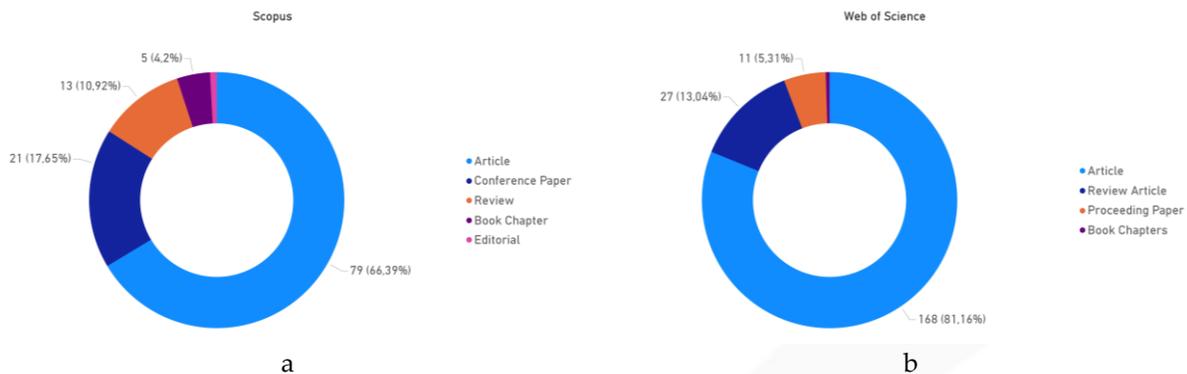


Figura 11. Número de publicaciones por tipo. a) Scopus; b) Web of Science.

3.1.4. Documentos por editorial

La Figura 12 destaca las editoriales de revistas científicas más utilizadas por los investigadores para publicar trabajos relacionados con los temas de interés. Elsevier es la editorial líder con un total de 34 documentos en Scopus (ver Figura 12a) y 93 en WoS (ver Figura 12b). MDPI ocupa el segundo lugar en ambas bases de datos 23 publicaciones en WoS y con 11 en Scopus. En Scopus, IEEE figura en tercer lugar con seis contribuciones, mientras que en WoS, Springer Nature se sitúa en esa posición con 18 contribuciones.

La preferencia por Elsevier en ambas bases de datos destaca su prominencia como una editorial líder en la publicación de investigaciones sobre los temas específicos de interés. La presencia de MDPI y otras editoriales como Springer Nature, Wiley y Taylor & Francis también indica una diversidad de opciones utilizadas por los investigadores para difundir sus investigaciones.

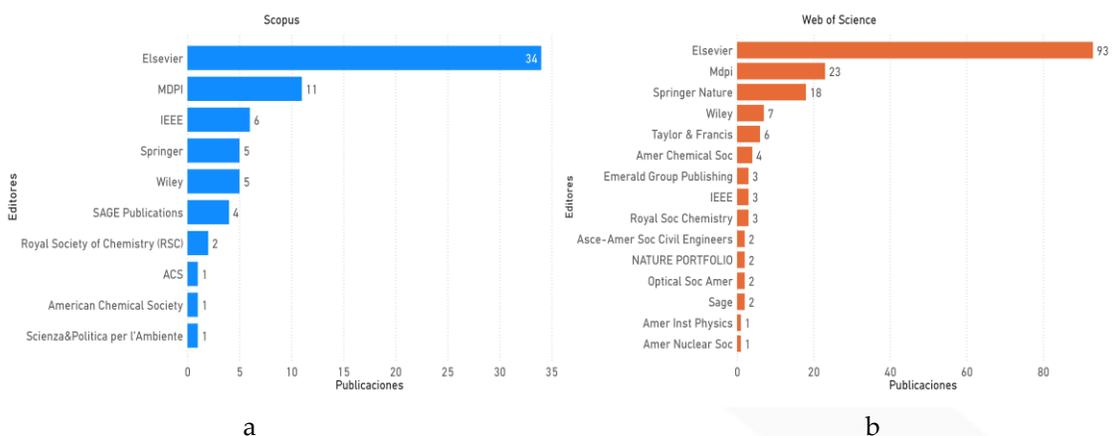


Figura 12. Número de publicaciones por editoriales. a) Scopus; b) Web of Science.

3.1.5. Documentos por afiliaciones

Las Figura 13 presenta las instituciones, empresas u organizaciones que han liderado investigaciones relacionadas con los aspectos tecnológicos y comunitarios en los procesos de cierre de parques solares. En la Figura 13a, se observa que el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) lidera con seis publicaciones, siendo la organización con más contribuciones en Scopus. Por otro lado, la Figura 13b muestra que la Universidad de Energía Eléctrica del Norte de China (NCEPU), y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) comparten el primer lugar en WoS con un total de siete contribuciones cada una.

Varias instituciones como la Universidad de Tokio, la Universidad de Waseda, la *Griffith University* y la Universidad de Nueva Gales del Sur (UNSW) de Sídney, también están involucradas en la investigación sobre estos temas. La presencia de organismos gubernamentales, universidades y laboratorios especializados, subraya la importancia de la colaboración entre diferentes actores en este campo multidisciplinario.

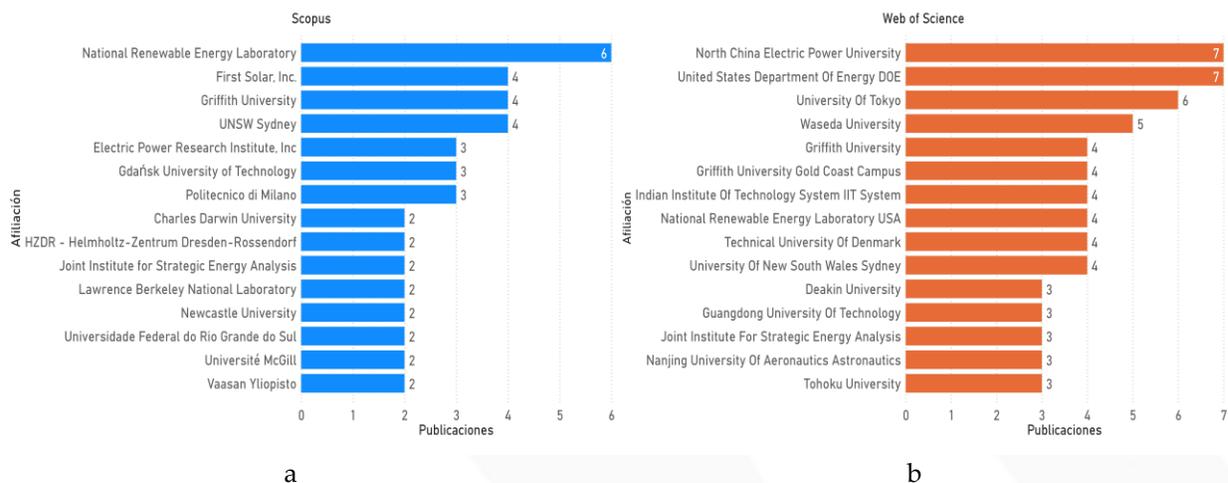


Figura 13. Número de publicaciones por afiliaciones. a) Scopus; b) Web of Science.

3.1.6. Documentos por patrocinadores de financiación

La Figura 14 resalta los principales patrocinadores involucrados en el campo de estudio relacionado con los aspectos tecnológicos y comunitarios en los procesos de cierre de parques solares, tanto en Scopus como en Web of Science. Esta información sobre patrocinadores es valiosa para comprender las fuentes de financiamiento en este campo específico y puede ser útil para analizar tendencias de inversión a lo largo del tiempo.

La Figura 14a muestra que el DOE lidera con un total de siete publicaciones, destacando su papel como importante patrocinador en este campo. Por otro lado, la Figura 14b presenta que la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China (NSFC) encabeza la lista en WoS con 21 contribuciones, indicando su fuerte apoyo a la investigación en esta área.

Otros patrocinadores notables incluyen la Sociedad Japonesa para la Promoción de la Ciencia (JSPS), el Ministerio de Educación, Cultura, Deportes, Ciencia y Tecnología de Japón, la *UK Research and Innovation* (UKRI), el Programa Marco de Investigación e Innovación 2020 (Horizon 2020), el Centro Australiano para Fotovoltaica Avanzada (ACAP), y el Consejo de Investigación de Ingeniería y Ciencias Físicas (EPSRC).

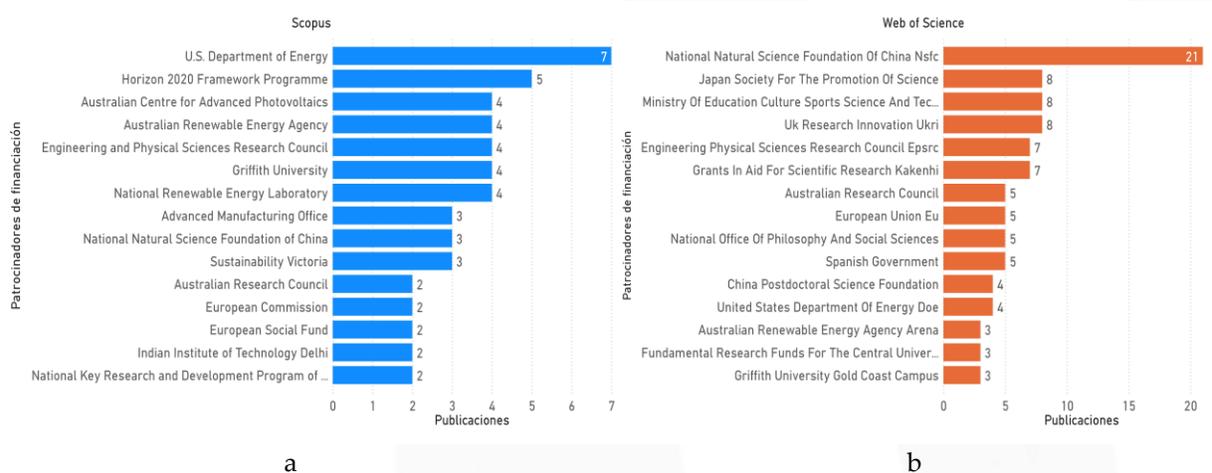


Figura 14. Número de publicaciones por patrocinadores de financiación. a) Scopus; b) Web of Science.

3.1.7. Documentos por área temática

La Figura 15 proporciona una representación visual de la distribución de documentos según el área temática en relación con los temas de interés del estudio. Esta distribución en la Figura 15a muestra que en Scopus las ciencias ambientales lideran con 57 documentos, y la energía ocupa el segundo lugar con 54 contribuciones, sugiriendo un interés significativo en aspectos ambientales y energéticos. Además, la ingeniería y las ciencias sociales también destacan con 42 y 18 publicaciones, respectivamente.

Por su parte, la Figura 15b presenta que en WoS la energía lidera con 72 publicaciones, resaltando su importancia en la investigación sobre cierre de parques solares, mientras que las ciencias ambientales ocupan el segundo lugar con 64 publicaciones. Asimismo, la ciencia y tecnología verde y sostenible, y la ingeniería ambiental son áreas temáticas relevantes, con 55 y 34 contribuciones respectivamente.

La presencia de la ingeniería y las ciencias sociales refleja la necesidad de un enfoque multidisciplinario para abordar los desafíos asociados con el cierre de parques solares que incluyan la participación de la comunidad.

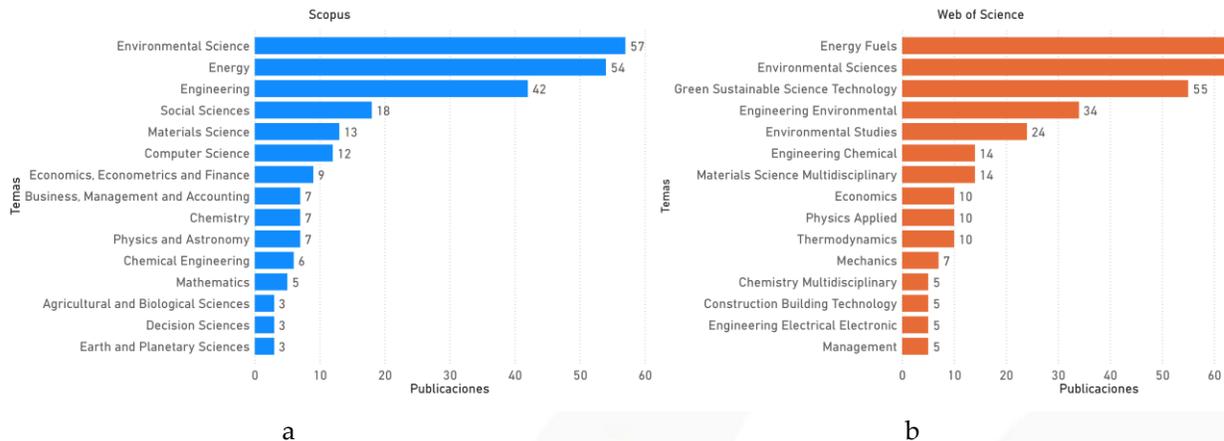


Figura 15. Número de publicaciones por área temática. a) Scopus; b) Web of Science.

3.2. Análisis con VOSViewer

VOSviewer es una herramienta avanzada de visualización de datos avanzada utilizada por la comunidad científica y desarrollada por el Centro de Estudios de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Leiden en los Países Bajos. Permite a los usuarios crear mapas visuales para analizar relaciones entre entidades como autores y términos clave. Con algoritmos sofisticados, destaca por su capacidad para simplificar datos complejos y revelar patrones y tendencias. En resumen, es una herramienta valiosa para investigadores que buscan comprender visualmente conexiones en sus conjuntos de datos.

Aprovechando la utilidad y el potencial de esta herramienta, se utiliza el archivo con extensión .ris con los datos bibliográficos de ambas bases de datos Scopus y Web of Science, se presenta el siguiente análisis de los resultados.

3.2.1 Scopus

Partiendo de la información bibliográfica de los 119 documentos arrojados como resultado por Scopus, se generó un mapa de coocurrencia de palabras clave, considerando mínimo 15 ocurrencias con el método de conteo fraccional. Se obtuvo un mapa conformado por 4 clústeres para un total de 19 palabras clave (Ver Figura 16).

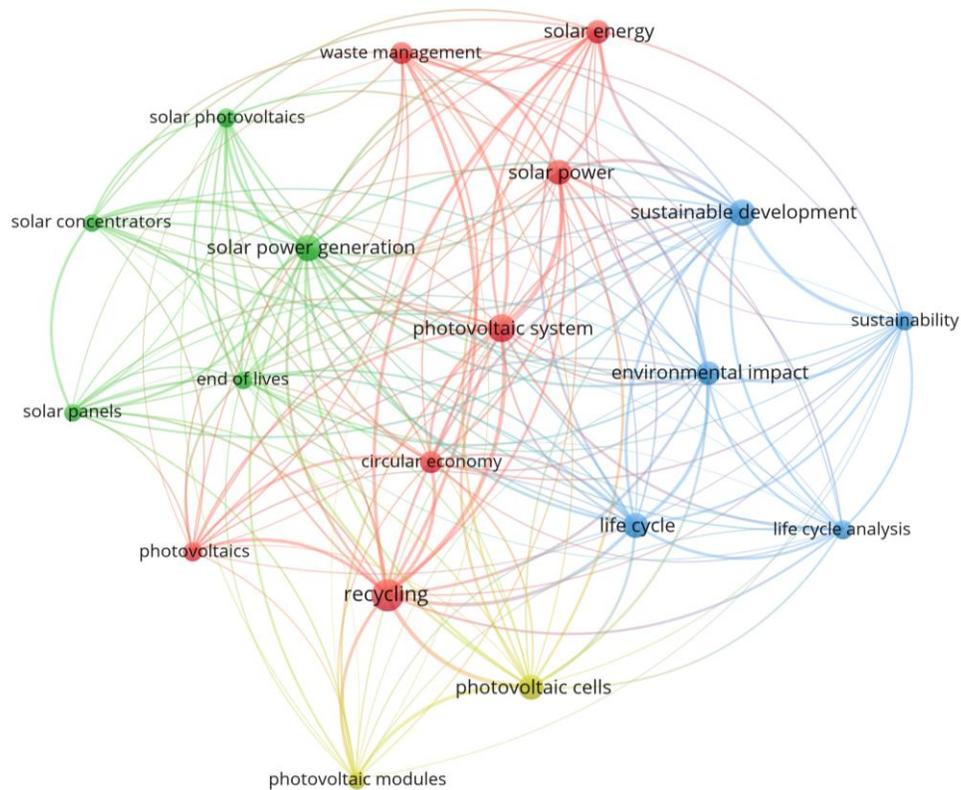


Figura 16. Redes de coocurrencia de palabras clave utilizando los datos de Scopus.

La Figura 17 muestra el resultado al resaltar el clúster 1 en rojo, que incluye 7 palabras clave. "recycling" destaca con 47 ocurrencias y 18 enlaces, demostrando su relevancia en las investigaciones consultadas. En el mismo clúster, "photovoltaic system" es notable con 34 ocurrencias y 18 enlaces. El clúster 2 en verde consta de 5 elementos, destacando "solar power generation" con 33 ocurrencias y 18 enlaces, y "end of lives" con 15 ocurrencias y 18 enlaces. En el clúster 3 (azul), la palabra clave principal es "sustainable development" con 32 ocurrencias y 18 enlaces, seguida de "life cycle" con 29 ocurrencias y 18 enlaces. Finalmente, en el clúster 4 amarillo, se resalta "photovoltaic cells" con 27 ocurrencias y 18 enlaces.

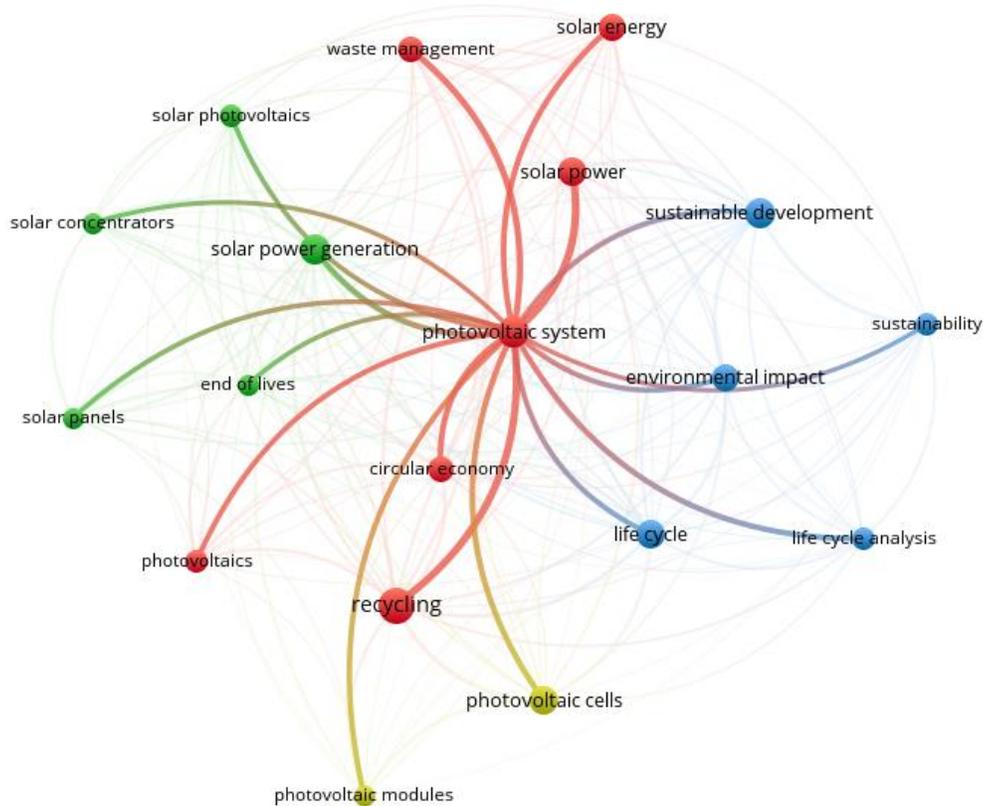


Figura 17. Enlaces para el clúster 1 del mapa de coocurrencias.

3.2.2 Web of Science

Del mismo modo que se desarrolló el análisis para Scopus, se parte de la información bibliográfica de los 194 documentos arrojados como resultado por Web of Science, se realizó un mapa de coocurrencia de palabras clave mediante la herramienta VOSViewer, considerando mínimo 8 ocurrencias con el método de conteo fraccional. Se obtuvo un mapa conformado por 4 clústeres para un total de 28 palabras clave. Como resultado, se obtuvo el mapa que presenta la Figura 18.

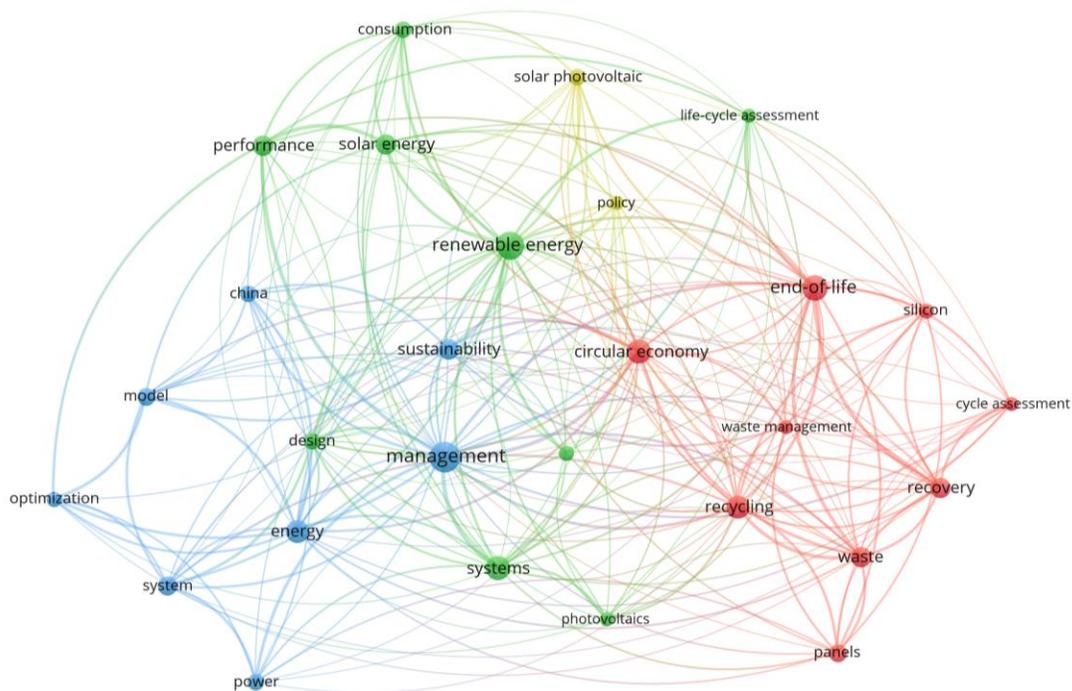


Figura 18. Redes de coocurrencia de palabras clave utilizando los datos de Web of Science.

Asimismo, la Figura 19 presenta los resultados al destacar el clúster 3 en azul, que incluye 8 palabras clave. *"management"* destaca con 34 ocurrencias y 26 enlaces, demostrando su relevancia en las investigaciones consultadas. En el mismo clúster, *"energy"* es notable con 20 ocurrencias y 19 enlaces, y además *"China"* se encuentra presente con 10 coocurrencias y 12 enlaces, lo cual denota la importancia de este país en las investigaciones realizadas relacionadas con las áreas de interés.

El clúster 1 de color rojo consta de 9 elementos, donde resaltan *"end-of-life"* con 23 coocurrencias y 25 enlaces, y *"circular economy"* con 22 coocurrencias y 23 enlaces hacia otros términos. El clúster 2 en verde está integrado por 9 elementos, destacando *"renewable energy"* con 29 ocurrencias y 27 enlaces, y *"systems"* con 21 ocurrencias y 23 enlaces. Por último, en el clúster 4 amarillo, se resalta *"solar photovoltaic"* con 10 ocurrencias y 15 enlaces, junto a *"policy"* con 8 coocurrencias y 15 enlaces.

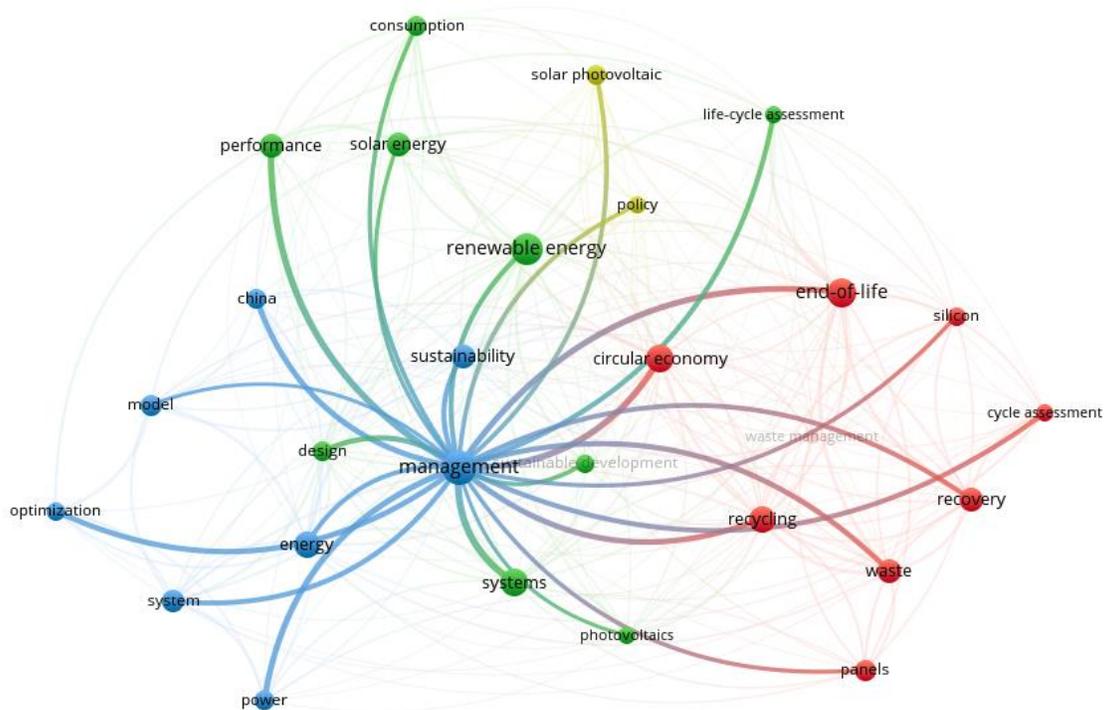


Figura 19. Enlaces para el clúster 3 del mapa de coocurrencias.

Los resultados demuestran la relevancia y la relación entre palabras claves importantes, que se pueden interpretar como el interés de la comunidad científica y académica a nivel mundial de investigar sobre los aspectos tecnológico y comunitarios ante el evento del fin de ciclo de vida útil de los componentes de los sistemas fotovoltaicos, escenario donde resaltan conceptos como el de economía circular, desarrollo sostenible, reciclaje, gestión y sistemas fotovoltaicos.

4. OPORTUNIDADES EN LOS PROCESOS DE CIERRE DE PARQUES SOLARES

La gestión ambiental y sostenible de los parques solares al final de su vida útil es un aspecto clave que requiere una planificación cuidadosa y una ejecución eficiente. El proceso de cierre implica el desmontaje de las instalaciones, la recuperación y el reciclaje de los materiales, y la restauración del entorno natural. Estos pasos involucran diversos retos, como la minimización del impacto ambiental, el cumplimiento de la normativa vigente y la optimización de los costes. Sin embargo, también ofrecen la posibilidad de promover la economía circular, impulsar la innovación tecnológica y contribuir al desarrollo sostenible de las comunidades locales.

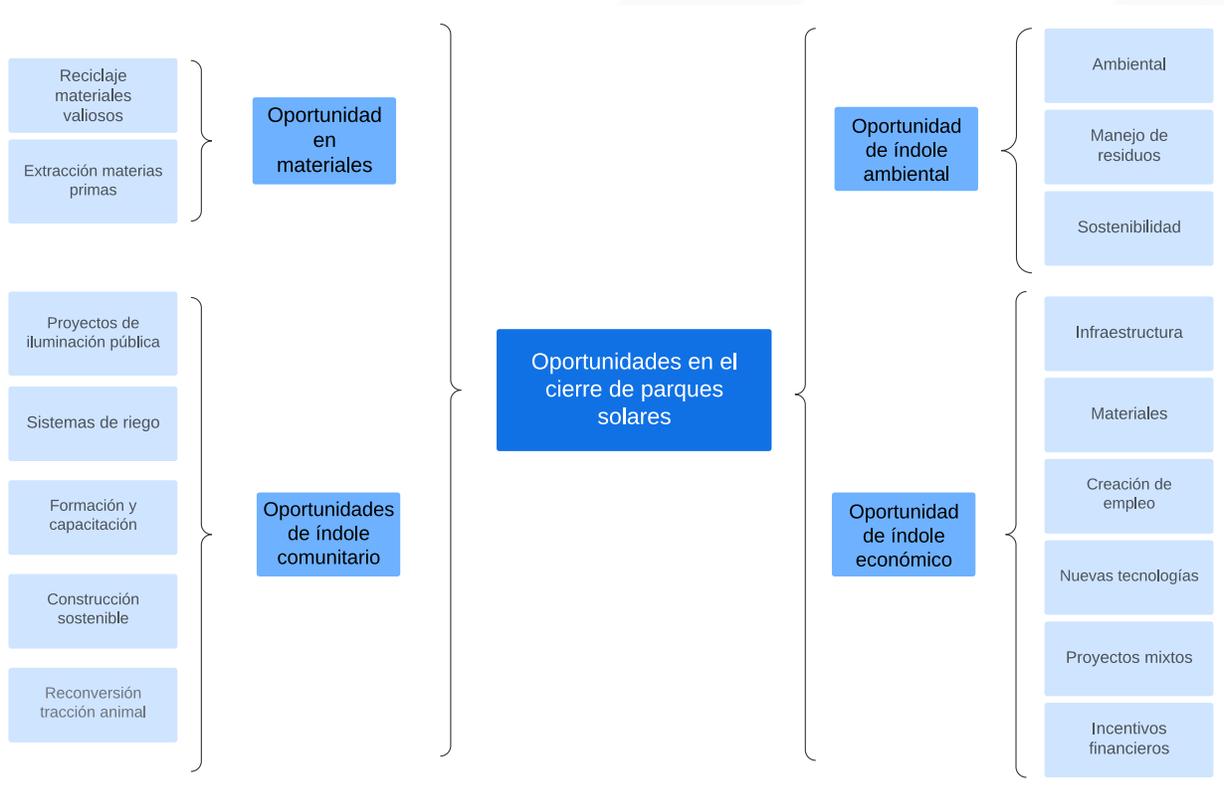


Figura 20. Identificación de oportunidades en los cierres de parques solares.

En la Figura 20 se identifican y proponen diversas oportunidades clasificadas según la caracterización descrita inicialmente. A continuación, se describen estas oportunidades clave que emergen durante el cierre de parques solares.

4.1. Oportunidades ambientales, manejo de residuos y de sostenibilidad asociadas al cierre de parques solares.

4.1.1 Oportunidades ambientales

- **Restauración del terreno:** su objetivo es restaurar la forma y la función del terreno que ha sido degradado y/o destruido debido a la intervención humana, ya sea en actividades mineras u obras civiles como en el caso de las instalaciones y la infraestructura asociada con el parque solar [4], [5]. Para ello, se utilizan materiales que favorecen la recuperación de la estructura, la biodiversidad y la actividad biológica del suelo [4], empleando materiales orgánicos que facilitan la regeneración natural del entorno sin necesidad de intervenciones artificiales [6].

En varias zonas de Colombia, como el Caribe, el Magdalena Medio, el Tolima y el Valle del Cauca, se está llevando a cabo un proyecto de restauración ecológica del bosque seco tropical, un ecosistema que tiene una riqueza de especies y que ha sufrido mucho por las actividades humanas, como la ganadería, la agricultura y la minería. El proyecto fue formulado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con el apoyo del Instituto Alexander Von Humboldt y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, y tiene como objetivo recuperar este hábitat tan importante para la biodiversidad y el equilibrio ambiental [7].

Asimismo, el Resguardo Indígena Arhuaco ha iniciado un proyecto de restauración ecológica para proteger su territorio y su cultura, el cual involucra a 750 familias. El objetivo es recuperar las áreas degradadas y establecer viveros comunitarios donde se producen las plantas nativas que se utilizan para reforestar [8].

- **Reutilización de la infraestructura:** En lugar de demoler o desechar las instalaciones existentes, la reutilización de la infraestructura consiste en asignarles un nuevo uso o función. Este enfoque pretende aprovechar al máximo el valor de los activos ya construidos y minimizar el impacto ambiental relacionado con la construcción de nuevas estructuras.

En ese orden de ideas, se debe evaluar la posibilidad de reacondicionar la infraestructura existente, como las plataformas y las conexiones eléctricas para, por ejemplo, llevar a cabo una repotenciación parcial o total de parque solar,

minimizando costos de inversión y permitiendo que este continúe generando energía limpia [9].

Esta infraestructura puede servir como base para iniciar nuevos proyectos de energía renovable o para desarrollar sistemas de suministro de energía para sistemas de riego a pequeños agricultores, así como para llevar a cabo la electrificación en áreas rurales y/o el fortalecimiento de las instalaciones en lugares clave como hospitales, plazas y centros educativos. Este enfoque puede fortalecer la conexión con la comunidad, generando beneficios integrales donde la población pueda contribuir al valor de las iniciativas de energía renovable.

- **Investigación y desarrollo:** un área clave de investigación y desarrollo en los procesos de cierre de parques solares se centra en abordar desafíos y tapar lagunas de conocimiento asociadas a la finalización de la vida útil de estas instalaciones. Esta línea de investigación tiene como objetivo identificar oportunidades para crear soluciones que reduzcan al mínimo el impacto ambiental, promuevan la reutilización de materiales e infraestructuras y estimulen la participación comunitaria durante la transición fuera de la operación de los parques solares.

Un componente esencial de la investigación es el reciclaje de los paneles solares, lo cual implica la exploración de métodos más eficientes y estándares sostenibles para la gestión y recuperación de materiales fundamentales como el silicio, el vidrio, el aluminio y otros elementos, tomando como bases técnicas de reciclaje existentes tales como el reciclado térmico y mecánico [10]. Otra actividad importante que permite desarrollar el cierre de parques solares es la investigación y el desarrollo de tecnologías o métodos de desmantelamiento seguro, de manera que se minimicen los riesgos ambientales y se asegure la gestión adecuada de componentes potencialmente peligrosos.

Para una perspectiva más orientada a la ingeniería, es posible elaborar metodologías más detalladas y precisas con el propósito de realizar una evaluación exhaustiva del impacto ambiental, así como de las implicaciones económicas y financieras asociadas a la última fase del ciclo de vida de un parque solar. Así, se puede obtener información que ayude a elaborar modelos y simulaciones, para calcular los costos y beneficios de los procesos de cierre, y comparar diferentes opciones y escenarios, con el objetivo de elegir la forma ideal de realizar el cierre del proyecto.

4.1.2 Oportunidades en el manejo de residuos

- **Reciclaje de paneles solares:** los beneficios del reciclaje de paneles solares son muchos y variados, tanto para el medio ambiente como para la economía y la sociedad. Los paneles solares contienen materiales que, al terminar su vida útil que normalmente es de unos 25 a 30 años [11], se pueden aprovechar o recuperar, como el silicio, el vidrio, el aluminio, el cobre y otros metales. Al reciclarlos, se previene la generación de residuos peligrosos, se conservan recursos naturales y se disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero.

A pesar de las oportunidades que ofrece el reciclaje de paneles solares, también plantea desafíos tecnológicos, como la necesidad de desarrollar métodos eficaces para separar y recuperar materiales de manera eficiente, especialmente cuando se enfrenta a grandes cantidades de paneles al final de su vida útil [12]. Además, el establecimiento de regulaciones y estándares específicos para el reciclaje de paneles solares es esencial para garantizar prácticas ambientalmente responsables en la industria solar y promover un enfoque sostenible hacia el manejo de residuos electrónicos fotovoltaicos.

Los países de la Unión Europea tienen una normativa que exige el reciclaje de los paneles solares al final de su vida útil. El fabricante es responsable de asegurar que al menos el 85% de los paneles solares fotovoltaicos que ha comercializado sean reciclados de forma adecuada [9]. Mientras que, en varios países de América Latina, como Colombia y Chile, todavía no existe una legislación específica al respecto. Esta situación representa un desafío, pero también una oportunidad para avanzar en el desarrollo de una industria solar más sostenible y responsable con el medio ambiente.



Figura 21. Planta de reciclaje de la empresa ROSI (Return of Silicon) en Grenoble, Francia[13].

- **Residuos electrónicos:** los aparatos eléctricos y electrónicos que se desechan o se vuelven obsoletos se convierten en residuos electrónicos. Estos residuos contienen sustancias tóxicas como el plomo, el cadmio y otros metales pesados, y pueden tener un impacto negativo en el ambiente y la salud de las personas [14], [15]. No obstante, componentes como los inversores y cables, poseen materiales que pueden ser reciclados y aprovechados, como el cobre, el aluminio, el oro y la plata [16]. Los productos reciclados se trasladan a instalaciones especializadas donde se transforman en nuevos materiales. Por ejemplo, el plástico se puede moldear en gránulos o bolitas, el vidrio en láminas, el aluminio en barras, el cobre en cable, el oro en joyería, etc.

Los beneficios del reciclaje de los residuos electrónicos son múltiples: se reduce la contaminación, se conservan los recursos naturales, se ahorra dinero, se genera empleo e innovación, y se contribuye a la economía circular. No obstante, también existen algunos obstáculos, como la falta de regulación, infraestructura, sensibilización y colaboración de los distintos actores involucrados (comunidad y proveedores tecnológicos).

En Colombia, el Grupo Retorna, una organización que promueve el reciclaje responsable de diferentes tipos de residuos cuenta con seis programas posconsumo que se enfocan en la recolección y gestión adecuada de productos que

ya no se usan, como envases de plaguicidas, equipos electrónicos, pilas, electrodomésticos, baterías de plomo ácido y llantas [17]. De esta manera, promueven la conciencia ambiental mediante la sensibilización, contribuyendo a la protección del medio ambiente, y al desarrollo de la economía circular en el país.

- **Desmantelamiento seguro:** para asegurar una gestión ambiental responsable de la infraestructura del parque solar, es necesario implementar métodos innovadores y eficientes en el proceso de desmontaje, que incluyan la separación segura de componentes y el tratamiento adecuado de materiales que puedan ser peligrosos. De esta forma, se reducen los riesgos ambientales, como la contaminación del suelo, y cuerpos de agua, y se facilita una disposición final segura de los componentes del parque solar.

El proceso de desmantelamiento permite a las empresas demostrar el compromiso con la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente al cumplir la normativa vigente en cada país, lo cual mejora su imagen y reputación. En lo relacionado a las regulaciones, en España es obligatorio contar con una garantía de desmantelamiento y restitución antes de instalar un proyecto solar fotovoltaico. El objetivo de esta garantía es asegurar que, al finalizar la vida útil de las instalaciones, se proceda a su retirada y a la restauración del terreno y el entorno a su estado original [18].

Además de las oportunidades de recuperación, reciclaje y reutilización de la infraestructura y los componentes de los sistemas solares fotovoltaicos, durante el desmantelamiento también se estimula la generación de empleo. Ya que, para ello, se requiere de personal capacitado para desmontar, transportar, tratar y disponer adecuadamente los elementos de los sistemas solares. También se incentiva a los emprendedores a crear plantas de reciclaje que contribuyan al desarrollo económico local, la economía circular, y la sostenibilidad de los parques solares.

4.1.3 Oportunidades de sostenibilidad

- **Compromiso comunitario:** este concepto se refiere a la interacción y la colaboración entre los diversos actores locales que presentan un interés o una responsabilidad en el desarrollo, la operación y el cierre de los proyectos solares. Estos actores pueden incluir a las autoridades, las empresas privadas, las organizaciones de la sociedad civil y los ciudadanos que viven o trabajan en las zonas de influencia de los parques solares. El objetivo del compromiso comunitario

es crear un espacio de diálogo y participación que permita identificar y atender las necesidades, las expectativas y las preocupaciones de cada parte, así como generar beneficios compartidos y minimizar los riesgos potenciales [19]. Para ello, se identifican las siguientes oportunidades:

Comunicar y concientizar a la población acerca de los beneficios asociados al reciclaje y la reutilización de los materiales y componentes de los paneles solares, con el potencial de generar empleo, fomentar la innovación y agregar valor a la comunidad. Esto implica proporcionar información transparente y considerar de manera cuidadosa las necesidades y preocupaciones de la comunidad.

Colaborar estrechamente con las comunidades locales para definir y llevar a cabo el plan de cierre y restauración de los terrenos donde se ubicaron los paneles solares, tomando en cuenta sus expectativas e intereses. Este proceso puede incluir la creación de espacios para la participación y el empoderamiento de las comunidades locales, asegurando así una planificación y ejecución del cierre que refleje las perspectivas y contribuciones de quienes residen en la zona.

- **Evaluación del impacto ambiental:** La evaluación de impacto ambiental (EIA) es un proceso que analiza, anticipa, evalúa y mitiga los impactos negativos que una acción, obra o proyecto puede generar sobre el medio ambiente [20]. La EIA es una herramienta que busca fomentar el desarrollo sustentable y evitar o minimizar los daños ambientales, y generar impactos positivos en el entorno [21].

El cierre de parques solares promueve la participación de la comunidad en los procesos de toma de decisiones, fomentando la implementación de evaluaciones de impacto ambiental. Esta área se vuelve crucial para garantizar una transición sin contratiempos que considere las inquietudes locales. La ejecución efectiva se logra mediante la creación y aplicación de un plan de seguimiento que permita verificar el cumplimiento de las medidas propuestas, tales como la revegetación, el control de la erosión y la recuperación de los ecosistemas locales. De esta forma, se presenta la oportunidad de establecer sistemas de monitoreo de la calidad del suelo y del agua, permitiendo una medición precisa de los impactos ambientales.

4.2. Oportunidades económicas y financieras asociadas al cierre de parques solares.

El cierre de parques solares, cuando se gestiona de manera eficiente y sostenible, puede ofrecer diversas oportunidades económicas y financieras asociadas a la economía circular y la participación de las comunidades. Aquí hay algunas de las oportunidades clave:

4.2.1 Reutilización de Infraestructura

La reutilización de infraestructura en el cierre de parques solares puede ser una oportunidad económica y financiera para las comunidades cercanas.

- **Equipos y Paneles Solares:** Se pueden reutilizar los paneles solares y otros equipos en nuevos proyectos o integrarlos en sistemas de energía existentes.
- **Infraestructura de Soporte:** Estructuras, cables y otros componentes pueden ser desmontados y reutilizados en otras instalaciones o proyectos.

Es importante destacar que la reutilización de infraestructura debe ser evaluada cuidadosamente para garantizar su viabilidad técnica y económica. Se deben considerar factores como la calidad y el estado de los equipos y paneles solares, así como los costos asociados con el desmontaje, transporte y reinstalación de la infraestructura

4.2.2 Reciclaje de Materiales

- **Reciclaje de Paneles Solares:** Desarrollar tecnologías y procesos para el reciclaje de paneles solares al final de su vida útil, lo que puede generar una nueva industria y empleo. La recuperación de materiales como silicio, aluminio y vidrio de los paneles solares puede generar ingresos y reducir la necesidad de extracción de nuevos recursos [22].
- **Recuperación de Metales y Componentes Electrónicos:** La gestión adecuada de residuos electrónicos puede generar oportunidades económicas mediante la recuperación de metales valiosos y la reducción de impactos ambientales [23].

4.2.3 Creación de Empleo Local

La creación de empleo en la fase de desmantelamiento y reciclaje puede beneficiar a las comunidades locales, especialmente si se implementan programas de formación y contratación local. El desmantelamiento eficiente de parques solares no solo implica la desinstalación de infraestructuras, sino también la gestión adecuada de residuos y la integración de prácticas sostenibles [24]. Implementar medidas estratégicas puede no solo

ahorrar costos sino también fortalecer las relaciones con las comunidades locales y promover la sostenibilidad económica y ambiental.

- **Involucramiento Local:** Integrar a la mano de obra local en el proceso de desmantelamiento y gestión de residuos, generando oportunidades económicas para la comunidad circundante.
- **Reducción de Costos Laborales:** Al utilizar la mano de obra local, se pueden reducir los costos asociados a la contratación de personal externo, aprovechando el conocimiento y la experiencia de la comunidad.

Estas medidas no solo contribuyen a la reducción de costos en el desmantelamiento de parques fotovoltaicos, sino que también promueven la inclusión social y la sostenibilidad ambiental. Al adoptar enfoques que beneficien a la comunidad local y fomenten prácticas circulares, se construye una base sólida para un cierre eficiente y sostenible de instalaciones solares.

4.2.4 Desarrollo de Nuevas Tecnologías y Servicios.

- **Desarrollo de redes distribuidas:** Implementar sistemas de energía distribuida que permitan a las comunidades generar y gestionar su propia energía, reduciendo la dependencia de la red eléctrica convencional.
- **Tecnologías de Almacenamiento:** Invertir en tecnologías de almacenamiento de energía, como baterías, para maximizar la eficiencia y estabilidad de la energía generada.
- **Servicios de Gestión de Residuos:** Empresas locales pueden ofrecer servicios de gestión de residuos especializados en la industria solar.
- **Inversiones Comunitarias:** Involucrar a la comunidad en la propiedad o inversión en proyectos de energía renovable puede generar beneficios económicos directos para los residentes locales.
- **Formación en energía renovable:** Ofrecer programas de formación para la comunidad local en áreas relacionadas con energía renovable, lo que puede generar empleo y aumentar las habilidades de la población. Programas de educación y capacitación pueden preparar a la comunidad para participar en la gestión y operación de proyectos de energía renovable.

- **Desarrollo de Mercados de Segunda Mano:** Estimular la creación de mercados para la venta de componentes solares reacondicionados o usados.

4.2.5 Desarrollo de Proyectos Mixtos

Integrar infraestructuras solares con otros proyectos, como agricultura o parques recreativos, para maximizar el uso de la tierra y generar beneficios adicionales para la comunidad.

- **Integración de infraestructuras solares y agricultura**

La integración de infraestructuras solares y agricultura puede ser una oportunidad para maximizar el uso de la tierra y generar beneficios adicionales para la comunidad. Por ejemplo, se pueden instalar paneles solares en los techos de los invernaderos para generar energía renovable y reducir los costos de energía de la agricultura [25]. Además, la sombra proporcionada por los paneles solares puede ayudar a reducir la temperatura en los invernaderos, lo que puede mejorar el crecimiento de las plantas.

Otra forma de integrar infraestructuras solares y agricultura es a través de la implementación de sistemas de riego automatizados con paneles solares fotovoltaicos como fuente de energía alternativa [26]. Estos sistemas pueden ayudar a optimizar el uso del agua y mejorar la eficiencia de la producción agrícola. Además, la integración de infraestructuras solares y agricultura puede ser una oportunidad para implementar prácticas de agricultura sostenible y mejorar la resiliencia de las comunidades locales [24].

- **Integración de infraestructuras solares y parques recreativos**

La integración de infraestructuras solares y parques recreativos también puede ser una oportunidad para maximizar el uso de la tierra y generar beneficios adicionales para la comunidad, como senderos para caminar, áreas de juegos o zonas de picnic. Esto convierte el espacio en un recurso multifuncional que mejora la calidad de vida de la comunidad. Por ejemplo, se pueden instalar paneles solares en los techos de los edificios del parque para generar energía renovable y reducir los costos de energía del parque. Además, la sombra proporcionada por los paneles solares puede ayudar a reducir la temperatura en el parque, lo que puede mejorar la experiencia de los visitantes [27].

Otra forma de integrar infraestructuras solares y parques recreativos es a través de la implementación de sistemas de iluminación solar para los senderos y áreas de picnic. Estos sistemas pueden ayudar a reducir los costos de energía y mejorar la seguridad en el parque. Además, la integración de infraestructuras solares y parques recreativos puede ser una oportunidad para implementar prácticas de turismo sostenible y mejorar la resiliencia de las comunidades locales [26].

Es importante destacar que la integración de infraestructuras solares, agricultura y parques recreativos debe ser evaluada cuidadosamente para garantizar su viabilidad técnica y económica. Se deben considerar factores como la calidad y el estado de los paneles solares, así como los costos asociados con la instalación y mantenimiento de la infraestructura [28].

4.2.6 Incentivos financieros y fiscales

En Colombia, se han implementado diversos incentivos financieros y fiscales para fomentar el de energías renovables, especialmente en el ámbito de la energía solar. Estos incentivos son fundamentales para promover la transición energética y combatir barreras regulatorias y altos costos asociados con fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER).

- **Incentivos Fiscales según el Decreto 2143 de 2015:** El Decreto 2143 de 2015 establece beneficios tributarios específicos para las empresas que invierten en proyectos de energías renovables [29], incluyendo la energía solar. Entre estos beneficios se encuentran:
 - **Exención de Impuestos sobre la Renta:** Las empresas que invierten en proyectos de energía solar pueden beneficiarse de la exención de impuestos sobre la renta, proporcionando un estímulo financiero significativo [29].
 - **Reducción de Impuestos sobre las Ventas:** Adicionalmente, se contempla la posibilidad de reducción de impuestos sobre las ventas, lo que contribuye a la viabilidad financiera de los proyectos [29].
- **Incentivos Económicos para Energía Solar Fotovoltaica (FV):** Los incentivos económicos destinados a la energía solar fotovoltaica incluyen diversas medidas que buscan estimular la adopción de esta tecnología. Estos incentivos son esenciales para contrarrestar los desafíos económicos asociados con la

implementación de fuentes no convencionales de energía renovable [30]. Algunas de estas medidas son:

- **Tarifas Garantizadas:** Se establece un mecanismo de tarifas garantizadas, asegurando un precio preestablecido para la compra de energía generada a partir de fuentes renovables, como la solar fotovoltaica [30].
- **Incentivos Fiscales Variados:** Incluyen exenciones de IVA y aranceles, deducción en el impuesto a la renta, depreciación acelerada, créditos fiscales, subsidios, préstamos o inversiones directas del estado. Estos incentivos buscan aliviar la carga financiera asociada con la implementación de proyectos de energía solar [30].
- **Instrumentos para la Reducción de Emisiones:** Se implementan medidas como impuestos y topes de emisiones de CO₂, incentivando la adopción de tecnologías más limpias y sostenibles [30].

Estos incentivos han demostrado ser cruciales para el desarrollo y adopción exitosa de la tecnología solar fotovoltaica en diversas regiones del mundo. Además de generar ahorros significativos, estos estímulos contribuyen al avance hacia un modelo energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

4.3.Oportunidades de reciclaje de materiales valiosos asociadas al cierre de parques solares.

La energía solar ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, y los parques solares han emergido como pilares fundamentales en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. En el contexto del cierre de parques solares, resulta imperativo considerar con detenimiento las oportunidades inherentes al reciclaje de materiales valiosos. Estos parques, emblemas de la transición hacia fuentes de energía más sostenibles, demandan una gestión responsable al alcanzar el término de su ciclo de vida.

A medida que aumenta el número de módulos solares que se acercan al final de su vida útil de aproximadamente 30 años [31], surge la necesidad de abordar de manera efectiva el desafío del desmantelamiento y reciclaje de estos dispositivos. Este fenómeno plantea importantes consideraciones ambientales y económicas, y la industria solar está cada vez más enfocada en implementar prácticas sostenibles para gestionar el creciente flujo de paneles solares al final de su ciclo de vida.

Antes de abordar el proceso de reciclaje, es decir, el desmantelamiento y procesamiento de los elementos que conforman el sistema de los parques solares resulta imperativo llevar a cabo una evaluación exhaustiva. Esta evaluación tiene como objetivo identificar, en una primera instancia, oportunidades de reutilización para conferir una segunda vida a los componentes del sistema. Sin embargo, en casos en los cuales los elementos presentan un rendimiento deficiente sin perspectivas directas de reutilización, se hace imperativo proceder con su reciclaje.

La evaluación inicial se convierte en un paso crítico para maximizar la eficiencia y sostenibilidad en la gestión de los parques solares al final de su vida útil. Durante este proceso, se analizan detalladamente los componentes, tales como paneles solares, estructuras metálicas y otros elementos conexos. Se busca determinar si estos elementos pueden ser sometidos a procesos de reacondicionamiento, reparación o incluso reubicación en nuevos proyectos solares con menor exigencia energética.

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (en inglés *International Renewable Energy Agency*, IRENA), el costo asociado a las materias primas que componen un panel solar de Silicio está distribuido de la siguiente manera: la Plata representa el 47% del valor del panel, el Aluminio el 26%, el Silicio el 11%, el Cobre y el vidrio contribuyen con un 8% cada uno [32], como se aprecia en la Figura 22.

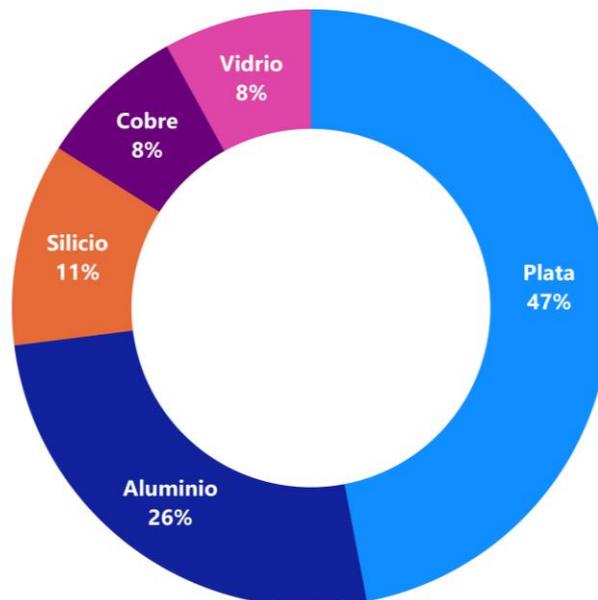


Figura 22. Costo asociado de las materias primas que componen un panel solar.

Durante el proceso de reciclaje de paneles solares, diversos materiales experimentan distintos destinos. Materiales como el vidrio, cobre y aluminio son recuperados, posibilitando su reintegración en la cadena de producción. El vidrio, por ejemplo, puede ser reutilizado en la fabricación de nuevos paneles solares o en otras aplicaciones. Del mismo modo, el cobre y el aluminio, presentes en conductores eléctricos y posiblemente en otros componentes, son susceptibles de fundirse y reutilizarse [33].

El cobreobjetos de un panel solar de silicio constituye aproximadamente dos tercios del peso total del dispositivo. La reciclabilidad de estos paneles al llegar al final de su ciclo de vida es esencial para mitigar el impacto ambiental asociado a la industria. Un estudio llevado a cabo por investigadores de la Universidad Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) ha revelado que el vidrio delaminado puede ser reutilizado sin requerir procesos de fusión adicionales [34]. Este hallazgo supone ahorros sustanciales tanto en términos de consumo energético como en emisiones de carbono asociadas con la producción de vidrio. La lámina de vidrio, tras el proceso de delaminación, está preparada para ser empleada como cubierta de vidrio en la fabricación de otro panel solar o como material arquitectónico.

En contraste, las células solares, en particular el silicio que contienen, así como el plástico, son incinerados en el proceso de reciclaje. No obstante, es relevante destacar que parte del silicio puede ser recuperado para su reutilización, a pesar de la incineración inicial. Este enfoque mixto refleja la complejidad del reciclaje de paneles solares y la necesidad de abordar de manera diferenciada los distintos materiales que los componen. Aunque ya se ha iniciado la comercialización del reciclaje de módulos fotovoltaicos en desuso, actualmente se encuentran en desarrollo diversas tecnologías con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso, la viabilidad económica, las tasas de recuperación y reciclaje, así como el desempeño ambiental [33].

El proceso de reciclaje de sistemas de energía fotovoltaica tiene el potencial de crear empleo a nivel local, proporcionando beneficios a las comunidades circundantes. Un ejemplo ilustrativo es un estudio que respalda la viabilidad del enfoque de economía circular en el reciclaje aplicado a una planta solar en Kazajstán, país de Asia Central, contribuyendo así a que este territorio logre su meta de alcanzar la neutralidad de carbono para el año 2060 [35]. Se trata de la planta de energía solar Burnoye Solar Power Plant, con una capacidad de 50 MWp en la región de Jambyl, Kazajstán, la cual fue modelada utilizando la plataforma *RETScreen Expert*, un software especializado en gestión de energías limpias. El objetivo era evaluar cómo la implementación del concepto de

economía circular podría potenciar los beneficios ambientales y afectar el costo nivelado de la electricidad generada.

Los resultados revelaron que la introducción del reciclaje de paneles fotovoltaicos en esta instalación incrementaría el beneficio neto actual del proyecto en aproximadamente 0,373 millones de dólares. Este ajuste provocaría un ligero aumento tanto en el índice de costo-beneficio como en la tasa interna de retorno (TIR) sobre el capital, ambos aumentando en menos del 1% en comparación con la línea base sin reciclaje [35].

4.4.Oportunidades de desarrollo comunitario en los procesos de cierre de parques solares.

La finalización de un proyecto solar requiere la retirada de los componentes, la restauración del terreno, la recuperación de la vegetación y el seguimiento de los impactos ambientales. Asimismo, el cierre debe tener en cuenta las demandas y aspiraciones de las poblaciones locales, que pueden sufrir las consecuencias de la reducción de ingresos, empleos y servicios ecosistémicos. Por ello, el cierre debe contemplar acciones de desarrollo comunitario que faciliten la adaptación a nuevas actividades económicas, el aumento de las competencias locales, la preservación de los recursos naturales y la mejora del bienestar.

Los componentes de un sistema solar fotovoltaico, como los paneles solares, las baterías, los cables y otros, tienen un potencial de reutilización después de terminar su vida útil en el parque solar. Estos elementos pueden servir para desarrollar diferentes proyectos que beneficien a la comunidad. A continuación, se mencionan algunas oportunidades de desarrollo comunitario que surgen al momento del cierre del parque solar:

- Una de las aplicaciones más importantes son el fortalecimiento de la iluminación del espacio público. El uso de la energía solar para alimentar las lámparas permite ahorrar recursos y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, contribuye a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, al ofrecerles mayor seguridad y comodidad durante las horas nocturnas.
- La utilización de sistemas de riego que funcionan con energía solar reciclada es una opción sostenible para aumentar la productividad de los huertos y las zonas agrícolas locales, favoreciendo el desarrollo económico de la comunidad y su independencia energética.

- Estos proyectos tienen un gran valor educativo, ya que los procesos de cierre pueden convertirse en espacios de aprendizaje sobre el medio ambiente y la tecnología. Al reciclar componentes de los sistemas solares, se promueven prácticas sostenibles y se crean oportunidades educativas que pueden mejorar las competencias técnicas y la sensibilidad ambiental de los habitantes locales.
- Se pueden aprovechar los materiales reciclados para crear edificaciones sostenibles o ampliar y fortalecer las existentes. Esto implica la construcción o renovación de instalaciones comunitarias como plazas de mercado, centros educativos y de salud, y fomentar prácticas de construcción amigables con el medio ambiente.
- Otra oportunidad se encuentra al reutilizar materiales para construir sistemas de bombeo de agua que funcionen con energía solar. Estos sistemas consisten en paneles solares reciclados, baterías de almacenamiento de energía y tecnologías de bombeo eficientes que no requieren conexión a la red eléctrica convencional. Estos sistemas son especialmente útiles en zonas aisladas o con dificultades para acceder a la electricidad.
- Los vehículos que funcionan con motor de combustión e incluso con tracción animal, son muy utilizados en las comunidades del corredor vida Cesar-Magdalena, donde facilitan el transporte de mercancías y la ejecución otras actividades como la movilización de personas. Sin embargo, estos medios de transporte también pueden aprovechar componentes como los paneles solares y las baterías, que se pueden reciclar para crear vehículos de tracción eléctrica. De esta manera, se podría contribuir a una transición hacia formas de movilidad más sostenibles.

5. APROVECHAMIENTO COMUNITARIO EN EL CIERRE DE PARQUES SOLARES

5.1. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible como marco para la asociatividad y el trabajo comunitario

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) han realizado un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta, mejorar la calidad de vida y las perspectivas en todo el mundo. Esos objetivos han creado mecanismos para que, no solo las naciones y su gobierno desarrollen iniciativas que impacten a toda la sociedad, sino que sea la misma sociedad, las personas, las empresas y organizaciones que en ella interactúan, quienes se imaginen y generen los cambios necesarios para obtener una nueva perspectiva de la realidad que afrontan. De tal forma, que el desarrollo sostenible es esa herramienta que facilita satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones [36].

La agenda 2030 ha planteado en sus Objetivos 7 (Energía asequible y no contaminante) y 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) una serie de metas u objetivos que buscan abordar muchas problemáticas que surgen de la dinámica de las poblaciones y sus necesidades, por ejemplo, desde 2017 más de la mitad de la población mundial ha estado viviendo en ciudades, y se espera que dicha cantidad aumente hasta el 60 % para 2030. Asimismo, unos 660 millones de personas seguirán sin acceso a la electricidad y cerca de 2000 millones seguirán dependiendo de combustibles y tecnologías contaminantes para 2030. Por lo tanto, lo que se logra divisar es que a pesar de que mucha población se sigue moviendo hacia las ciudades en busca de mejores condiciones de vida, siguen experimentando problemáticas similares a las que se encuentran en la mayoría de las poblaciones o comunidades rurales.

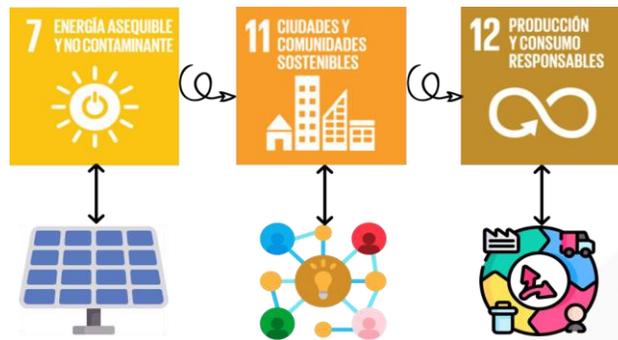


Figura 23. Marco de los ODS para el aprovechamiento comunitario en el cierre de parques solares.

Por su parte, el Objetivo 12 (Producción y consumo responsable) plantea que la producción y consumo responsable puede contribuir sustancialmente en la reducción de la pobreza, mitigación del cambio climático, la transición energética basada en economías verdes y libres de carbono, en un mundo en donde la generación de basura electrónica ha aumentado un 38% a nivel global, pero que solo el 20% logra ser reciclado. Del mismo modo, en un planeta con recursos limitados y con el constante crecimiento de la población mundial, se ve acentuado el déficit planetario, dado que la naturaleza no podrá suplir los materiales e insumos necesarios para los patrones de consumo actuales, se hace necesario formular, proponer y ejecutar iniciativas comunitarias que aprovechen los componentes generados durante el cierre parcial o total de parques solares.

Las organizaciones comunitarias pueden desempeñar un papel importante en el logro de los ODS porque tienen un profundo conocimiento de las necesidades y prioridades de las comunidades y pueden trabajar directamente con ellas para promover cambios positivos. Algunas formas en que las organizaciones de la sociedad civil pueden promover los ODS incluyen [37]:

- Participación ciudadana: las organizaciones comunitarias pueden involucrar a los residentes de las comunidades locales en los procesos de toma de decisiones y desarrollar políticas y estrategias para lograr objetivos de desarrollo sostenible.
- Implementación de proyectos: Las organizaciones comunitarias pueden desarrollar e implementar proyectos locales que ayuden a lograr objetivos de sostenibilidad en sus comunidades.
- Cooperación y alianzas: Las organizaciones comunitarias pueden colaborar con otras organizaciones, gobiernos y el sector privado para promover los objetivos de desarrollo sostenible a nivel local, regional y global.

Hasta este momento se han identificado diversas oportunidades en el cierre de parques solares en el corredor vida Cesar-Magdalena, estas oportunidades se han clasificado según su enfoque o índole, siendo el aspecto comunitario uno de los que más resalta por su impacto y beneficio directo sobre las poblaciones, comunidades y personas que se ubican alrededor de estos grandes proyectos energéticos. Sin embargo, para que estos procesos de cierre y/o desmantelamiento parcial o total contemplado en las licencias y estudios de impacto ambiental, se desarrollen de forma más amigable y abierta, es necesario destacar la importancia de la asociatividad y acción comunitaria para que estos grandes proyectos se conviertan finalmente en oportunidades y no en lamentos o perjuicios para estas comunidades.

La legislación colombiana plantea que la acción Comunal es una expresión social organizada, autónoma y solidaria de la sociedad civil, cuyo propósito es promover un desarrollo integral, sostenible y sustentable, construido a partir del ejercicio de la democracia participativa en la gestión del desarrollo de la comunidad, algunos de sus objetivos son [38]:

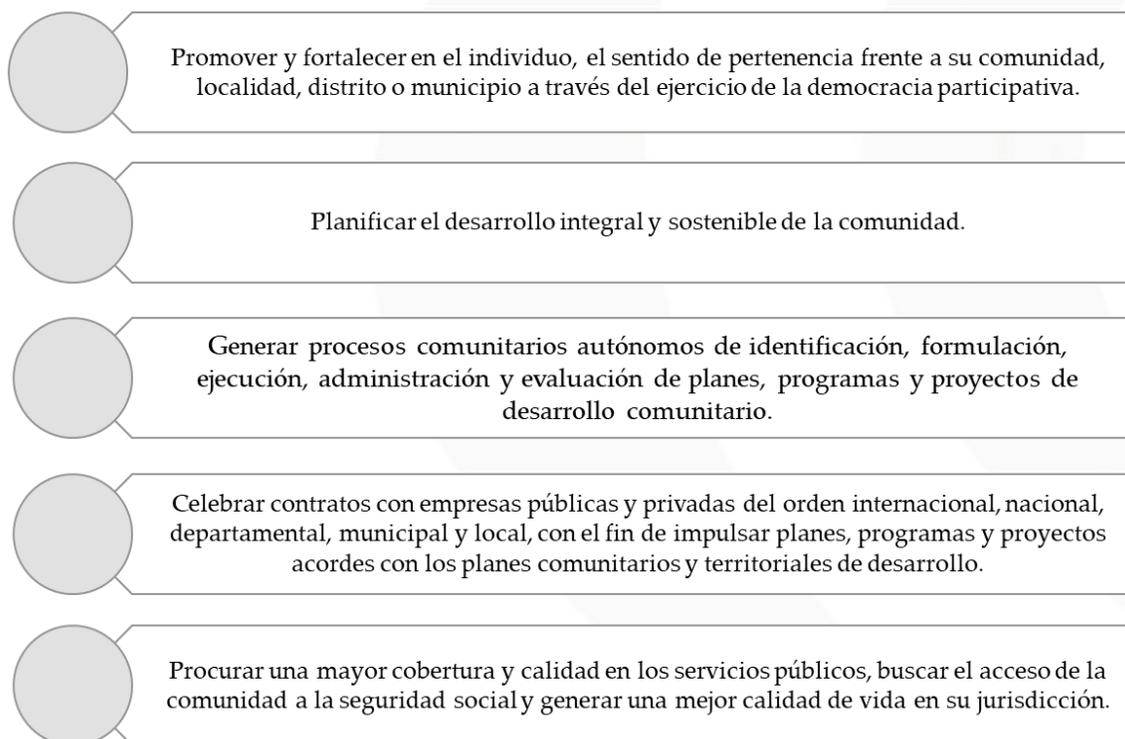


Figura 24. Objetivos de la asociatividad y desarrollo comunitario.

Teniendo como uno de sus objetivos mejorar la cobertura y calidad de los servicios públicos, la asociatividad y acción comunitaria se convierten en aspectos estratégicos para

lograr que la transición energética inicie desde las comunidades, más aún cuando por sus características estas se han visto involucradas en procesos de aprovechamiento energético como la extracción y exportación de materias primas de la minería (carbón principalmente).

En el pasado, estos grandes proyectos energéticos no han dejado a las comunidades aledañas beneficios palpables, persisten los problemas de saneamiento básico, infraestructura de transporte, acceso a la energía eléctrica o formación calificada de capital humano, por lo tanto, el establecimiento y la acción comunitaria pueden mejorar la interlocución entre los grandes parques solares del corredor vida, las necesidades energéticas de la población y sus posibles soluciones.

Uno de los aspectos más interesantes que se han identificado en la conversación y comunicación con líderes o funcionarios de algunos de estos parques solares, es que una vez el proyecto entra en operación o funcionamiento, uno de sus grandes retos es mantener la potencia total contratada con el mercado o bolsa de energía colombiana, acuerdo que se da a través de subastas o contratos de energía; lo que origina que los módulos solares que conforman el generador deban ser renovados según su pérdida de eficiencia o producción, de esta forma una pequeña pérdida porcentual no es admisible en la operación del parque solar, pero esos módulos pueden representar la oportunidad de suplir las necesidades energéticas de aplicaciones puntales dentro de la comunidad. Por lo tanto, a diferencia de lo observado en el cierre en la minería, el cierre o desmantelamiento de los parques solares puede darse de forma parcial o progresiva.

Por otro lado, Colombia, en aras de convertirse en una potencia mundial de la vida, ha impulsado el cambio en la forma como nos relacionamos con la energía y ha colocado especial atención en la democratización del sector energético. Una de sus principales apuestas es el de las comunidades energéticas, en donde se plantean diversas estrategias y modelos de generación de energía eléctrica para suplir la demanda de forma local, autónoma, igualitaria e incluyente. Los usuarios o potenciales usuarios de servicios energéticos podrán constituir Comunidades Energéticas para generar, comercializar o usar eficientemente la energía a través del uso de fuentes no convencionales de energía renovables (FNCER), combustibles renovables y recursos energéticos distribuidos[cita]. La meta del gobierno nacional es promover 20.000 nuevos usuarios con generación de energía a partir de Fuentes no convencionales de energía renovable que se benefician de comunidades energéticas.

La Ley 2294 de 2023 contiene el articulado y bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 denominado “El Plan de la Gente” el cual plantea la transición energética justa, segura, confiable y eficiente como parte de las acciones necesarias para fomentar la acción climática en Colombia. Sin embargo, además de promover la lucha contra el cambio climático, disponer de energía eléctrica significa también acceder a mejores condiciones de vida con relación a la posibilidad de disponer de sistemas de riesgo amigables con el medio ambiente, acceder a estrategias de conectividad y comunicación, disponer de refrigeración para alimentos y medicamentos, y en general, disponer de energía eléctrica para combatir y erradicar la pobreza energética.

Según estudios adelantados por diversas organizaciones, se logró en 2023 medir el Índice Multidimensional de Pobreza Energética (IMPE) de Colombia, cuyo estudio fue llevado a cabo por Promigas, su fundación y la firma Inclusión SAS. Este análisis encontró que 18,5 % de los colombianos se encuentran en situación de pobreza energética, que se traduce en 9,6 millones de ciudadanos; los resultados demuestran que la mitad de las personas en esta condición se encuentran en Córdoba, Nariño, Magdalena, Bolívar, La Guajira y Cauca[39].

5.2. Las comunidades energéticas en el contexto colombiano

El cierre de parques solares y la posibilidad de reutilización de los módulos solares que han reducido su rendimiento, eficiencia o cambios en su estructura física, pueden contribuir en gran medida a la promoción de las comunidades energéticas, solventar necesidades energéticas no atendidas, reducir los índices de pobreza energética en los departamentos de Cesar y Magdalena y adicionalmente contribuir al uso eficiente de los recursos para el desarrollo de ciudades circulares que aporten a la carbono neutralidad y la resiliencia climática.

En el PND “El Plan de la Gente”, una de las apuestas es la implementación del Programa Basura Cero, en donde además de las entidades de índole nacional, la población recicladora y sus organizaciones serán protagonistas. i) Se eliminarán los botaderos a cielo abierto a través de la promoción de alternativas tecnológicas que garanticen la sostenibilidad ambiental, social y económica, y se transformarán progresivamente los esquemas de enterramiento en parques tecnológicos y ambientales de valorización de residuos; ii) se fortalecerá la gestión integral de los residuos generados en actividades de construcción y demolición (RCD); En este sentido, se impulsará el reúso de materiales y recursos dentro de la dinámica de la economía circular, en articulación con el sector productivo en sus diferentes actividades económicas[40].

En este sentido, se identifica como una oportunidad comunitaria apostar por el desarrollo de un modelo de bioeconomía sostenible y circular que permita abordar los desafíos globales y locales, como el cambio climático y la degradación de los ecosistemas, junto con la creciente demanda de alimentos y energías, en la búsqueda de nuevas formas de producir y consumir en un mundo de recursos finitos y limitados. Justamente, el concepto de bioeconomía sostenible y circular impacta positivamente y tiene un enorme potencial en la generación de puestos de trabajo y empleos verdes, especialmente en zonas rurales y costeras, así como, reducir las emisiones a la atmosfera y la de dependencia de recursos fósiles[41].

Para hacer realidad el aprovechamiento comunitario en torno al cierre de parques solares y para convertir en realidades energéticas las oportunidades identificadas hasta este punto, se han identificado modelos de asociatividad que se presentan a continuación:

- **Asociación entre comunidades energéticas:** Las comunidades energéticas podrán asociarse entre sí y crear asociaciones de comunidades energéticas, a través de un negocio jurídico idóneo para cooperar en proyectos de generación, comercialización y/o uso eficiente de la energía a través del uso de Fuentes No Convencionales de Energía Renovables -FNCER- y recursos energéticos distribuidos.
- **Alianzas Público-Populares y Privado-Populares:** Las comunidades energéticas y las asociaciones de comunidades energéticas podrán asociarse con terceros, bajo la forma de Alianzas Público-Populares y Privado-Populares, a través de un negocio jurídico idóneo para cooperar en proyectos de generación, comercialización y/o uso eficiente de la energía a través del uso de Fuentes No Convencionales de Energía Renovables -FNCER- y recursos energéticos distribuidos.
- **Formalidad para la comercialización:** La comercialización de energía realizada por las comunidades energéticas, las asociaciones de comunidades energéticas, así como por las Alianzas Público-Populares y Privado-Populares, sólo se puede ejecutar cuando estas se constituyan bajo la forma de persona jurídica.
- **Comunidad Energética como Empresa de Servicios Públicos Comunitaria (E.S.P.C):** La Superintendencia de Servicios Públicos determinará los eventos en los cuales las Comunidades Energéticas, las asociaciones de comunidades energéticas, así como las Alianzas Público-Populares y Privado-Populares, deban constituirse como Empresa de Servicios Públicos Comunitaria (E.S.P.C.)

En este sentido, estos modelos de asociatividad pueden desarrollarse bajo dos estrategias las cuales comprenden:

- Autogeneración colectiva (AC): Aquella actividad realizada por la Comunidad Energética que produce energía eléctrica y/o hace uso eficiente de la energía, principalmente, para atender sus propias necesidades. En el evento en que se generen excedentes de energía eléctrica a partir de tal actividad, estos podrán entregarse a la red, en los términos que establezca la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)[42].
- Generación Distribuida Colectiva (GDC): Es la producción de energía eléctrica realizada por la comunidad energética, cerca de los centros de consumo, conectada a un Sistema de Distribución Local (SDL) o a una Microrred. La entrega de la producción al Sistema de Distribución Local (SDL) se rige bajo la regulación que establezca la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)[42].

Con la reglamentación y regulación de las comunidades energéticas, Colombia está dando un paso fundamental hacia la democratización de la energía y la diversidad en la prestación del servicio de energía eléctrica propiciando la transición energética justa, pero al mismo tiempo mejorando el servicio y garantizando el acceso a poblaciones vulnerables, aumentando la eficiencia energética, descentralizando la generación y la demanda, desarrollando economías locales y territoriales, fomentando modelos de desarrollo económico respetuosos con el medio ambiente y generando procesos de aprovechamiento de los potenciales energéticos renovables en las regiones.

Sin embargo, en aras de propiciar y fortalecer los mecanismos de asociatividad y organización comunitaria, se deben considerar modelos más acordes al tipo de fuente disponible en el corredor de la vida Cesar-Magdalena, a continuación, se presentan las comunidades energéticas registradas en los municipios de El Paso, Fundación y Ciénaga en donde tienen influencia los parques solares los cuales son analizados bajo un ejercicio de prospectiva:

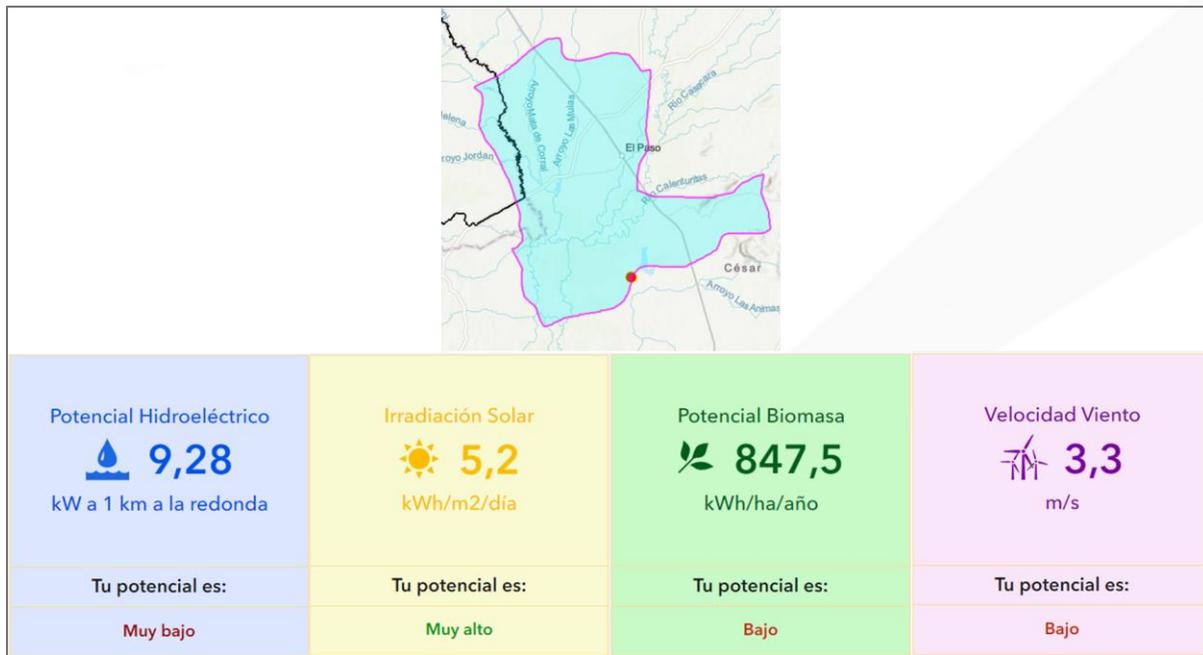


Figura 25. Registro de comunidades energéticas en la zona de influencia del parque solar - Municipio de El Paso, Cesar[43].

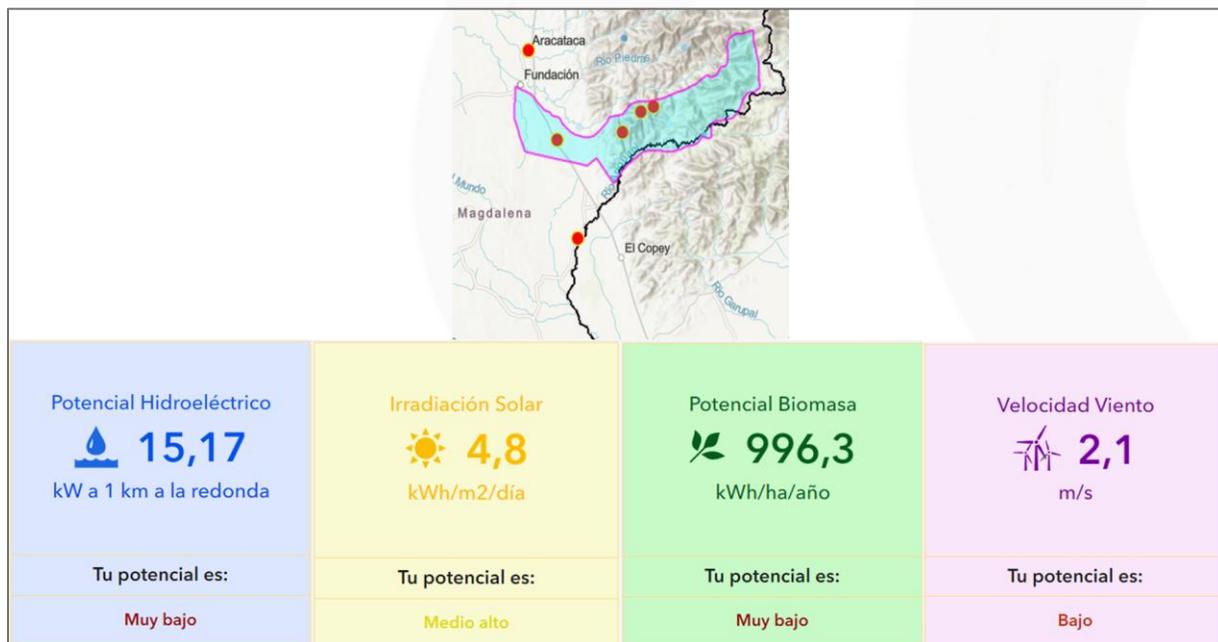


Figura 26. Registro de comunidades energéticas en la zona de influencia del parque solar - municipio de Fundación, Magdalena[43].

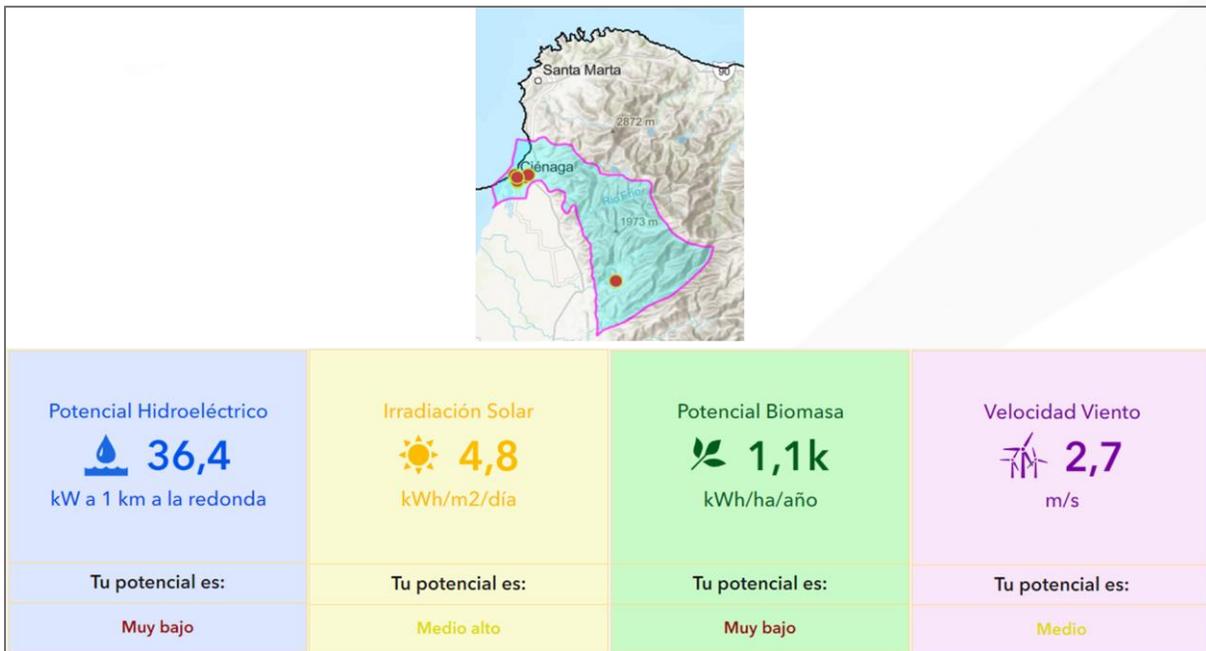


Figura 27. Registro de comunidades energéticas en la zona de influencia del parque solar - municipio de Ciénaga, Magdalena[43].

Como se puede observar en las figuras 25, 26 y 27, el municipio del Paso, que se encuentra en la zona de influencia del proyecto El Paso Solar, solo cuenta con 1 comunidad energética registrada a diciembre de 2023, mientras que Fundación y Ciénaga cuentan con 4 y 8, en donde se ubican los parques solares Fundación Solar y Caimán Cienaguero respectivamente. A pesar de tratarse de una iniciativa reciente del gobierno nacional y del ministerio de Minas, se requiere de mecanismos y proyectos comunitarios que estimulen el aprovechamiento de los materiales o equipos que son desmantelados de los parques solares mencionados. Es importante mencionar que, para el caso de los municipios de Ciénaga y Fundación, estos son denominados como PDET y PDET-ZOMAC respectivamente, dado que se encuentran entre las zonas priorizadas en la aplicación de la reforma rural o agrupan las zonas más afectadas por el conflicto armado.

En cuanto a la disponibilidad de recursos energéticos renovables, se destaca el potencial energético solar, que oscila entre 5,2 kWh/m² al día en departamento del Cesar y 4,8 kWh/m² al día para el departamento del Magdalena y son clasificados como muy alto y medio alto respectivamente. El resto de los recursos como el hidroeléctrico, eólico o biomasa no resultan representativos para las zonas de influencia de los parques solares ubicados sobre el corredor vida, de esta forma se reafirma la necesidad de aprovechar toda la tecnología disponible en estos grandes proyectos fotovoltaicos, de tal forma que puedan brindar soluciones comunitarias en el territorio.

5.3. Comunidades solares de autoconsumo compartido

Para potenciar las oportunidades comunitarias en las zonas de influencia de los parques solares ubicados en el corredor vida Cesar-Magdalena y para aprovechar en mayor medida la radiación solar, como el recurso renovable con mayor niveles de disponibilidad en la zona, se propone la evolución del término comunidades energéticas al de comunidades solares y energías comunitarias, como soluciones en donde prima el interés común y que buscan el mejoramiento de las condiciones de acceso igualitario y equitativo a la energía eléctrica más allá de la condición socioeconómica de quienes hacen parte de la comunidad.

La comunidad solar con autoconsumo compartido es una oportunidad de índole comunitaria que se considera un gran avance en la normativa y regulación para el aprovechamiento de la energía solar por distintos usuarios o vecinos. Este tipo de asociaciones o comunidades surgen cuando uno de los miembros de la comunidad no dispone de las características de infraestructura necesarias para la instalación de módulos solares o no cuenta con los recursos suficientes para realizar inversiones en componentes y equipos. Sin embargo, el modelo de comunidad solar con autoconsumo compartido dispone de ciertos requerimientos que deben ser acordados entre quienes deciden asociarse o constituirlos.

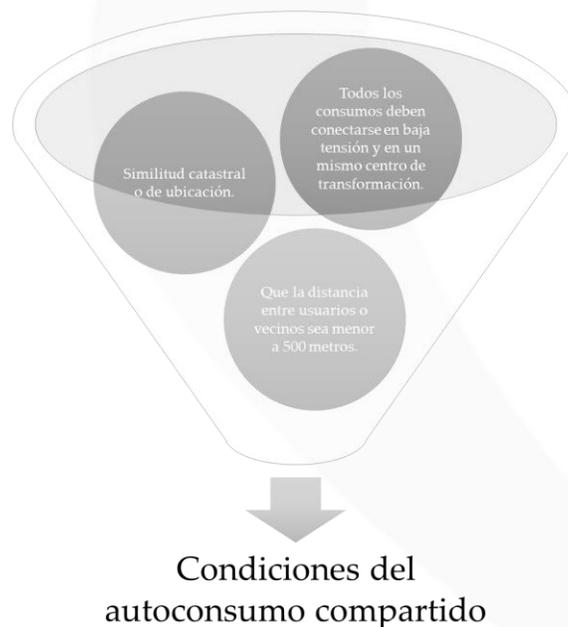


Figura 28. Condiciones para el acceso al autoconsumo compartido en el modelo de comunidad solar.

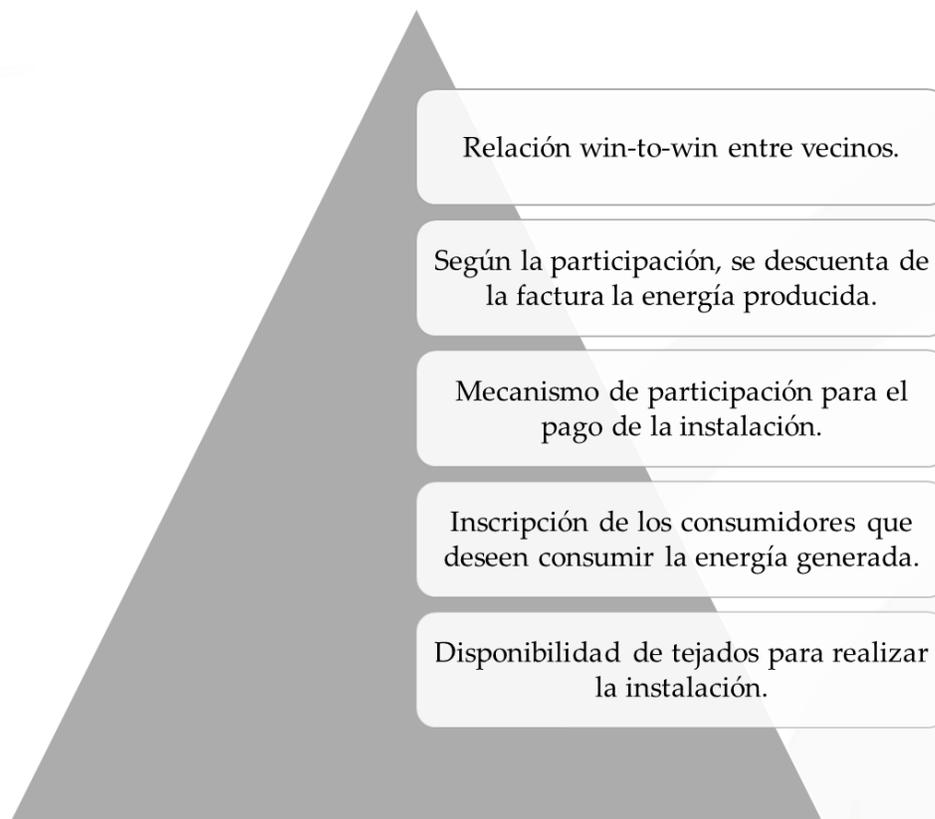


Figura 29. Esquema de una comunidad solar.

Las comunidades solares con autoconsumo compartido logran superar algunas de las situaciones típicas al momento de implementar sistemas de energía solar y pueden beneficiar a quienes deciden constituirla de la siguiente forma:

- *Se dispone de tejado, pero al mismo tiempo se tiene un bajo consumo:* en este tipo de casos la rentabilidad de los sistemas disminuye considerablemente dado que no se aprovecha por completo la energía generada.
- *Se dispone de un alto consumo, pero no del espacio suficiente para instalar módulos solares:* este tipo de casos es común en zonas en donde la construcción vertical se convierte en la solución habitacional convencional.

Una vez identificados los posibles casos en donde las comunidades solares generan beneficios considerables, se debe establecer quienes harían parte de este modelo de generación de energía bajo un esquema comunitario. En ese orden de ideas los posibles actores que surgen son:

- Productores: quienes colocan a disposición de la organización comunitaria su tejado o terreno para la implementación de los módulos solares reutilizados.
- Consumidores: quienes se benefician de la generación de energía y en este esquema es posible funcionar como productor y consumidor al mismo tiempo.
- Inversor: Es una figura opcional en el esquema de comunidad solar, tanto productores como consumidores pueden convertirse en inversores, dado que se requiere de una inversión inicial en equipos o componentes.

Debido a los altos costos de la energía eléctrica, la ineficiencia intrínseca del funcionamiento del modelo centralizado y la existencia de problemáticas graves como el reconocimiento de pérdidas técnicas y no técnicas por parte de las entidades regulatorias, en conjunto con la oportunidad de las comunidades solares surgen diferentes tipos de aplicaciones que se han identificado hasta este momento y que se desarrollaran bajo el reconocimiento de las oportunidades comunitarias subyacentes. Por ejemplo, dada la vocación agrícola y agropecuaria de los predios ubicados alrededor de los parques solares en el corredor vida Cesar-Magdalena, se presenta inicialmente una identificación y clasificación de zonas de interés en donde podrían darse desarrollos comunitarios a partir de las oportunidades que surgen con el cierre de los parques solares. Los datos presentados en la Figura 30 son extraídos de los datos suministrados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

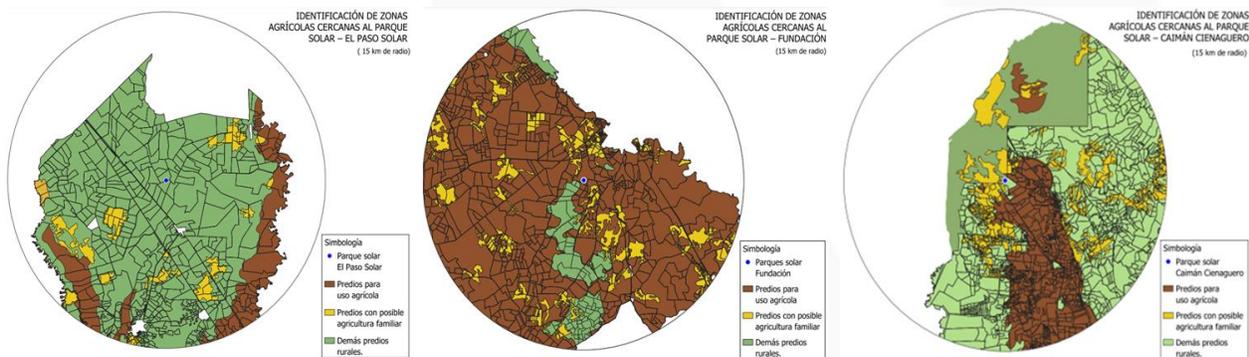


Figura 30. Identificación de zonas agrícolas cercanas a los parques solares ubicados en el corredor vida Cesar-Magdalena.

5.4. Sistemas de bombeo de agua comunitario

Un sistema de bombeo de agua consiste en una serie de componentes que facilitan la extracción de agua desde un punto bajo, como un pozo de agua subterránea, para luego transportarla hacia un punto alto [44], como un depósito de almacenamiento, o simplemente hacia su destino final. Estos sistemas se utilizan principalmente en zonas donde no hay servicio de acueducto, como pueden ser comunidades remotas, granjas y algunos sistemas de producción agrícola, y requieren de una competencia técnica para su montaje, puesta en marcha y mantenimiento [44].

Existen diversas fuentes de energía que pueden impulsar estos sistemas, como la electricidad, los combustibles y la energía animal [44]. Sin embargo, en algunas comunidades, por ejemplo, no solo carecen de servicio de acueducto, sino también de redes eléctricas, lo que genera una dificultad, al igual que el uso de combustibles, ya que estos emiten CO₂ que es perjudicial para el medio ambiente, y tampoco se puede ignorar el tema de la energía animal, que implica un caso de maltrato.

La energía solar fotovoltaica es una alternativa viable y sostenible para resolver los problemas de acceso a la electricidad y al agua que sufren muchas comunidades y localidades. Mediante la instalación de paneles solares, se puede generar electricidad para alimentar sistemas de bombeo de agua que permitan extraer el recurso hídrico sin depender de la red eléctrica ni de animales. Además, se contribuye a la mitigación del cambio climático al evitar las emisiones de CO₂ asociadas a los combustibles fósiles.

La Figura 31 muestra el esquema general de un sistema de bombeo de agua solar. Este sistema consta de paneles solares y un controlador que proveen y regulan la energía eléctrica a una bomba sumergible, la cual se encarga de extraer el agua subterránea y conducirla por un sistema de tuberías hasta un tanque de almacenamiento o hasta su uso final. La unidad de generación de energía está diseñada para operar durante el día, ya que en ese periodo se puede aprovechar la radiación solar necesaria para generar electricidad. No obstante, esta unidad puede contar con baterías para funcionar en los momentos de baja radiación solar, como puede ser en situaciones de nubosidad, o en las horas de la noche.

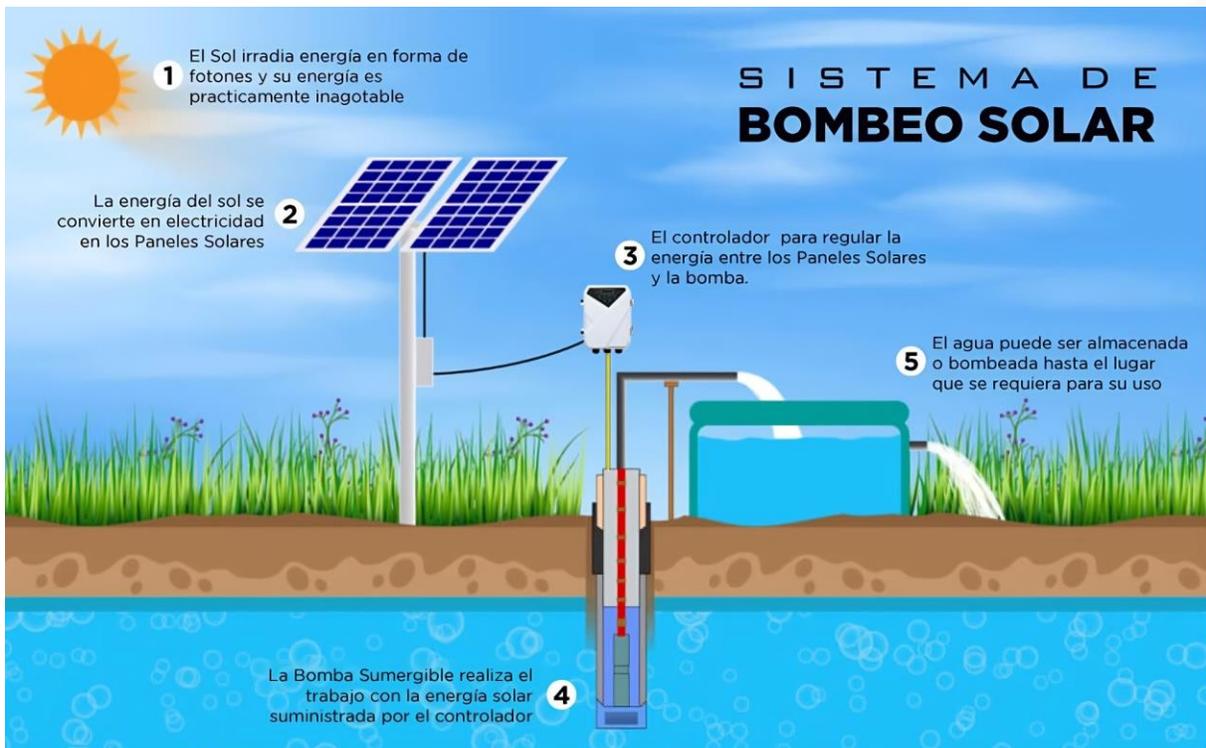


Figura 31. Sistema de bombeo de agua alimentado por paneles solares. Fuente: Tomado de [45].

El cierre de parques solares brinda la posibilidad de aprovechar y reutilizar los paneles solares, baterías, cables e infraestructura que han cumplido con su función en el parque, en sistemas de bombeo de agua comunitario, reduciendo los costos de adquisición de estos productos, y garantizando la implementación de una economía circular en pro de la sociedad. Esto permitiría a las comunidades aisladas, en este caso del corredor vida Cesar-Magdalena, acceder a un servicio de agua sin tener que desplazarse a ríos, arroyos, pozos u otras fuentes de agua para obtener el agua que necesitan para sus actividades cotidianas. O si ya tienen un sistema de bombeo de agua que funciona con combustibles o con tracción animal, podrían hacer la transición hacia una energía limpia, sostenible y amigable.

Los sistemas de bombeo de agua desempeñan un papel crucial en diversas aplicaciones, incluyendo etapas tempranas para sistemas de purificación del agua y sistemas de riego utilizados en la agricultura. Es necesario someter a menudo esta agua sin tratar a procesos adicionales, como la filtración y desinfección, para asegurar que cumpla con los estándares de calidad y seguridad establecidos para el consumo humano. Esto no solo contribuye a garantizar la seguridad del suministro de agua, sino que también desempeña

un papel vital en la seguridad alimentaria al facilitar prácticas eficientes de riego en la producción de alimentos.

5.5. Transición de vehículos de combustión a alternativas eléctricas

La movilidad urbana en el corredor vida Cesar-Magdalena se basa en una variedad de medios, entre los que sobresalen las motocicletas, los motocarros y los bicitaxis. El motocarro es uno de los más popular, ya que se ha convertido en una opción de transporte muy utilizada en el caribe colombiano [46]. Este ha cumplido un papel relevante en el desplazamiento local, y es preferido debido a su comodidad en trayectos cortos y su capacidad de carga que facilita llevar, entre otras muchas cosas, el mercado de los habitantes.

Estos vehículos cuentan con motores de combustión que usan diferentes tipos de combustible, como gasolina, diésel o incluso gas natural. En los municipios que pertenecen a la zona de influencia de los parques solares del corredor vida, predominan los motocarros que funcionan con gasolina, aunque también hay algunos que usan motores a diésel. Sin embargo, cabe recalcar que este tipo de motores generan emisiones de gases nocivos como el dióxido de Carbono (CO_2) y el óxido de nitrógeno (NO_x), y partículas en suspensión que afectan la calidad del aire, lo cual puede resultar en complicaciones de salud de los habitantes. De acuerdo con la normativa colombiana, los vehículos de tres ruedas que circulan por el país deben cumplir con unos niveles máximos de emisión de gases contaminantes. La resolución 0762 de 2022, en su artículo 13, fija estos niveles según el cilindraje de los motocarros. Así, los que tienen menos de 280 CC no pueden emitir más de 12 g/Km de CO, 1 g/Km de HC y 1,4 g/Km de HC+ NO_x [47].

Dado que localidades del corredor vida se caracterizan por la presencia predominante de caminos sin pavimentar, la generación de partículas de polvo, la emisión de gases perjudiciales, y en el caso del Paso, Cesar, la proximidad a minas de carbón, se plantea un desafío significativo en términos de contaminación del aire. Para mitigar este impacto ambiental, es necesario adoptar medidas que promuevan el uso de fuentes de energía más limpias y sostenibles en cuanto a movilidad. Una de estas medidas es la sustitución de los motores de combustión por un sistema impulsado por energía eléctrica.

Los materiales, como paneles solares y baterías, que han completado su ciclo de vida en un parque solar pueden ser reutilizados como componentes para la implementación de un sistema de propulsión eléctrica. La Figura 32 ilustra la configuración de un sistema eléctrico utilizado como fuente de energía para un motocarro.

Este sistema incluye un mecanismo de carga y almacenamiento de energía mediante un conjunto de baterías y un cargador que puede conectarse a un enchufe doméstico. Además, incorpora una unidad de control cuya función es gestionar la electricidad suministrada al motor para controlar la aceleración del vehículo. En situaciones donde se emplean motores de corriente alterna, es esencial utilizar un convertidor de corriente o inversor, el cual transforma la corriente directa generada por las baterías en corriente alterna para poner en marcha el motor; de lo contrario, este componente no es necesario. Por último, el sistema debe contar con una transmisión encargada de distribuir la energía generada por el motor a las ruedas del vehículo.

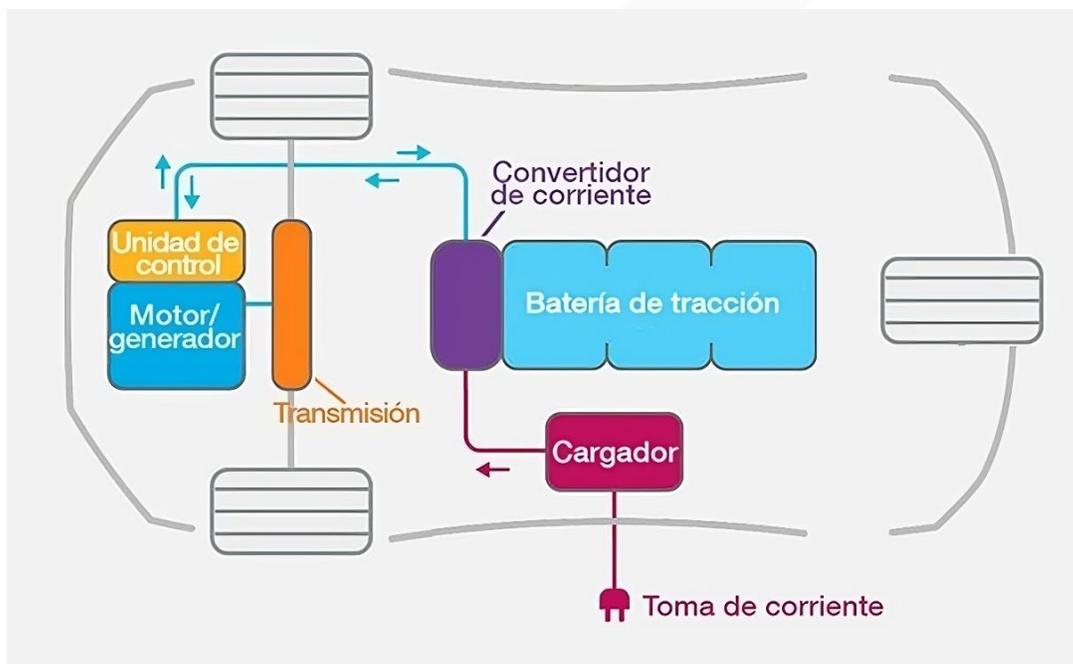


Figura 32. Sistema de propulsión eléctrica para motocarros. Fuente: Adaptado de [48].

Es factible incorporar paneles solares en estos vehículos al situarlos en la parte superior de su estructura. Esta disposición posibilitaría que, durante las horas diurnas, las baterías recarguen energía, incrementando así su autonomía. Este aumento en la autonomía facilitaría a los conductores llevar a cabo sus desplazamientos de manera continua durante períodos más extensos, generando beneficios adicionales para estas personas.

Es importante tener en cuenta que la adopción de motocarros eléctricos puede depender de la infraestructura de carga disponible en la región y de la aceptación por parte de los conductores y la comunidad en general. La transición hacia vehículos eléctricos en el caso de los motocarros refleja una tendencia más amplia hacia la sostenibilidad en el transporte.

5.6. Sistemas de monitoreo de calidad del aire

Según la Organización Mundial de la Salud, la contaminación atmosférica provoca una de cada nueve muertes en el mundo por causas asociadas a la inhalación de partículas nocivas [49]. De modo que, los contaminantes del aire aumentan el riesgo de padecer enfermedades respiratorias y cardiovasculares, como el cáncer de pulmón, los infartos cerebrales, las afecciones cardíacas y la bronquitis crónica [50].

La calidad del aire en Colombia es un tema crucial que preocupa tanto por sus efectos en la salud humana como en el medio ambiente. Según datos de los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), el contaminante atmosférico que representa mayor problemática en el país es el material particulado o partículas en suspensión [50], concretamente, aquellas con tamaño menor o igual que $2,5\mu\text{m}$ conocidas como $\text{PM}_{2.5}$, y $10\mu\text{m}$ de diámetro o PM_{10} [51], las cuales están compuestas por lo general de sulfatos, amoníaco, cloruro de sodio, polvos minerales agua, nitratos y cloruro de sodio [52].

Además de las partículas en suspensión, hay otros agentes contaminantes que afectan negativamente a la salud, como el Ozono (O_3), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el dióxido de azufre (SO_2) y el monóxido de carbono (CO). Estos son principalmente gases contaminantes que se originan por la combustión incompleta de materiales carbonados como la madera y el petróleo, en el caso del CO , o por la quema de combustibles fósiles como el carbón, relacionado con la generación de SO_2 , y la quema de combustibles en los medios de transporte que produce NO_2 [52].

Debido a que los municipios que comprenden la zona de influencia de los parques solares del corredor vida Cesar-Magdalena presentan factores contaminantes, y considerando que la calidad del aire desempeña un papel crucial en la salud y el bienestar de las personas, es imperativo implementar sistemas de monitoreo de la calidad del aire en estas comunidades. Estos sistemas son fundamentales para medir los niveles de contaminación y evaluar sus impactos en la población. Un sistema de monitoreo de la calidad del aire proporciona información esencial que contribuye al diseño e implementación de medidas preventivas y de mitigación de la contaminación, al mismo tiempo que sensibiliza y educa a la comunidad sobre la importancia de preservar el medio ambiente. Además, facilita el seguimiento y la evaluación de las políticas ambientales tanto a nivel local como nacional.

La mayoría de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire están equipadas con una fuente de energía independiente, diseñada para evitar que las variaciones en la red eléctrica afecten su funcionamiento. Comúnmente, se instalan paneles solares con este propósito. En consecuencia, los paneles solares y las baterías que aún estén en condiciones

de reutilización al momento del cierre de los parques solares en el corredor vida Cesar-Magdalena podrían ser empleados como parte de la fuente de energía para las estaciones encargadas de medir la calidad del aire.

La Figura 33 ilustra la composición de una estación de monitoreo de calidad del aire. Esta estación cuenta con una fuente de energía conformada por paneles solares para la generación de electricidad, baterías para su almacenamiento, un módulo controlador de carga y regulador de voltaje. Además, incorpora sensores de partículas para evaluar la presencia de material particulado en el aire y sensores de gases que miden las concentraciones de CO, O₃, SO₂, NO₂, entre otros. También está equipada con un dispositivo registrador de datos (datalogger) que almacena y registra la información capturada por los sensores, junto con módulos de transmisión de datos que facilitan el envío de la información a un servidor a través de internet. Asimismo, incluye un GPS el cual permite establecer la posición geográfica de la estación.

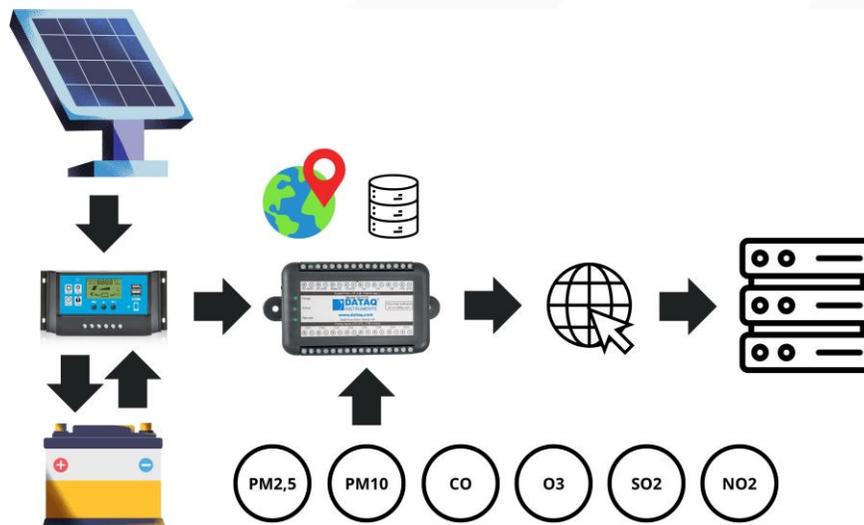


Figura 33. Sistema de monitoreo de calidad del aire.

5.7. Mejora de la iluminación del espacio público

Un enfoque innovador y perspicaz que ha surgido en diversas comunidades se centra en la reutilización de paneles solares en una segunda vida para la iluminación de calles, parques, plazas y otras áreas de uso colectivo. Esta propuesta tiene como meta principal la disminución del consumo de energía convencional, desempeñando un papel fundamental en la preservación del medio ambiente y la promoción de la sostenibilidad. La justificación de esta propuesta encuentra sus raíces en la existencia de zonas rurales predominantes en el corredor Cesar-Magdalena, que lamentablemente no están

conectadas al sistema eléctrico nacional. La implementación de esta iniciativa no solo aborda la necesidad de iluminación en estas áreas remotas, sino que también ofrece una solución viable para mejorar el alumbrado público en las zonas urbanas.

El proceso de reutilización de paneles solares implica una evaluación técnica minuciosa para determinar su estado y capacidad de generación. Este paso implica la medición precisa de la eficiencia de conversión de luz solar en electricidad, así como la verificación de la coherencia y estabilidad de dicha capacidad a lo largo del tiempo. La información recopilada durante esta fase inicial es crucial para determinar la idoneidad de cada panel para su reutilización y define los parámetros para las etapas subsiguientes del proceso, que incluyen la calibración de los paneles solares reacondicionados para garantizar una correcta configuración con el sistema de iluminación propuesto [53].

Una vez completada esta revisión, se procedería a adaptarlos a un sistema de iluminación integral, que incluiría baterías eficientes, reguladores, sensores y lámparas LED de bajo consumo. Estos componentes esenciales posibilitan el almacenamiento de la energía generada durante el día, permitiendo su uso para iluminar los espacios públicos durante las noches, asegurando eficiencia y autonomía energética. La Figura 34 ilustra de manera clara el esquema de conexión de los diversos componentes básicos que conforman este sistema integrado. Esta representación gráfica facilita la comprensión visual del proceso y resalta la interconexión entre los elementos, subrayando la viabilidad técnica de esta propuesta.

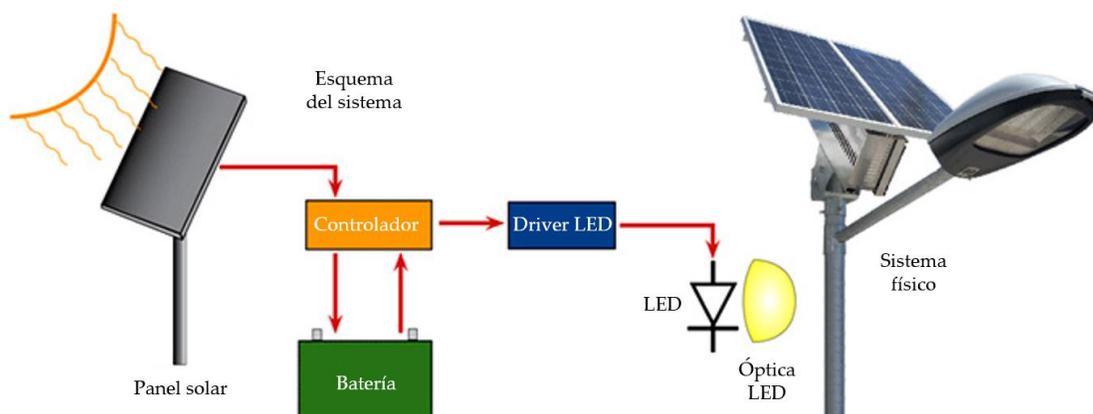


Figura 34. Sistema de iluminación LED con paneles solares. Fuente: Adaptado de [54].

La implementación de paneles solares reutilizados no solo persigue la optimización del rendimiento energético, sino que también abraza la filosofía de otorgarles una segunda vida útil. Esta práctica contribuye al aprovechamiento máximo de recursos ya su vez, fomenta el desarrollo de ciudades más sostenibles e inteligentes. En última instancia, esta iniciativa emerge como un ejemplo tangible de cómo la innovación puede converger con la responsabilidad ambiental para crear soluciones prácticas y beneficiosas para las comunidades locales y el planeta en general.

5.8. Oportunidades de formación técnica en la comunidad

Uno de los elementos fundamentales del proyecto de energía solar en el corredor Cesar-Magdalena es la participación y continua de la comunidad local en todas las fases del ciclo de vida de los paneles solares. Este compromiso no solo implica la creación de empleo y el impulso del desarrollo socioeconómico, sino también la asunción de responsabilidades ambientales y un firme compromiso hacia el futuro sostenible de la región. Para asegurar una gestión integral del proyecto, se propone la implementación de un programa educativo focalizado en el desarrollo de habilidades técnicas, orientado a preparar adecuadamente a la comunidad para el eventual cierre y desmantelamiento del parque solar.

En este contexto, se propone una estrategia educativa integral para dotar a la comunidad de habilidades técnicas esenciales que les permitan enfrentar de manera informada y preparada el eventual cierre y desmantelamiento del parque solar. Este proceso educativo abarcará tanto aspectos teóricos como prácticos, proporcionando conocimientos detallados sobre la ingeniería y tecnología detrás de los paneles solares, así como los marcos legales y ambientales que rigen su desmantelamiento. Además, se plantea incorporar sesiones formativas sobre las opciones de reciclaje, reutilización y la disposición adecuada de los materiales, con el objetivo de fomentar prácticas ambientales sostenibles. Este enfoque no solo fortalecerá la mano de obra técnica local, sino que también cultivará una conciencia ambiental arraigada en la comunidad.

Un ejemplo destacado que refleja esta visión proactiva es la iniciativa conjunta de la Universidad del Magdalena y la Fundación Heinrich Böll. Este año, lanzaron un diplomado en Transición Minero-Energética Justa en el Caribe Colombiano. Un aspecto clave abordado en este programa es la reconversión laboral de los trabajadores de sectores tradicionales, en concordancia con la reconversión productiva a corto plazo. Se focalizó especialmente en La Jagua de Ibirico, un municipio que alberga a varios extrabajadores del Grupo Prodeco, evidenciando así la necesidad de adaptación y actualización de

habilidades laborales en consonancia con las transformaciones en el panorama energético regional [55]. En la Figura 35, se aprecia una fotografía de los más de 20 estudiantes terminaron el diplomado en Transición Minero-Energética Justa en el Caribe Colombiano.



Figura 35. Diplomado en transición energética realizado en Cesar. Fuente: Tomado de [55].

Este enfoque integral no solo se limita a impartir conocimientos técnicos específicos, sino que también desempeña un papel crucial en la construcción de una base sólida para una transición justa y equitativa en el ámbito energético. Al empoderar a la comunidad con habilidades técnicas avanzadas, se sientan las bases para una participación significativa en la industria energética emergente. Este desarrollo técnico no solo es esencial para la implementación exitosa del proyecto de energía solar, sino que también se convierte en un pilar fundamental para la autosuficiencia y la capacidad de adaptación a las cambiantes dinámicas del sector.

Además, la formación en habilidades técnicas va de la mano con la promoción de una mentalidad consciente y responsable hacia el medio ambiente. A medida que los miembros de la comunidad adquieren conocimientos sobre los aspectos técnicos, legales y ambientales de la gestión de paneles solares al final de su vida útil, se fortalece su capacidad para abordar los desafíos ambientales asociados con la energía solar. Esto no

solo contribuye a la mitigación de impactos negativos, sino que también fomenta una cultura de responsabilidad ambiental arraigada en la comunidad, vital para la sostenibilidad a largo plazo.

Adicionalmente, el énfasis en la transición justa y equitativa implica considerar cuidadosamente las dimensiones sociales y económicas. Al ofrecer oportunidades de capacitación y reconversión laboral, se abordan las preocupaciones sobre la seguridad laboral de aquellos empleados que puedan verse afectados por cambios en la estructura económica. Este enfoque proactivo garantiza una transición suave para las comunidades, además de crear un entorno propicio para el florecimiento de nuevas oportunidades económicas en el contexto de una economía verde en evolución.

5.9. Conversión a edificaciones sostenibles

La construcción sostenible es una forma de edificar que tiene en cuenta el impacto ambiental y social de las obras, tanto durante su ejecución como a lo largo de su vida útil. El propósito de este enfoque es armonizar el desarrollo de infraestructuras con la conservación de los recursos naturales y la mejora de la calidad de vida de las personas [56]. Para ello, se aplican criterios como la eficiencia energética, el uso racional del agua, la elección de materiales ecológicos y la incorporación de tecnologías innovadoras, y se elaboran fichas técnicas correspondientes a los cuatro ejes temáticos que se presentan en la Figura 36.



Figura 36. Ejes temáticos de la construcción sostenible. Tomado de [56].

En este orden de ideas, la reconversión de edificios existentes hacia la sostenibilidad se presenta como una medida clave para reducir el impacto acumulado de las construcciones tradicionales. La reconversión consiste en modificar estructuras ya construidas mediante la introducción de prácticas y tecnologías sostenibles, optimizando los recursos disponibles. Este proceso no solo ayuda a disminuir la huella ecológica, sino que también supone una solución estratégica para adaptar las infraestructuras a estándares más elevados de eficiencia y resiliencia ambiental.

En el corredor de vida Cesar-Magdalena, se encuentran algunas edificaciones que pueden contribuir a la sostenibilidad de la región; por ejemplo, hospitales, escuelas, plazas de mercado y centros de salud. La existencia de parques solares en la región agrega una dimensión estratégica, ya que proporcionan una oportunidad única para convertir los edificios existentes en centros sostenibles, aprovechando los paneles solares, las baterías y la infraestructura que se puedan reutilizar cuando estos parques se cierren. Así, se podrían transformar los edificios existentes en centros sostenibles que promuevan el desarrollo local y el cuidado del medio ambiente.

Para lograr una correcta reconversión a edificaciones sostenibles, se deben seguir la serie de pasos que se presentan en la Figura 37.

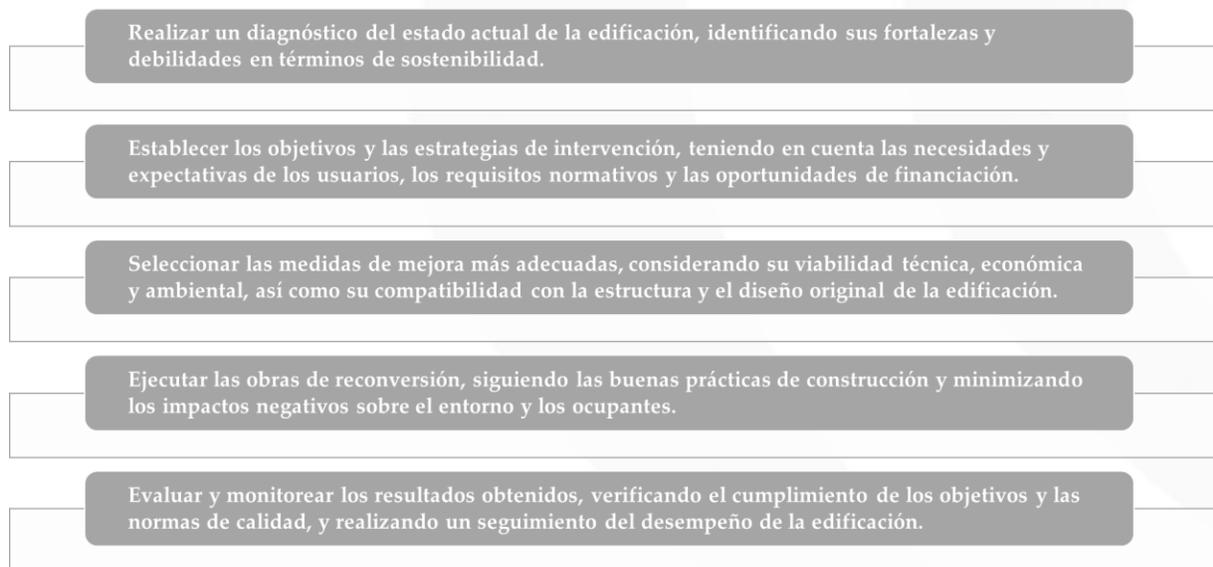


Figura 37. Pasos para lograr la reconversión de una edificación.

Llevar a cabo correctamente los pasos presentados en la Figura 37, garantiza la reducción en el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Asimismo, permite generar ahorros económicos en

los costos de operación y mantenimiento de las edificaciones, al mismo tiempo que mejora la calidad de vida de sus usuarios, al proporcionar espacios más saludables, confortables y seguros.

Finalmente, dentro del contexto del desarrollo de oportunidades comunitarias previamente presentadas, resulta esencial reconocer la complejidad y la interdependencia de diversos actores clave. Desde empresas de energía solar y organizaciones no gubernamentales hasta gobiernos locales, cada actor desempeña un papel crucial en el diseño, implementación y mantenimiento de infraestructuras sostenibles. Además, la participación de asociaciones de reciclaje, asociaciones de transporte e instituciones educativas añade capas significativas al enfoque integral, abordando no solo las necesidades de la comunidad, sino también considerando aspectos ambientales, logísticos y educativos. La Tabla 5 proporciona detalles sobre los roles, posiciones, intereses y funciones de cada actor, destacando la necesidad de colaboración multifacética para alcanzar un impacto positivo y sostenible en estas comunidades.

Tabla 5. Mapa de actores en el desarrollo comunitario.

Actor	Posición	Interés	Función
Comunidad	Beneficiarios	- Tener una mejor calidad de vida al contar con los servicios básicos como el agua para su saneamiento y la electricidad para realizar sus labores diarias.	- Identificar y nombrar las zonas de la comunidad que carecen del servicio como el agua y la electricidad. - Participar en la toma de decisiones.
Empresas de energía solar	Proveedores de equipos	- Vender componentes como paneles solares, cables e infraestructura. - Mejorar la reputación e imagen de la empresa.	- Proporcionar los equipos necesarios para la generación de energía.
Gobierno local	Autoridad Gubernamental	- Contribuir al desarrollo económico y social de la región. - Mejorar el acceso los servicios básicos y promover la salud pública.	- Planificar, regular, y brindar apoyo logístico para garantizar el cumplimiento de normativas y objetivos de desarrollo sostenible.
Sector empresarial	Financiador	- Implementar labores de Responsabilidad Social Empresarial (RSE) contribuyendo a proyectos que tienen un impacto social y ambiental positivo.	- Proveer los recursos financieros, y evaluar la viabilidad económica del proyecto.
Organizaciones No Gubernamentales (ONG)	Agente de desarrollo	- Contribuir al bienestar de comunidades aisladas y reducir la brecha de acceso a servicios básicos. - Obtener fondos para proyectos y atraer donaciones.	- Identificar las necesidades, movilizar recursos, coordinar los proyectos con enfoque en el bienestar de la comunidad.

Empresas de ingeniería y mantenimiento	Proveedor de Servicios (contratistas)	<ul style="list-style-type: none"> - Obtener contratos para el diseño, la implementación y el mantenimiento de los sistemas. - Expandir la cartera de proyectos y clientes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Planificar de forma detallada el diseño e implementación de los sistemas. - Realizar un Mantenimiento continuo para garantizar el funcionamiento eficiente de las instalaciones.
Proveedores de tecnología	Proveedor de equipos	<ul style="list-style-type: none"> - Ofrecer productos para sistemas de energía solar. - Posicionarse en el mercado de productos de energía renovable. 	<ul style="list-style-type: none"> - Suministrar la tecnología y equipos especializados para sistemas de energía solar y sistemas de control.
Instituciones educativas	Colaborador en Educación	<ul style="list-style-type: none"> - Integrar programas educativos que aborden el funcionamiento y el mantenimiento de los sistemas alimentados por energía solar. - Realizar investigaciones aplicadas para mejorar la eficiencia y la efectividad de los sistemas solares. 	<ul style="list-style-type: none"> - Participar en programas educativos, investigación aplicada, y capacitación para comunidades locales sobre el uso y mantenimiento de la tecnología.
Asociaciones de reciclaje	Colaborador en Logística	<ul style="list-style-type: none"> - Establecer sistemas eficientes de gestión de residuos relacionados con la instalación y operación de los sistemas solares. Esto incluye la identificación, clasificación y disposición adecuada de materiales reciclables y no reciclables. 	<ul style="list-style-type: none"> - Realizar la gestión de residuos relacionados con el proyecto, promoción de prácticas sostenibles y de reciclaje en la implementación y operación.
Asociaciones de transporte	Colaborador en Gestión de Residuos	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollar estrategias logísticas para optimizar el transporte de equipos, minimizar costos y reducir el impacto ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> - Colaborar con otras entidades para planificar rutas eficientes, coordinar entregas y garantizar que la implementación y el mantenimiento se realicen de manera efectiva.

En lo relacionado con las oportunidades laborales generadas por el cierre de parques solares, la identificación de perfiles técnicos por parte de las comunidades revela un potencial valioso para el desarrollo económico local. Estos perfiles especializados abarcan áreas cruciales en el ámbito de las tecnologías de energía renovable, como la instalación de sistemas solares fotovoltaicos, la ejecución de trabajos eléctricos, habilidades en soldadura y experiencia en la construcción de infraestructuras civiles. La existencia de esta mano de obra calificada no solo facilita la transición hacia nuevas fuentes de empleo, sino que también fortalece la capacidad de las comunidades para participar activamente en la evolución de la industria energética hacia prácticas más sostenibles.

Además, en lo concerniente a la gestión de desechos electrónicos y metálicos, la presencia de pequeños empresarios y emprendedores en los municipios del corredor de vida desempeña un papel fundamental. Estos no solo se encargarían de la recolección de residuos, sino que también actúan como eslabones esenciales en la cadena de reciclaje. Al asumir la responsabilidad de transportar los desechos hacia instalaciones especializadas, contribuyen significativamente a la promoción de prácticas medioambientales responsables y al aprovechamiento eficiente de materiales reciclables. Este enfoque no solo mitiga el impacto ambiental, sino que también crea oportunidades económicas locales en el sector de gestión de residuos.

6. REUTILIZACIÓN, RECICLAJE O DESECHO TECNOLÓGICO EN PARQUES SOLARES

6.1. Reutilización de paneles solares fotovoltaicos

Reutilizar constituye una de las estrategias de recirculación de materiales, orientada a transformar la manera en que se fabrican y consumen los elementos manufacturados [57]. En este contexto, la reutilización consiste en utilizar un producto directamente para el mismo propósito para el que fue creado [58], [59]. Esto significa emplear un material o producto que ya tuvo un uso previo, sin someterlo a un proceso de transformación [59]. Este concepto no es lo mismo que *repurposing* en inglés, que se podría traducir como reutilización, pero que realmente se refiere a ideas como la readaptación o reconversión, lo que significa darle un uso distinto para el que se diseñó un producto o material [58].

Un ejemplo de la reutilización son los envases retornables de vidrio, que pueden servir hasta 60 veces antes de reciclarse, ahorrando así un 95% de energía, según la Agència de Residus de Catalunya [60]. El proceso de retorno de los envases de vidrio se muestra en la Figura 38. Otras formas de reutilizar son donar o intercambiar ropa, libros, revistas, muebles o aparatos electrónicos que estén en buen estado, o aprovechar materiales de construcción para nuevos proyectos.

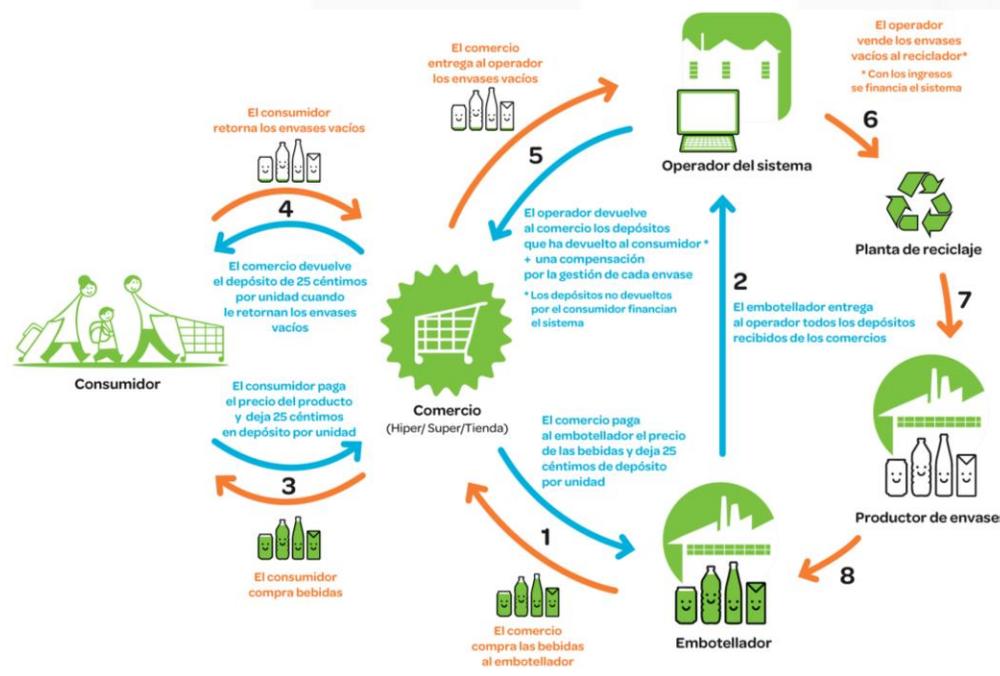


Figura 38. Proceso de retorno de envases plásticos. Fuente: Tomado de [61].

La producción de electricidad a través de paneles solares fotovoltaicos representa una manera de atender los requerimientos energéticos de un lugar, al mismo tiempo que se disminuye la emisión de gases de efecto invernadero, los cuales tienen un impacto negativo en la salud humana y en el entorno. No obstante, surge la interrogante sobre ¿cuál es el destino de los paneles solares al alcanzar el término de su vida útil en un parque solar fotovoltaico?

La Figura 39 ilustra el ciclo de vida de un panel solar. Este inicia con la extracción de materia prima como Silicio, el Aluminio y el vidrio, que después son procesados y empleados en la fabricación de los componentes del panel, donde se pueden implementar prácticas para reducir el consumo de recursos. Posteriormente, el panel se instala en un sitio específico para la generación de electricidad, y durante ese periodo se ejecutan actividades de mantenimiento para garantizar su rendimiento. Al alcanzar el final de su vida útil, el panel se desmonta y, según sus condiciones, puede someterse a procesos de reutilización o de reciclaje.

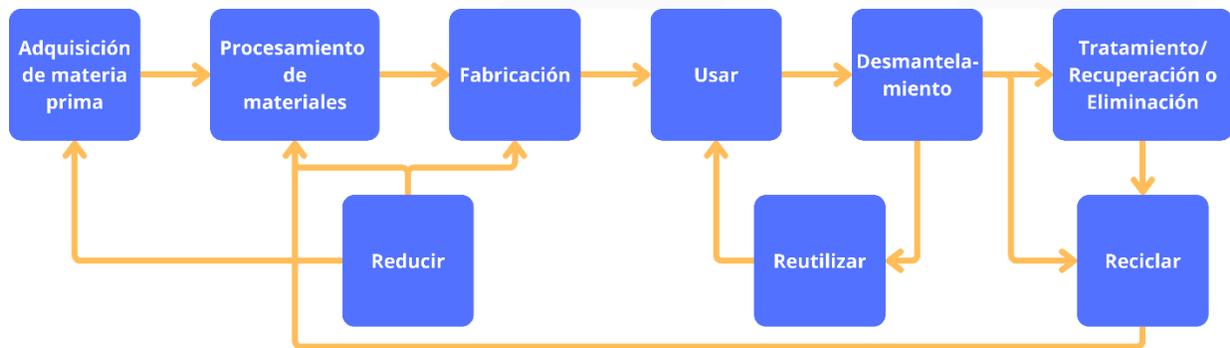


Figura 39. Ciclo de vida de un panel solar. Fuente: Adaptado de [32].

En ese orden de ideas, cuando un panel solar ya no cumple con los estándares de calidad establecidos en el parque solar, es decir, cuando no garantiza la producción de la energía necesaria para seguir operando, el reciclaje y la reutilización de dichos paneles surgen como respuesta a los riesgos para la salud. Peligros que se derivan de la contaminación causada por elementos como el plomo o la plata, que podrían ser liberados si los paneles se descartan en vertederos, así como los impactos negativos para el medio ambiente asociados con la incineración de paneles. [62]. En este caso, se hace énfasis en el proceso de reutilización de estos módulos solares.

De manera general, los paneles solares de silicio (monocristalino y/o policristalino) suelen tener una duración estimada de 25 a 30 años, aunque este período puede fluctuar según la calidad de los procesos de ensamblaje llevados a cabo por el fabricante [11]. No

obstante, es posible desmontar o retirar estos paneles de un parque solar antes de que transcurra dicho período debido a diversas razones, tales como [62]:

- Fallas en componentes del panel solar.
- Daños materiales ocasionados por fenómenos tales como granizos, relámpagos, lluvia, nieve, etc. O provocados por mala manipulación en el transporte o instalación.
- Cambio por paneles solares con una mayor eficiencia (mismo espacio, mayor potencia).

Las fallas y daños materiales en los componentes pueden dar lugar a fenómenos como puntos calientes, delaminación, amarilleamiento y grietas [63] (Ver Figura 40), los cuales resultan en una reducción de la eficiencia del panel. Además, estos problemas pueden tener implicaciones en la seguridad, aumentando el riesgo de cortocircuitos e incendios, lo que representa un peligro físico para los trabajadores del parque [64].

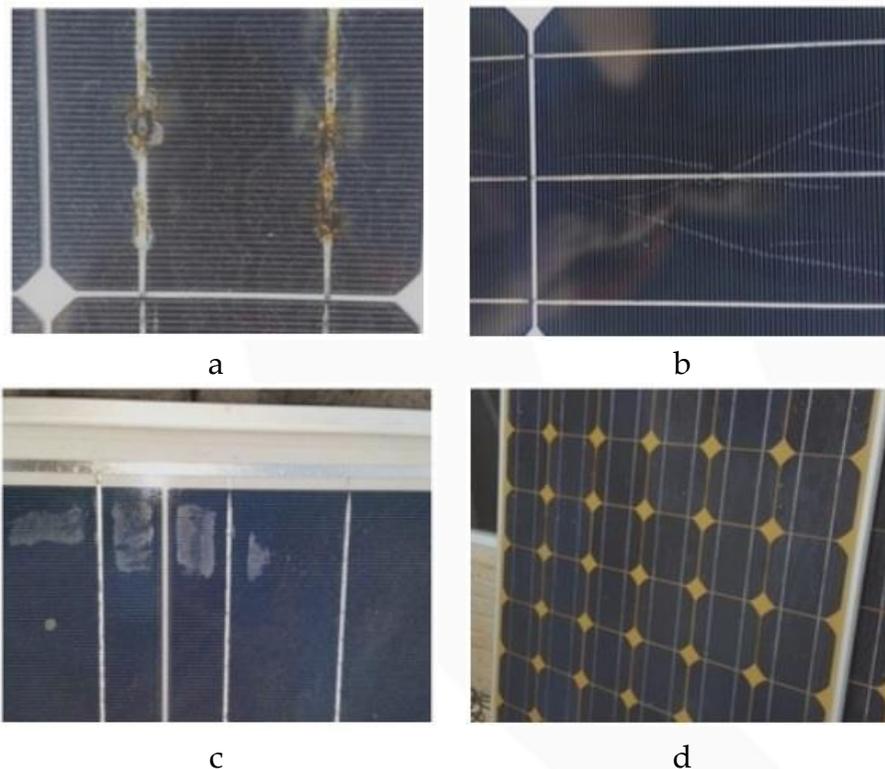


Figura 40. Daños materiales en un panel solar. a) Puntos calientes; b) Grietas; c) Delaminación; d) Amarilleamiento. Fuente: Tomado de [65].

Para identificar qué paneles solares deben ser retirados de un parque solar, considerando variables como fallas debido a la disminución de la potencia y a los riesgos en la seguridad, una de las metodologías para determinar esa pérdida de potencia implica

medir la potencia generada por el panel (P). En este enfoque, el panel se desmonta cuando la suma de la potencia medida y la incertidumbre de medición (ΔP) es menor que la potencia establecida en las especificaciones técnicas del panel (P_n) menos su tolerancia (ΔP_n) [64], como lo muestra la ecuación 1.

$$P + \Delta P < P_n + \Delta P_n \quad (1)$$

Las fallas de acuerdo con la pérdida de potencia pueden ser categorizadas tomando como base la Tabla 6.

Tabla 6. Categorización de los fallos de acuerdo con la pérdida de potencia. Fuente: Tomado de [64], [66].

Categoría	Descripción
A	Pérdida de potencia por debajo del 3% del umbral detectable.
B	Decremento exponencial y sostenido de la potencia a lo largo del tiempo.
C	Disminución lineal y constante de la potencia con el tiempo.
D	Pérdida de potencia saturada a lo largo del tiempo.
E	Degradación a saltos a lo largo del tiempo.
F	Declive de diversos tipos a lo largo del tiempo en términos de pérdida de potencia.

En lo relacionado a las fallas que pueden ser producidas debido a los problemas de seguridad, estas se pueden categorizar como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Categorización de los fallos de acuerdo con la seguridad. Fuente: Tomado de [64], [66].

Categoría	Descripción
A	No causa inseguridad
B	Riesgo de fuego, de cortocircuito o daño físico
C	Existencia de fuego, cortocircuito o daño físico

Ahora bien, para desarrollar el proceso de reutilización de paneles solares fotovoltaicos, se deben llevar a cabo ciertas labores tales como [62]:

- Limpieza de los paneles.
- Realizar una inspección visual en busca de defectos o daños.
- Llevar a cabo una prueba de eficiencia en un laboratorio certificado para comprobar el funcionamiento del módulo solar.

La inspección visual del módulo solar comprende la evaluación de sus ambas caras, frontal y posterior. También implica examinar elementos como el marco de aluminio, el cristal protector, las conexiones, las uniones, los cables, entre otros. El objetivo es detectar posibles problemas como burbujas o delaminación, grietas en las células solares, partes

oxidadas, deformación del marco, rayones o roturas, desajuste en la caja de conexión o desconexión de cables, y otros inconvenientes en las partes eléctricas [64].

Las pruebas de laboratorio resultan beneficiosas para verificar la eficiencia del panel solar. Estas pruebas incluyen la toma de mediciones de voltaje y corriente con el propósito de analizar la curva característica del panel. Los paneles solares presentan una curva característica, representada en la Figura 41, donde la curva verde refleja el rendimiento normal de un panel en condiciones adecuadas, mientras que un panel en mal estado podría manifestar un comportamiento similar a la curva roja.

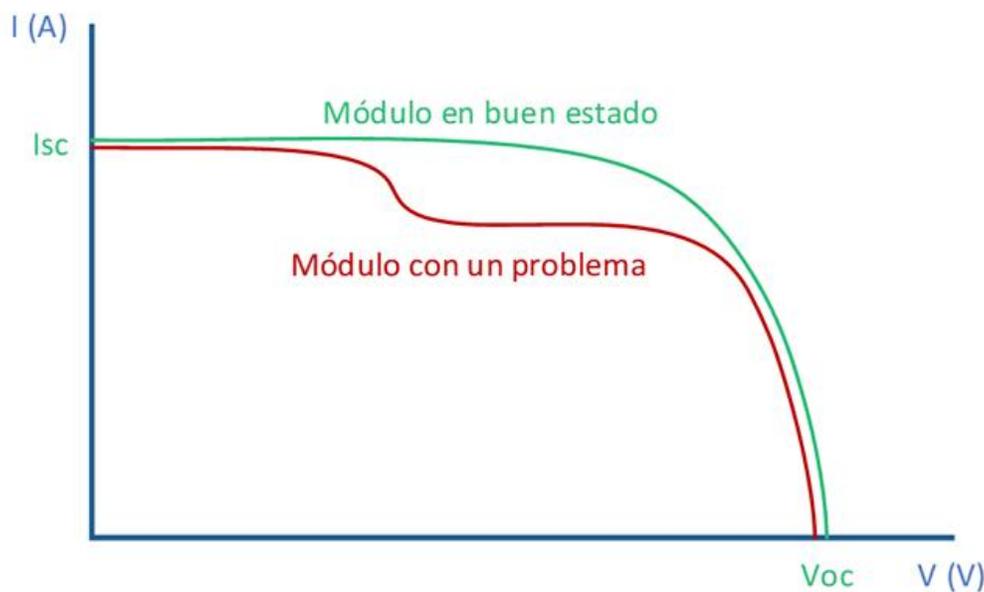


Figura 41. Curva característica de un panel solar. Fuente: Adaptado de [67].

En ese orden, la investigación desarrollada en [64], presenta el diagrama de flujo del proceso destinado a evaluar la capacidad de reutilización de un panel solar, el cual está ilustrado en la Figura 42. De esta manera, los requerimientos mínimos que deben cumplir los paneles solares para su reutilización son los siguientes [64]:

- En términos de seguridad, debe estar en la categoría A (ver Tabla 7).
- En términos de pérdida de potencia, ser categoría A, B, o C (ver Tabla 6).
- Tener una eficiencia mayor al 90%.

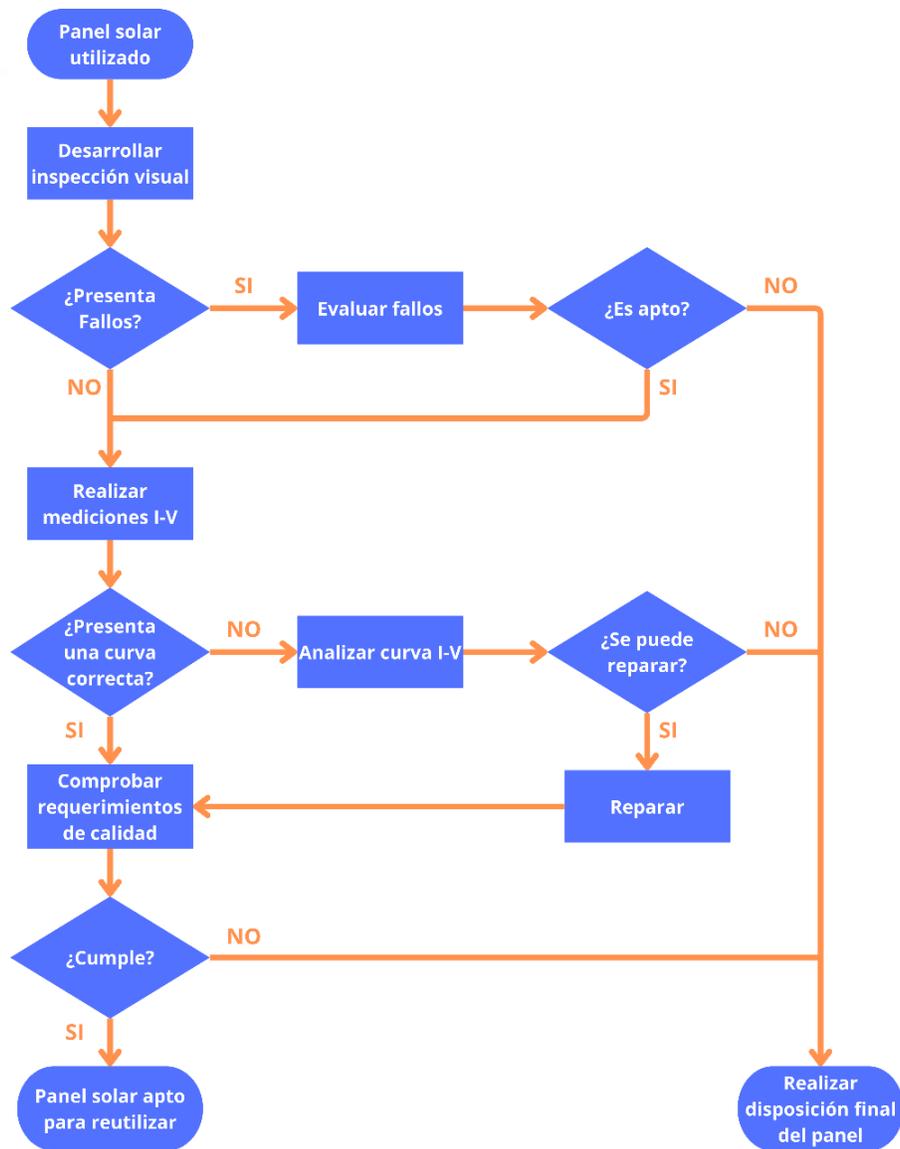


Figura 42. Proceso para analizar la aptitud de un panel para reutilización. Fuente: Adaptado de [64].

En [64] se estima que, de un conjunto de 100 paneles solares fotovoltaicos, únicamente el 25% supera la evaluación visual. De estos 25 paneles, 18 cumplen con los requisitos después de someterse a mediciones de voltaje y corriente. La mitad de estos 18 paneles, es decir, nueve, requieren reparaciones, mientras que los siete restantes deben ser destinados para su disposición final. Asimismo, se estima un costo total de € 1.091,50, para realizar la revisión de los 100 paneles, y el transporte, procesos de medición y reparación de los paneles aptos. En síntesis, el 18% de los paneles solares de un panel solar se pueden reutilizar, y el costo que representa todo el proceso es de € 60,64 por cada panel de ese 18%.

6.2. Procesos de reciclaje en la industria fotovoltaica y parques solares

La gestión de residuos y desechos de diferentes sectores e industrias ofrecen un reto creciente al que se enfrentan las entidades públicas y privadas de índole nacional e internacional y que se ha destacado por los compromisos adquiridos por 196 países miembros de Naciones Unidas en el marco de la COP21 o Acuerdo de París, en donde se estableció la Agenda 2030 como una hoja de ruta global para el Desarrollo Sostenible, un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, que también tiene la intención de fortalecer la paz universal y el acceso a la justicia.

Cuando se revisan las cifras de generación de residuos, se estima que cada año en el mundo se recolecta una cantidad de 11.200 millones de toneladas de residuos sólidos, el creciente volumen y complejidad de estos asociados a la economía moderna está planteando un grave riesgo para los ecosistemas y la salud humana. De todos los flujos de desechos, los desechos de equipos eléctricos y electrónicos que contienen sustancias peligrosas nuevas y complejas presentan el desafío de más rápido crecimiento tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo.

La solución, en primer lugar, es la minimización del desperdicio. Cuando no se puedan evitar los residuos, la segunda opción debería ser la recuperación de materiales y energía de los residuos, así como la remanufactura y el reciclaje de los para convertirlos en productos utilizables. El reciclaje conduce a un ahorro sustancial de recursos. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), los desechos electrónicos generados a nivel mundial crecieron un 38% pasando de 5,3 a 7,3 kilogramos per cápita al año entre 2010 y 2019 mientras que el reciclaje de estos desechos aumento a una tasa mucho menor pasando de 0,8 a 1,3 kilogramos per cápita al año. Por lo tanto, ante el inminente crecimiento de este tipo de desechos, la dependencia de muchas actividades humanas en torno a la tecnología y la preocupación latente por gestionarlos, diversas organizaciones a nivel mundial han establecido lineamientos y políticas para ofrecer un mejor manejo a este tipo de materiales.

En su más reciente informe denominado “Towards Zero Waste: A Catalyst for delivering the Sustainable Development Goals”, Centro Mundial de Excelencia del PNUMA sobre gestión ambientalmente racional de residuos (IETC, por sus siglas en inglés) plantea que el uso lineal desenfrenado de recursos está generando más desechos y desechos más complejos, que muchas comunidades y países no pueden gestionar. En consecuencia, los residuos están contaminando nuestro aire, tierra y agua, dañando la salud humana y contribuyendo a la crisis climática global [68]. Lo anterior, requiere de un ajuste del

modelo de economía circular tradicional que considere el nuevo tipo de residuos y desechos provenientes de industrias nuevas o emergentes como es el caso de los desechos generados en sistemas de energías renovables, el modelo propuesto por UNEP-IETC se presenta en la Figura 43.

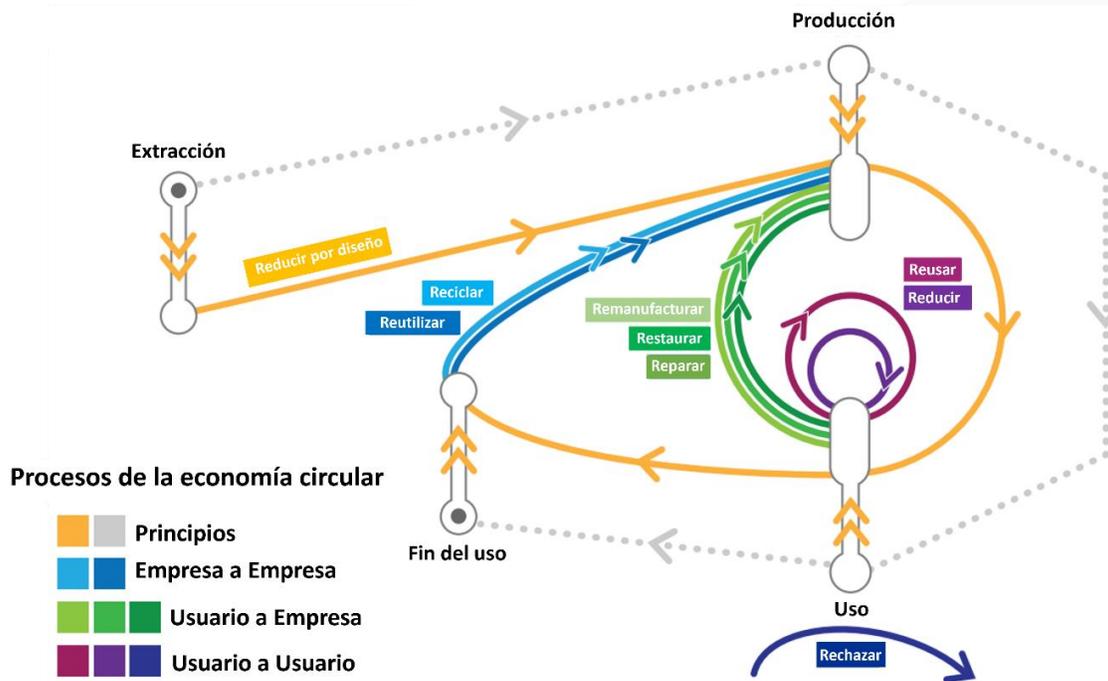


Figura 43. Modelo y procesos de economía circular. Fuente: Adaptado de [68].

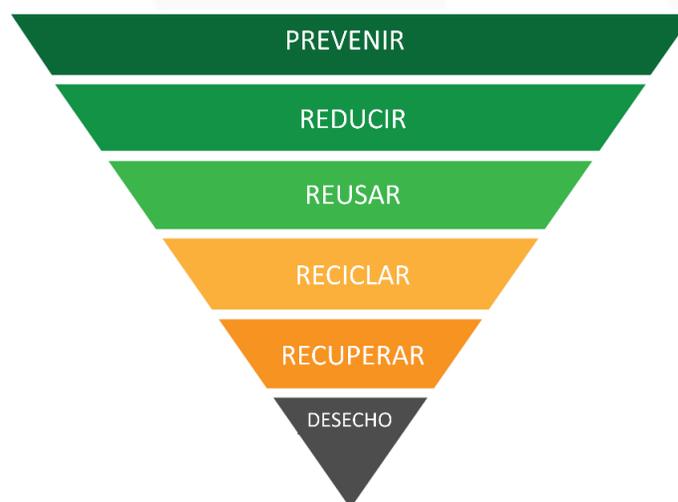


Figura 44. Jerarquía de la gestión de residuos electrónicos (E-Waste). Fuente: Adaptado de [68]

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible mencionados con anterioridad marcan un camino para promover la circularidad y aportar las bases para lograr un crecimiento económico respetuoso con las capacidades de nuestro planeta. Según mediciones de Global Footprint Network, la Tierra ha entrado en un déficit ecológico, es decir, se han agotado todos los recursos que el planeta es capaz de regenerar en un año, lo que trae consecuencias que empiezan a acentuarse. Es importante tener en cuenta que el déficit ecológico es un indicador general y puede variar según la región y el tipo de recurso considerado. Los factores que contribuyen a este déficit incluyen la sobreexplotación de recursos naturales, la deforestación, las emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros. Para 2022, la humanidad utilizó el equivalente a 1,7 planetas Tierra para satisfacer sus demandas de recursos naturales, lo que significa que se consume a un ritmo insostenible y acumulando un déficit ecológico. La Figura 45 presenta un mapa global de déficit ecológico como una muestra de la importancia del concepto de las “4R” en la gestión de residuos y desechos.

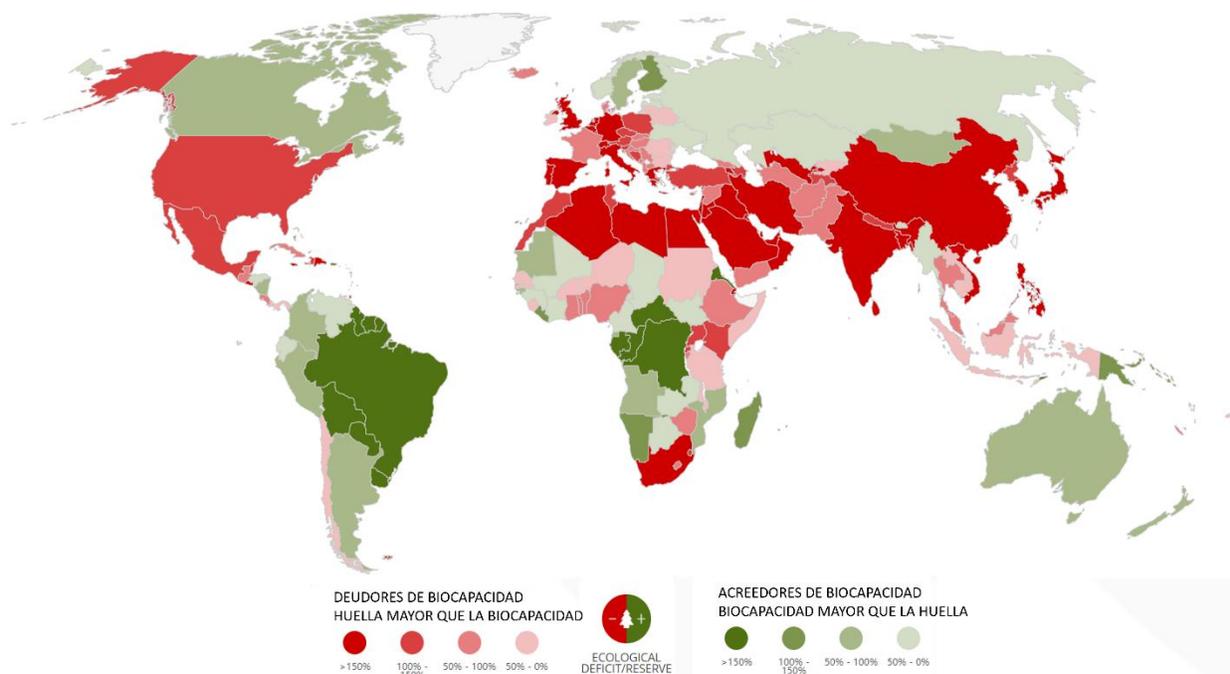


Figura 45. Déficit ecológico global. Fuente: Tomado de [69].

En la Agenda 2030, el ODS 12 denominado “Producción y Consumo Responsables”, establece las metas que en el caso de Colombia son definidas por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y el CONPES 3918. Una de las principales apuestas en este sentido es lograr a 2030 una tasa de reciclaje del 17,9% como se observa en la Figura 46.

Sin embargo, esto contrasta con el crecimiento en la generación de desechos electrónicos, que supera ampliamente la tasa de reciclaje para este tipo de materiales como se observa en la Figura 47.

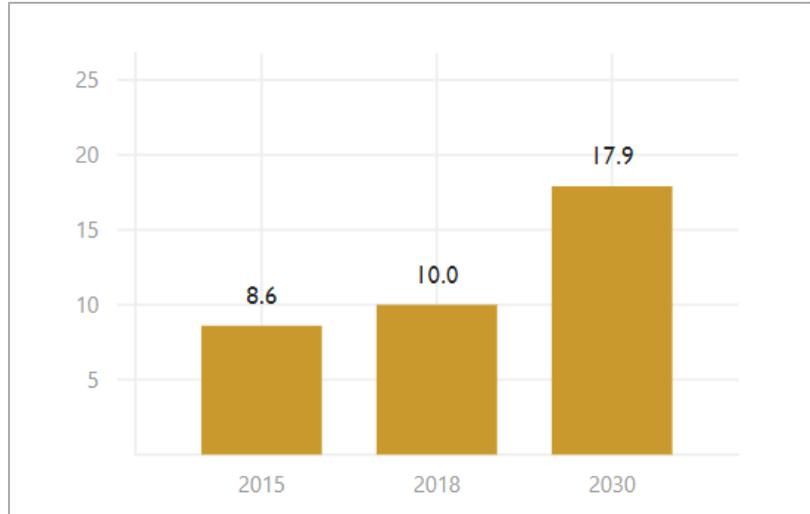


Figura 46. Tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos (%). Fuente: Tomado de [70]

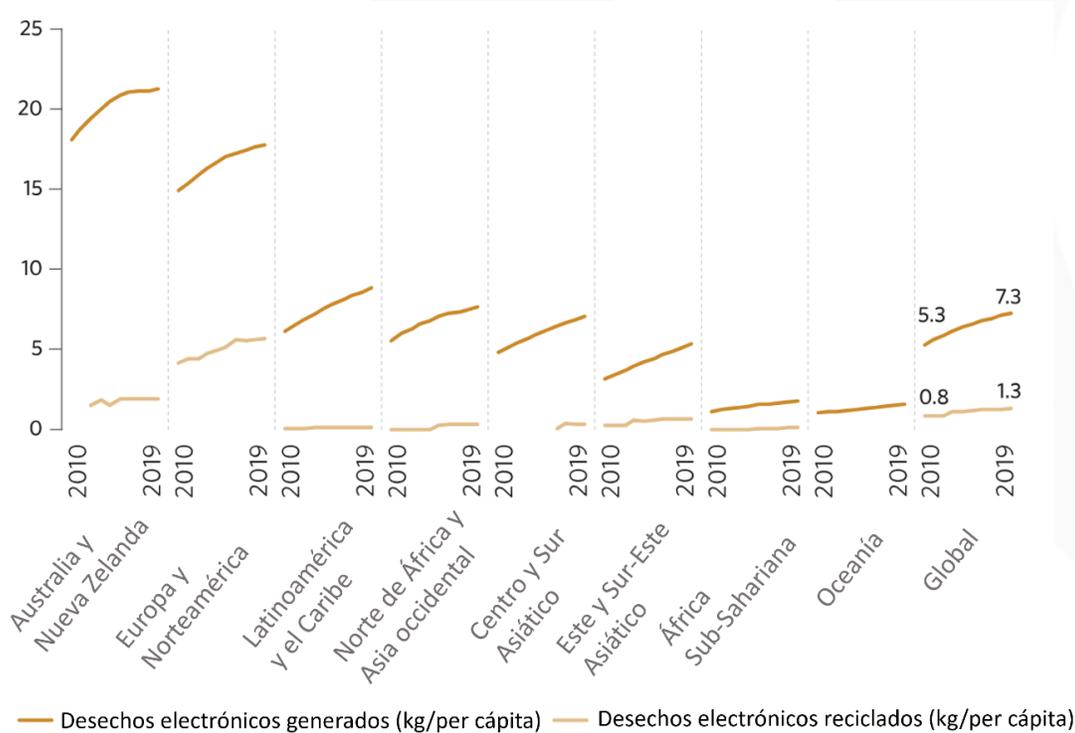


Figura 47. Residuos electrónicos generados y reciclados, 2010 y 2019 (kilogramos per cápita). Fuente: Adaptado de [71].

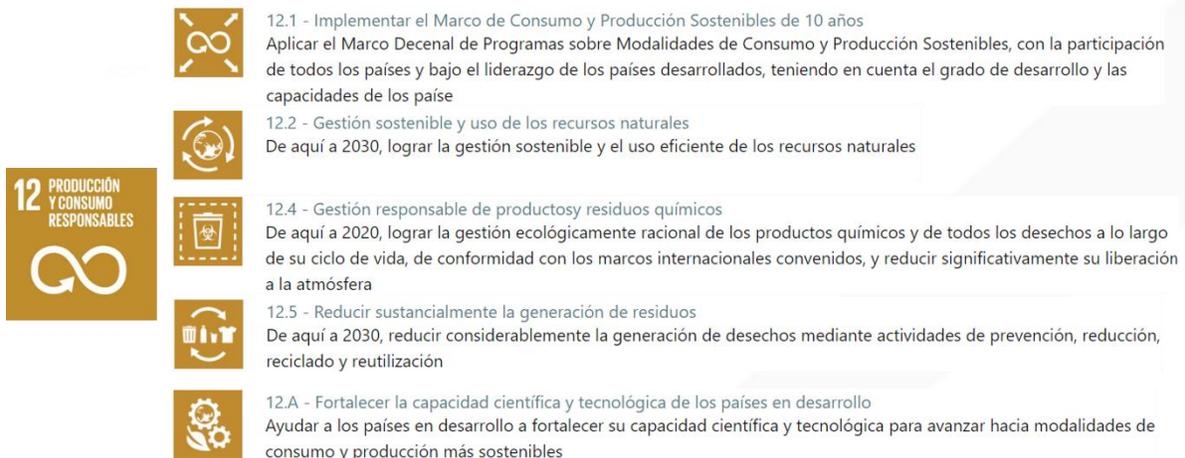


Figura 48. Metas del ODS 12 asociadas al reciclaje y reutilización de desechos. Fuente: Tomado de [72].

La industria de las energías renovables y especialmente los proyectos de energía solar fotovoltaica no son ajenos a la problemática de generación de desechos electrónicos, por el contrario, tienden a agravar la situación actual de este tipo de residuos. Con el aumento de la capacidad de energía solar fotovoltaica instalada en todo el mundo, también se prevé un aumento considerable en la generación de residuos y se estima que la generación actual de 30.000 toneladas se incrementara aproximadamente a 80 millones de toneladas al año para 2050.

Sin embargo, a pesar del desafío que implica enfrentar la transición energética y al mismo tiempo lidiar con la generación de residuos electrónicos, también se encuentran oportunidades que pueden explotarse en un contexto colaborativo y comunitario. Una de estas oportunidades aparece con la alta tasa de reciclaje que puede lograr a partir de los módulos solares, ya que el 90% de los materiales que los conforman son Vidrio, Cobre (Cu) y Aluminio (Al) los cuales pueden ser reutilizables, aunque existe preocupación por materiales como el Silicio (Si), plástico, Cadmio (Cd), Arsénico (As), Plomo (Pb) y Antimonio (Sb) que requieren de mayor tratamiento. La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) destaca que uno de los mayores desafíos para la industria solar será abordar las fases de desmonte para el reciclaje, incluyendo procesos como la delaminación, la separación del silicio del vidrio o de la película fina, y la purificación.

A pesar de estos desafíos, la problemática de los desechos también podría convertirse en una oportunidad. Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA), se estima que para el año 2030, el valor acumulado de las materias primas recuperables de los paneles solares al final de su vida útil será de alrededor de US\$450 millones a nivel mundial. Esto equivale

al costo de las materias primas necesarias en la actualidad para producir unos 60 millones de paneles solares nuevos.

La Figura 49 presenta datos relacionados con la generación de desechos para las industrias del almacenamiento de energía, energía eólica y energía solar, en el caso de la energía solar se espera un crecimiento del 3% en materiales de desecho entre 2025 y 2030 lo que equivale a 1,5 millones de toneladas de vidrio, metales y Silicio que pueden ser recuperadas hasta en un 95%.

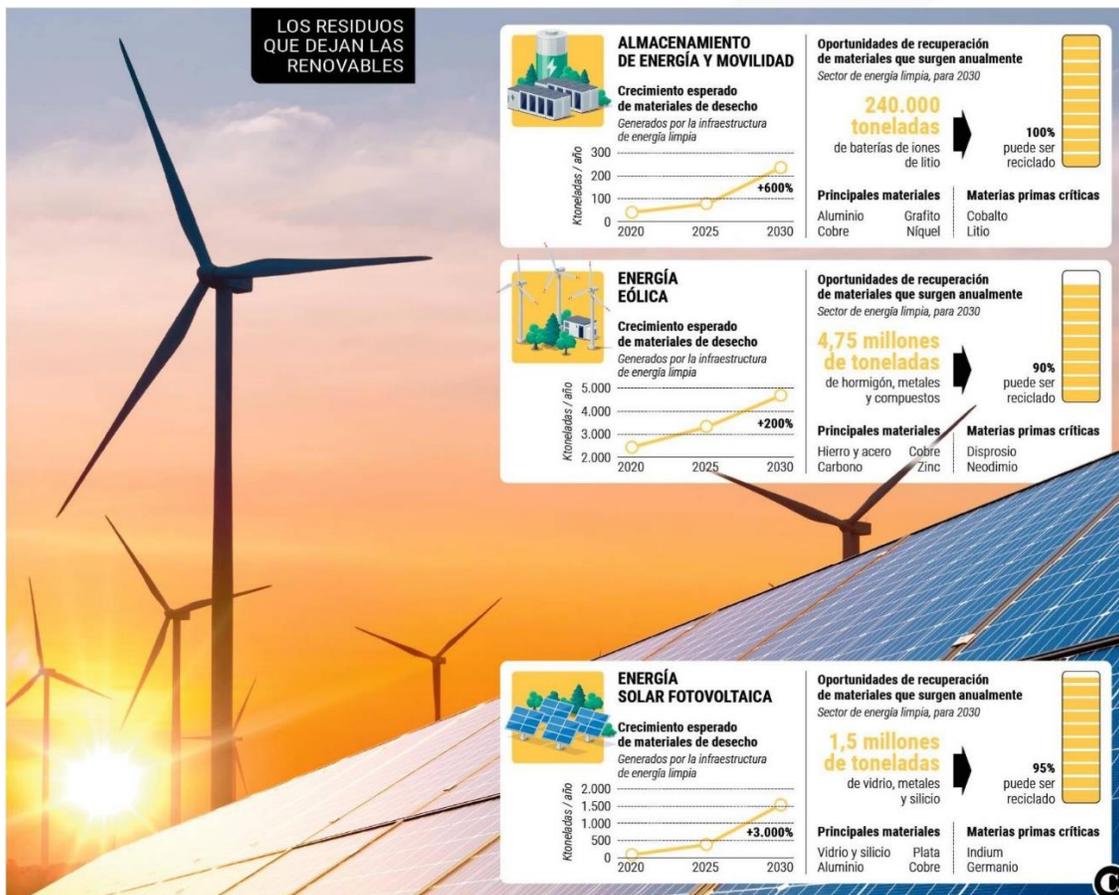


Figura 49. Oportunidades de recuperación de materiales en las energías renovables. Fuente: Tomado de [73].

En el corredor vida Cesar-Magdalena se encuentran en desarrollo y operación tres proyectos o parques solares fotovoltaicos denominados El Paso Solar ubicado en el departamento del Cesar, mientras que en el departamento del Magdalena se encuentran los parques Fundación Solar y Caimán Cienaguero, estos parques tienen la particularidad que se encuentran muy cerca a grandes proyectos mineros del país y a toda su cadena logística de transporte y almacenamiento. Resulta de especial interés para el orden local,

regional y nacional establecer cuáles son las potencialidades de los “desechos” que originaran estos parques una vez completen su vida útil, inicie la etapa posoperativa y se considere su desmonte o desmantelamiento, tal como lo indican las licencias y estudios de impacto ambiental consultadas. A continuación, la Figura 50 presenta el número de módulos solares instalados en cada uno de estos parques:

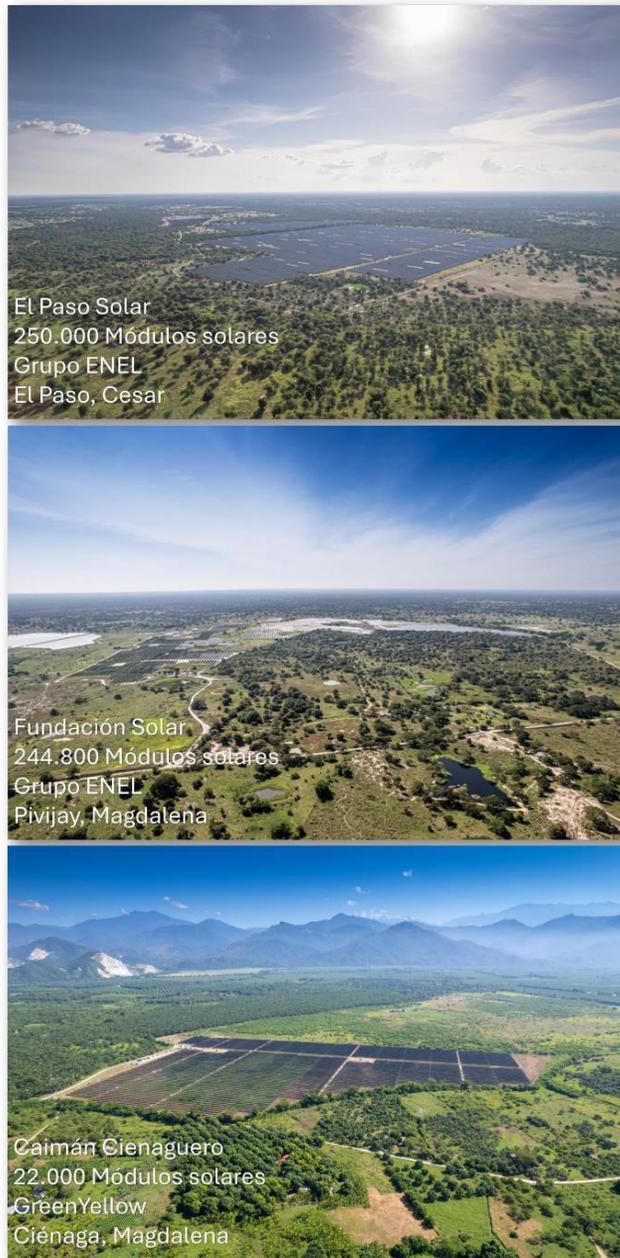


Figura 50. Numero de módulos parques solares corredor vida Cesar-Magdalena.

El parque solar El Paso cuenta con 250.000 módulos solares instalados cuya potencia nominal registrada es de 315Wp, el parque Fundación Solar cuenta con 244.800 módulos instalados con una potencia de 540Wp mientras que el parque Caimán Cienaguero cuenta con módulos solares de 650Wp. Si bien cada uno de estos módulos cuenta con potencias y dimensiones distintas, todos convergen en el tipo de celda y estructura, la cual se basa principalmente en Silicio cristalino, aluminio y vidrio, además de elementos menores como plástico o conductores eléctricos. La estructura de los módulos solares fotovoltaicos se muestra en la Figura 51.

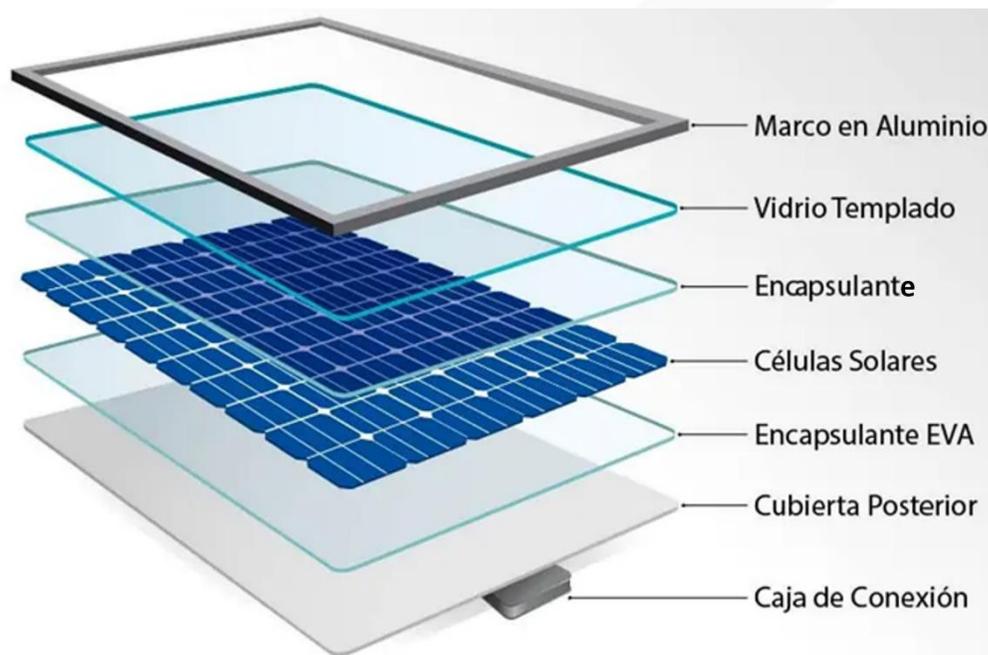


Figura 51. Estructura interna modulo solar fotovoltaico.

En el mercado de los módulos solares fotovoltaicos la tecnología cristalina (módulos mono y policristalinos) es la más extendida y con mayor presencia comercial, esta es la misma tecnología con la que están contruidos los módulos solares instalados en los tres parques bajo estudio ubicados en el corredor vida Cesar-Magdalena. En la Figura 52, se presentan las diferentes tecnologías disponibles, esto ofrece un reto adicional dato que los materiales y componentes que empezaran a ser desechados no son homogéneos y requerida de identificación de procesos de reciclaje específicos.

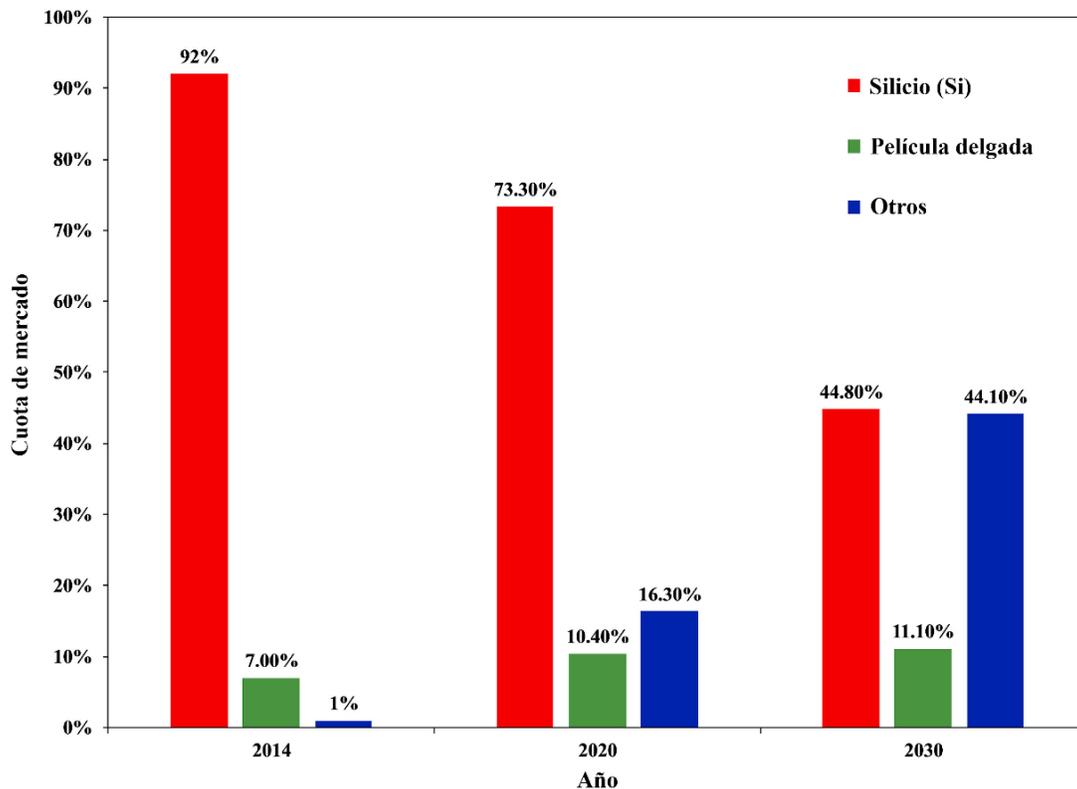


Figura 52. Cuota de mercado de paneles fotovoltaicos por tipo de tecnología (2014-2030). Fuente: Tomado de [74].

Para el reciclaje de módulos solares de Silicio cristalino se identifican diversos procesos que vienen siendo liderados por Japón, Europa y los Estados Unidos, en donde se han desarrollado diversas investigaciones relacionadas con diversos procesos y técnicas aplicables a nivel industrial. Se destacan tres procesos principales: físicos, térmicos y químicos. En la Figura 53 se presentan junto con su relación, partiendo del fin de la vida útil del módulo solar y terminando en la construcción de nuevos módulos solares a partir de los materiales reutilizados, todo esto siguiendo un principio de circularidad.

La separación física en el proceso de desmantelamiento de paneles solares, la extracción del marco de aluminio que rodea, junto con las cajas de conexiones y cables integrados, constituye la etapa principal [75], [76]. Cada parte individual de los módulos fotovoltaicos, es decir, el panel, la caja de conexiones y los cables, se trituran para evaluar la toxicidad de manera individual y total, facilitando así su eliminación [75]. El marco, que actúa como componente de unión y proporciona aislamiento y resistencia mecánica, se retira como último paso y puede recuperarse mediante metalurgia secundaria. Elementos como hierro, silicio y níquel, presentes en pequeñas cantidades, son comunes en las aleaciones de aluminio.

El tratamiento térmico y químico de módulos solares se ha basado en diversas aproximaciones y regularmente requieren de procesos previos como el desmantelamiento manual o separación física. El tratamiento térmico para el reciclaje de módulos o paneles solares generalmente implica el uso de altas temperaturas para descomponer y separar los diversos materiales presentes en los paneles. Este proceso se realiza con el objetivo de recuperar materiales valiosos y reducir la cantidad de residuos. En el caso del tratamiento químico para el reciclaje de módulos o paneles solares generalmente implica el uso de productos químicos para descomponer y separar los materiales que componen los paneles. Regularmente son aplicados varios solventes orgánicos, investigadores han encontrado que el tricloroetileno es el más efectivo.

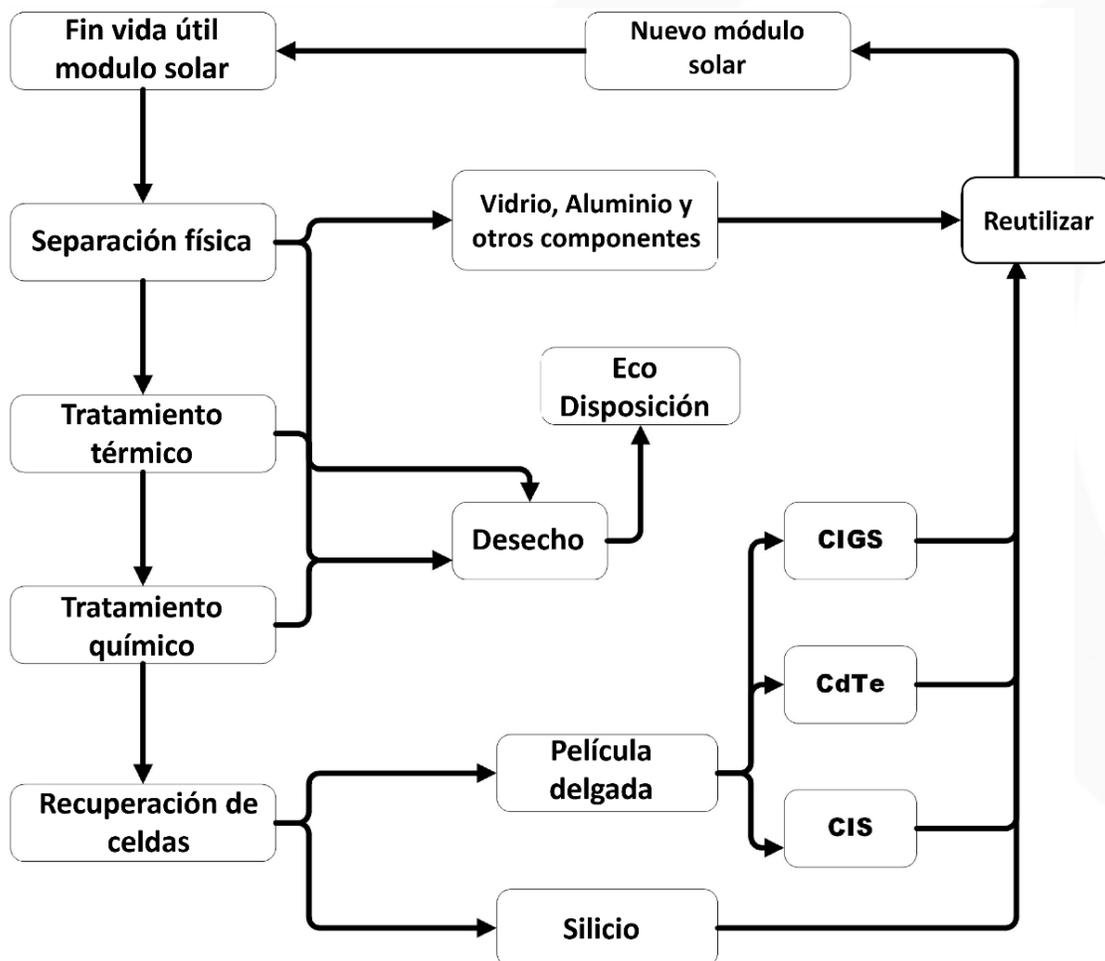


Figura 53. Diferentes tipos de procesos de reciclaje de energía solar fotovoltaica. Fuente: Adaptado de [74].

Tabla 8. Procesos de reciclaje de módulos solares de silicio [74].

Tecnología	Proceso	Ventajas	Desventajas
Delaminación	Desintegración física	Es posible obtener residuos diversos (Módulos partidos, submódulos y módulos laminados).	- Mezcla de las distintas fracciones de material. -Pérdida de cada fracción material. -El vidrio todavía está parcialmente combinado con el EVA. -Rotura de células solares.
	Disolución de diluyentes	-Eliminación de capas orgánicas del vidrio. -Eliminación sencilla de EVA.	-El tiempo necesario para la delaminación depende del área. -Equipo costoso.
	Tratamiento térmico	-EVA completamente eliminada. -Reutilizando obleas es posible recuperar células enteras	-Implica un alto consumo energético. -Emisiones peligrosas.
	Irradiación ultrasónica	-Se utiliza como proceso complementario para acelerar el proceso de disolución. -Eliminación simplificada de EVA.	-Proceso muy costoso. -Tratamiento de soluciones residuales.
Separación de materiales	Proceso mecánico seco y húmedo.	-Proceso no químico. -Proceso sencillo. -Requiere poca energía. -Equipo disponible.	Sin eliminación de sólidos disueltos.
	Grabado	-Proceso sencillo y eficaz. -Recuperación de materiales de alta pureza.	-Alta demanda de energía debido a las altas temperaturas. -Uso de químicos.

Una vez expuestas las diferentes tecnologías de reciclaje propuestas por diversos autores, así como sus características, ventajas y desventajas es importante identificar cuáles son los materiales con la que están construidos los parques solares y los módulos que son la unidad mínima de operación que los constituye. En la Tabla 9, se presentan los materiales reciclables y el contenido expresado en kg/kWp.

Tabla 9. Composición de módulos solares cristalinos [77].

Material	Composición (kg/kWp)
Marco de aluminio	Al 12,771
Silicio cristalino	Si 3,101
Buses de plata (busbar)	Ag 0,03
Estaño	Cu 0,451
Vidrio	Glass 54,721
Respaldo	Plástico 17,091
Sellante adhesivo	10%

Con esta información de referencia se propone la estimación de estos materiales representativos para los parques solares cercanos al corredor vida Cesar-Magdalena:

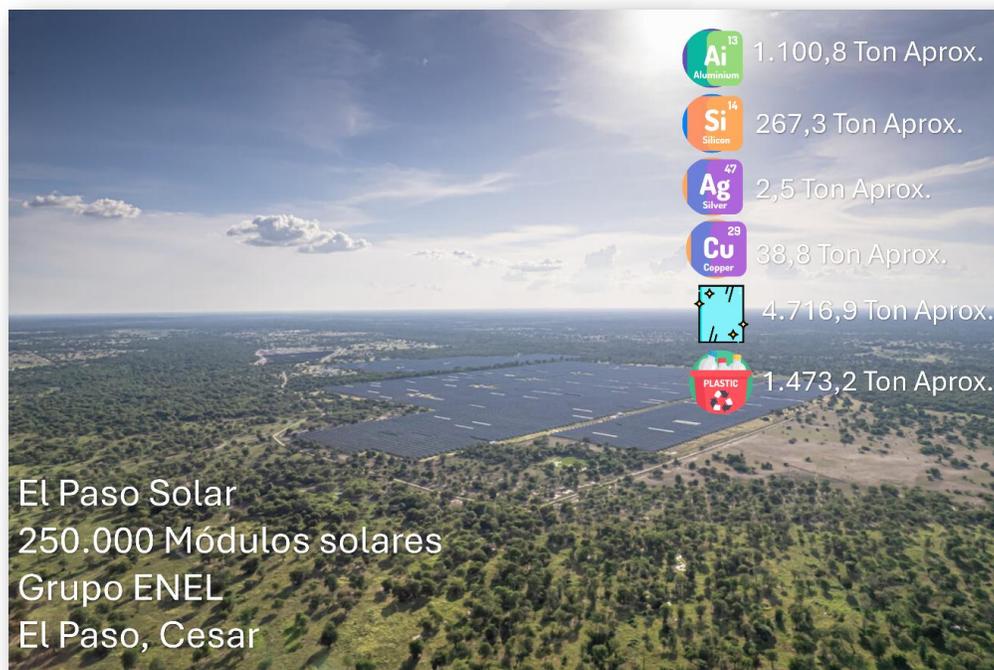


Figura 54. Estimación de los materiales que conforman el parque solar El Paso según los datos de la Tabla 9.

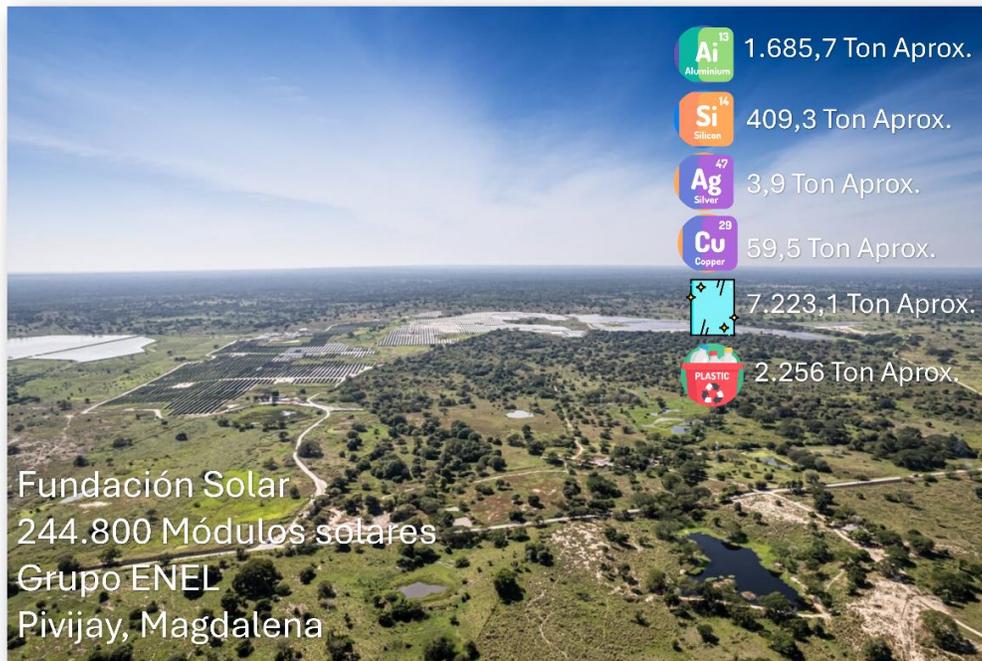


Figura 55. Estimación de los materiales que conforman el parque solar Fundación según los datos de la Tabla 9.



Figura 56. Estimación de los materiales que conforman el parque solar Caimán Cienaguero según los datos de la Tabla 9.

Existen diferentes organizaciones y empresas que se destacan por incluir entre sus procedimientos el reciclaje y tratamiento de los residuos generados en diferentes proyectos fotovoltaicos; estas organizaciones ubicadas principalmente en Europa, Asia y Norteamérica han encontrado en esta actividad una importante fuente de ingresos, por lo que a pesar de los desafíos, la problemática de los desechos también podría convertirse en una oportunidad. Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA), se estima que para el año 2030, el valor acumulado de las materias primas recuperables de los paneles solares al final de su vida útil será de alrededor de US\$450 millones a nivel mundial. Esto equivale al costo de las materias primas necesarias en la actualidad para producir unos 60 millones de paneles solares nuevos.

Se presentan a continuación varias de las organizaciones más destacadas en el ámbito del reciclaje de módulos solares cristalinos como los que conforman los diferentes parques solares en el corredor vida Cesar-Magdalena:



PV CYCLE, una organización sin fines de lucro con sus miembros ofrece servicios colectivos y personalizados de gestión de residuos y cumplimiento legal para empresas y poseedores de residuos de todo el mundo. Fundada en 2007 por y para la industria fotovoltaica, PV CYCLE incluye hoy en su cartera una amplia gama de productos de desecho.



Desde 2014, los importadores y fabricantes de paneles solares deben recolectarlos y tratarlos cuando alcanzan la etapa de residuos. El problema era que, en Francia, y también en el resto de Europa, ninguna planta era capaz hasta ahora de cumplir plenamente esa misión. Por este motivo, Veolia y PV CYCLE unieron sus fuerzas en 2018 para abrir la primera planta europea de reciclaje de paneles solares residuales. La planta se inauguró en julio de 2018 en Rousset, una pequeña ciudad de la región de Bouches-du-Rhône.



ROSI es una empresa que ofrece soluciones innovadoras para el reciclaje y revalorización de materias primas en la industria fotovoltaica. Sus tecnologías permiten recuperar silicio de alta pureza y otros metales que actualmente se pierden durante la producción de células fotovoltaicas y al final de la vida útil de los paneles solares.



Este tipo de generación de energía ha mostrado grandes tasas de crecimiento en toda Europa desde el cambio de milenio. Las plantas pueden contribuir de forma importante a la protección del clima mediante la generación de energía limpia durante aproximadamente dos décadas. Consideramos que es nuestro deber garantizar la sostenibilidad de los módulos fotovoltaicos basados en silicio más allá de su período de uso. Como empresa de reciclaje responsable, garantizamos la eliminación de módulos fotovoltaicos conforme a la ley mediante pruebas exhaustivas para su reutilización y/o reciclaje, incluidos certificados de reciclaje. Desde módulos fotovoltaicos individuales hasta parques solares completos: ofrecemos a los fabricantes de módulos, EPC, operadores de parques solares, instaladores, empresas, distribuidores y sistemas de captación conceptos integrales y económicos de final de vida de un solo proveedor.



First Solar contribuye a una economía circular al convertir los subproductos de la minería en una tecnología fotovoltaica (PV) ecoeficiente líder fabricada con menos energía, agua y semiconductores que otras tecnologías fotovoltaicas disponibles comercialmente. Los módulos First Solar están diseñados para un reciclaje de alto valor para maximizar la recuperación de materiales al final de su vida útil y recuperar más del 90% de los materiales del módulo para su reutilización, proporcionando recursos secundarios de alta calidad para nuevos paneles solares, vidrio, caucho y productos de aluminio.

El PERTE pretende impulsar el reciclaje de un tipo de producto que hasta ahora no estaba en la agenda: el residuo que producen las energías renovables. Hablamos de las palas de los aerogeneradores, de las baterías (industriales, las que mueven los vehículos eléctricos y las que almacenan energía solar) y de los paneles solares. Las ayudas favorecerán la creación de nuevas plantas de tratamiento en España.

6.3. Disposición del desecho tecnológico de los paneles solares

Los paneles solares, también conocidos como módulos solares, cuentan con una vida útil prolongada, manteniendo su eficiencia a lo largo de varios años. Sin embargo, diversos factores pueden afectar su rendimiento, lo que eventualmente puede llevar a su desecho, comúnmente previsto entre los 25 y 30 años de uso [78]. La gestión adecuada al final de la vida útil de estos paneles emerge como un enfoque fundamental para el tratamiento apropiado de los residuos fotovoltaicos. En el futuro cercano, la administración de la fase final de los módulos fotovoltaicos desempeñará un papel estratégico en la consecución de un sector fotovoltaico sostenible. Se estima que los residuos de paneles fotovoltaicos, mayormente compuestos de vidrio, podrían alcanzar un total de 78 millones de toneladas a nivel mundial para el año 2050 [79]. Esto resalta la importancia de implementar procedimientos eficaces de recuperación y reciclaje, así como adoptar tecnologías adecuadas para el manejo y disposición de los residuos derivados del desmantelamiento de centrales fotovoltaicas.

Debido a la diversidad de materiales que constituyen el panel solar, la industria ha desarrollado métodos para gestionar los residuos cuando es necesario desmantelarlos. Esta necesidad puede surgir debido a que la reutilización directa del panel para una segunda vida ya no es eficiente o porque el panel presenta defectos. Estos métodos se implementan al concluir el ciclo de vida del panel, marcando la fase final de la disposición de desechos. Sin embargo, en la actualidad, persisten limitaciones en los datos oficiales sobre la cantidad de residuos fotovoltaicos generados y las técnicas de eliminación y reciclaje adoptadas en contextos internacionales y europeos [78]. La Figura 57 exhibe las cantidades, en kilogramos por cada kWp, de la composición de materiales potencialmente reciclables en paneles solares de silicio cristalino.

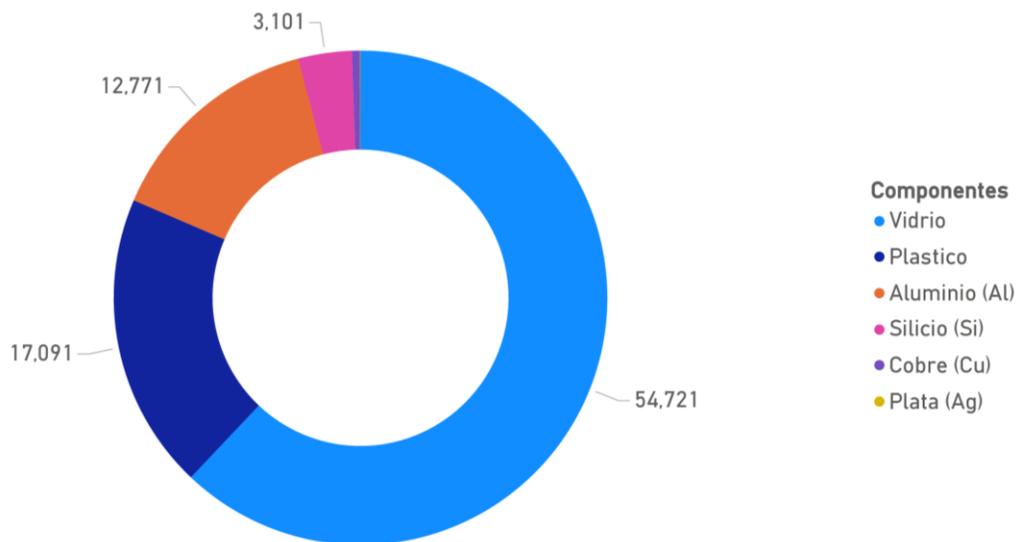


Figura 57. Kilogramos de materiales potencialmente reciclables por cada kWp. Adaptado de [80].

A pesar de que se están desarrollando múltiples procesos tecnológicos para el procesamiento y reciclaje de módulos fotovoltaicos, solo dos de ellos se están implementando a escala industrial. Uno de ellos, desarrollado por Deutsche Solar (anteriormente operativo en Alemania), se aplica a módulos de silicio cristalino. El otro, perfeccionado por First Solar, se utiliza para módulos de película delgada y está actualmente operativo en Estados Unidos, Alemania y Malasia [81]. Se están llevando a cabo y respaldando con financiamiento otros procedimientos que investigan técnicas mecánicas, térmicas y químicas experimentales. Estos procesos forman parte de destacados programas de investigación de la Unión Europea, como la Recuperación de Materiales Valiosos para Energía Solar, Enriquecimiento y Descontaminación (RESOLVED) y la Evaluación de Sostenibilidad de Sistemas de Energía Solar (SENSE) [82].

La adecuada gestión al final de la vida útil de los paneles fotovoltaicos constituye una fase crucial en el manejo de los materiales, evitando pérdidas potenciales mediante la incineración o la generación de impactos ambientales perjudiciales mediante el desecho convencional. A través del reciclaje de paneles fotovoltaicos, es posible obtener productos mediante el reprocesamiento de los materiales que integran el dispositivo como el marco de aluminio, la línea de rejilla de plata, el alambre de estaño, cobre, vidrio, plásticos y demás elementos [80]. La Figura 58 proporciona una visión general ilustrativa de las diversas capas que constituyen un panel solar.

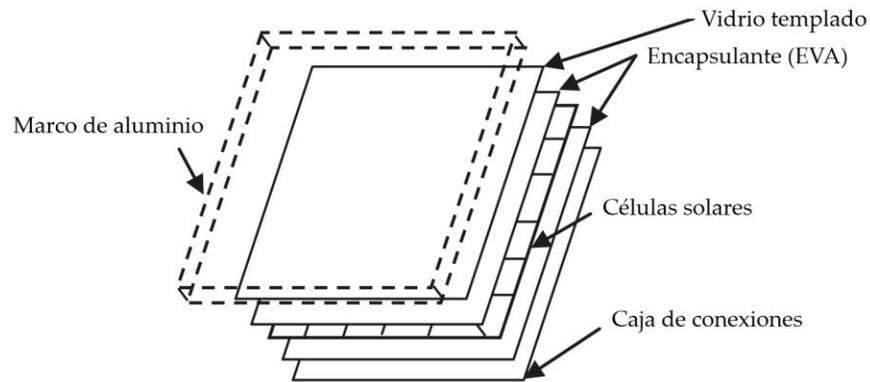


Figura 58. Ilustración de un panel solar de silicio cristalino. Adaptado de [80].

El silicio cristalino presente en los paneles fotovoltaicos de este tipo, así como los metales raros como indio, galio, germanio y telurio utilizados en los paneles fotovoltaicos de película delgada, concentradores y otras tecnologías emergentes, son susceptibles de ser reciclados para la fabricación de nuevos equipos. Este enfoque ha despertado un interés creciente entre investigadores a nivel mundial. Sin embargo, el reciclaje del plástico mixto resulta desafiante para su reintegración en productos, aunque se puede aprovechar para la generación de energía. A pesar de las ventajas de estos materiales reciclables, se deben tener en cuenta los metales pesados tóxicos, como el cadmio y el plomo, presentes en los paneles fotovoltaicos, aunque su contribución sea inferior al 1% en peso. La presencia de estos metales pesados puede calificar el residuo resultante del reciclaje como desecho peligroso, lo que implica la necesidad de su disposición en un vertedero de residuos adecuado.

El porcentaje recuperable de cada material utilizado en la fabricación de los módulos es notablemente alto para el vidrio y el aluminio, alcanzando el 97% y el 100%, respectivamente. Para el cobre y el telurio, aunque menor, aún es significativo, rondando alrededor del 80%. En cambio, para metales raros como el indio y el galio, que representan solo cerca del 1% del peso total del panel, los porcentajes de recuperación son del 75% y del 99%, respectivamente [83]. Se han propuesto diversos procedimientos para el reciclaje de residuos fotovoltaicos, y el proceso estándar para reciclar paneles fotovoltaicos de silicio cristalino implica varios pasos. En la Figura 59, se presenta el proceso con las tecnologías de reciclaje aplicables a los paneles solares fotovoltaicos de silicio cristalino al final de su vida útil, acompañadas de información sobre los principales materiales reutilizados y los desechos asociados en cada etapa del tratamiento.

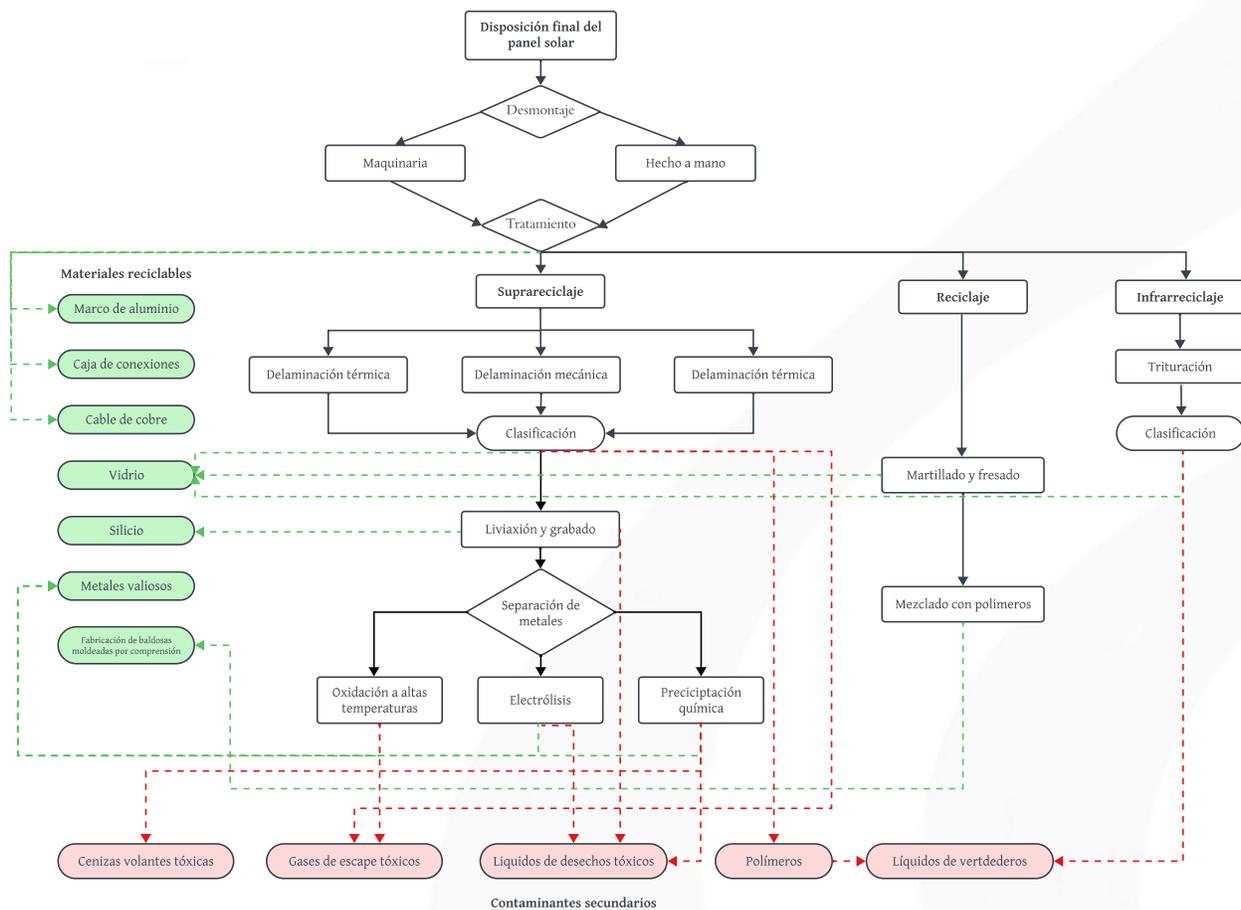


Figura 59. Proceso general de reciclaje para paneles solares de silicio cristalino. Adaptado de [84].

En primer lugar, se lleva a cabo la separación del módulo, seguida por la eliminación del etileno acetato de vinilo (EVA, un polímero termoplástico) y, por último, la recuperación de recursos. Cada uno de estos subprocesos de tratamiento de residuos puede emplear métodos físicos, químicos, térmicos, criogénicos, eléctricos o una combinación de estos métodos. Inicialmente, se desmonta el marco de aluminio (Al), y a continuación se retiran el cable y la caja de conexiones del módulo fotovoltaico, es decir, la célula solar y la lámina posterior. Posteriormente, el EVA, un polímero termoplástico que sujeta firmemente las capas adyacentes, se elimina mediante tratamientos térmicos, químicos, mecánicos, criogénicos o una combinación de estos métodos para separar el vidrio, la célula solar y la lámina posterior de plástico. Para finalizar, los metales preciosos como la plata (Ag), el aluminio (Al) y el cobre (Cu) se recuperan mediante procedimientos hidrometalúrgicos y electroquímicos [84].

En términos generales, el proceso se divide entre la separación de módulos y la recuperación de recursos de la célula, también conocido como reciclaje de "tasa baja" y "tasa alta", respectivamente [83]. Un elemento altamente problemático del reciclaje está relacionado con el encapsulante laminado (generalmente EVA) utilizado en los módulos, debido a los procesos a altas temperaturas (con un alto consumo de energía), el uso de disolventes y el tratamiento de los humos resultantes de la eliminación del encapsulado. Los componentes del sistema BOS (circuitos, inversores, etc.) representan una proporción significativa del impacto ambiental de los sistemas fotovoltaicos. Pueden contener materiales peligrosos como plomo, retardantes de llama bromados y cromo hexavalente [85].

La imposibilidad de reciclar el 100% de todos los materiales recuperados destaca la importancia de establecer una disposición final para estos desechos. Esta realidad nos confronta con la necesidad imperante de identificar soluciones sostenibles y efectivas para gestionar tanto los elementos que no son susceptibles de reciclaje como aquellos que emergen durante el proceso de reciclaje de otros materiales. Ante este desafío, se abre la puerta a la exploración de enfoques innovadores y prácticas que no solo minimicen el impacto ambiental de los residuos no reciclables, sino que también optimicen la gestión de los subproductos generados durante la recuperación de materiales reciclables.

La adopción de estrategias eficientes para el tratamiento y disposición final de estos desechos se vuelve esencial para avanzar hacia un modelo más sostenible y responsable en el ciclo de vida de los paneles solares y otros dispositivos tecnológicos. Durante el proceso de identificación de empresas colombianas encargadas de la disposición final de desechos y residuos peligrosos, se destacó la presencia de Lito S.A.S. [86]. Esta organización se especializa en la gestión integral de excedentes industriales y residuos peligrosos. Lito S.A.S. es una empresa colombiana que opera desde cuatro sedes estratégicas ubicadas en las ciudades de Barranquilla, Atlántico; Bogotá D.C.; Bucaramanga, Santander; y Medellín, Antioquia.

El reciclaje de los desechos tecnológicos es un tema de gran importancia en la actualidad, ya que estos residuos contienen sustancias tóxicas que pueden afectar al medio ambiente y a la salud humana. Además, el reciclaje permite recuperar materiales valiosos que se pueden reutilizar en la fabricación de nuevos productos, contribuyendo así a la economía circular y a la reducción de la huella ecológica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. International Energy Agency, «Renewables 2022», 2022. [En línea]. Disponible en: www.iea.org
- [2] I. International Energy Agency, «World Energy Outlook 2022». [En línea]. Disponible en: www.iea.org/t&c/
- [3] UPME, «Sistema de Información Eléctrico Colombiano (SIEL)».
- [4] Agència de Residus de Catalunya, «Restauración de Suelos». Accedido: 22 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/tipus_de_residu/residus_organics/restauracio_sols/
- [5] J. F. Martín Duque, «Restauración Geomorfológica», Universidad Complutense de Madrid. Accedido: 22 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ucm.es/otri/complutransfer-restauracion-geomorfologica>
- [6] Decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los Ecosistemas, «¿En qué consiste la restauración de los ecosistemas?» Accedido: 22 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.decadeonrestoration.org/es/en-que-consiste-la-restauracion-de-los-ecosistemas>
- [7] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Bosque Seco Tropical». Accedido: 22 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/bosque-seco-tropical/>
- [8] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «El Minambiente lidera 73 proyectos de restauración ecológica en todo el país», Bogotá, nov. 2021. Accedido: 22 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/el-minambiente-lidera-73-proyectos-de-restauracion-ecologica-en-todo-el-pais/>
- [9] Green Clear Solar, «End-of-Life Solar PV Panel Decommissioning & Recycling». Accedido: 20 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.greenclear-solar.com/post/end-of-life-solar-pv-panel-decommissioning-recycling>
- [10] J. J. Coble Castro, «¿Qué pasará con las plantas solares cuando termine su vida útil?», ago. 2021.
- [11] M. M. Sierra Céspedes, C. L. Vásquez Stanescu, y R. Ramírez Pisco, «Disposición final e impacto ambiental de las celdas fotovoltaicas», *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, pp. 74-90, 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.36089.60004/1.

- [12] J. J. Coble Castro, «¿Qué pasará con las plantas solares cuando termine su vida útil?», ago. 2021. Accedido: 24 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://theconversation.com/que-pasara-con-las-plantas-solares-cuando-termine-su-vida-util-165708>
- [13] «photovoltaik - Solartechnik für Installateure, Planer, Architekten». Accedido: 27 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.photovoltaik.eu/solarmodule/rosi-solar-anlage-zum-vollstaendigen-recycling-von-modulen-angefahren>
- [14] A. Escolar González, «Plomo, arsénico, cadmio y mercurio: efectos y estudios en Colombia», Universidad de los Andes, Bogotá D.C., 2018. Accedido: 24 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/38897>
- [15] E. Reyes, «¿Cómo reciclar residuos electrónicos en México?», mar. 2021. Accedido: 24 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://expansion.mx/tecnologia/2021/07/13/como-reciclar-basura-electronica-mexico>
- [16] National Geographic, «¿Por qué el reciclaje de aparatos electrónicos es tan importante para el planeta?», may 2022. Accedido: 24 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/05/por-que-el-reciclaje-de-aparatos-electronicos-es-tan-importante-para-el-planeta>
- [17] Grupo Retorna, «¿Qué es el Grupo Retorna?» Accedido: 25 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://recoenergy.com.co/grupo-retorna/>
- [18] bms Viafina, «Garantía de desmantelamiento», 2023. Accedido: 25 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.segurorenovables.com/garantia-de-desmantelamiento/>
- [19] Enel Green Power, «La atención hacia la comunidad local, un aspecto clave para la compra de energía renovable», jun. 2021. Accedido: 25 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.enelgreenpower.com/es/historias/articles/2021/06/crear-beneficios-comunidades-locales>
- [20] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, «Definición y objetivo de la evaluación del impacto ambiental», ago. 2018. Accedido: 25 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/definicion-y-objetivo-de-la-evaluacion-del-impacto-ambiental>
- [21] International Institute for Sustainable Development, «EIA – ¿Qué es? ¿Por qué? ¿Cómo?», 2023. Accedido: 25 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iisd.org/learning/eia/es/eia-essentials/what-why-when/>

- [22] A. Cristóbal López, «Evaluación de la implantación de energía solar fotovoltaica», 2017. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/47350/1/TFG_ALEJANDRA_CRISTOBAL_LOPEZ.pdf
- [23] E. Vaughn-Gómez, K. Vetrani-Chavarría, M. Murrell-Blanco, y L. Bermúdez-Hidalgo, «La optimización del proceso productivo de centros gastronómicos mediante ecoeficiencia: Estudio del restaurante La Turrialbeña, Costa Rica», *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 49, n.º 2, p. 13, jun. 2016, doi: 10.15359/rca.49-2.2.
- [24] I. D. Bautista Merino, W. A. Rodríguez Gonzalez, y J. C. Zeceña Landaverde, «Estudio de factibilidad para el diseño y conexión de un parque solar fotovoltaico de 100 MVA a la Red Eléctrica de Transmisión de El Salvador en la Subestación El Pedregal», CIUDAD UNIVERSITARIA, abr. 2018. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/16405/>
- [25] E. B. De León Rangel, «Sistematización de las experiencias en la producción de tomate (*Solanum lycopersicum*) bajo condiciones de invernadero en el Caserío Ciénaga Grande, Santa Lucía Utatlán, Sololá, Guatemala, C.A.», UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, 2014. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://api.core.ac.uk/oai/oai:www.repositorio.usac.edu.gt:2797>
- [26] A. Lescano Veloz y D. Vásquez Acuña, «Sistema de riego automatizado en el caserío Sigualo del Cantón Pelileo», *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*. Vol. 5, Núm. 4. , pp. 271-281, 8 de junio de 2023. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/666/923>
- [27] M. C. Contreras Vallejo, L. C. Castellanos Parrado, y J. P. Zuluaga Huertas, «DISEÑO DE UNA PLANTA DE ENERGÍA SOLAR PARA ABASTECER LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE VILLAVICENCIO», 2021. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/1716/1683>
- [28] J. D. Marín-Jiménez y P. J. González-Cruz, «Lecciones aprendidas del diseño de parques solares fotovoltaicos: Un enfoque de las características técnicas», *I+D Tecnológico* , vol. 16, n.º 1, 2020. doi: <https://doi.org/10.33412/idt.v16.1.2440>.
- [29] M. Castaño-Gómez y J. J. García-Rendón, «Análisis de los incentivos económicos en la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en Colombia», *Lecturas de Economía*, n.º 93, pp. 23-64, jul. 2020, doi: 10.17533/UDEA.LE.N93A338727.
- [30] E. L. Mejía, «Evaluación de proyecto de inversión: viabilidad financiera de la generación de energía fotovoltaica por medio de un huerto solar en Pereira», 2017. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10784/12303>

- [31] R. R. Rao, S. Priyadarshani, y M. Mani, «Examining the use of End-of-Life (EoL) PV panels in housing and sustainability», *Solar Energy*, vol. 257, pp. 210-220, jun. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.04.033.
- [32] S. Weckend, A. Wade, y G. Heath, «End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels», jun. 2016. Accedido: 27 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
- [33] A. Divya, T. Adish, P. Kaustubh, y P. S. Zade, «Review on recycling of solar modules/panels», *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 253, p. 112151, may 2023, doi: 10.1016/j.solmat.2022.112151.
- [34] M. P. Belançon, M. Sandrini, F. Tonholi, L. S. Herculano, y G. S. Dias, «Towards long term sustainability of c-Si solar panels: The environmental benefits of glass sheet recovery», *Renewable Energy Focus*, vol. 42, pp. 206-210, sep. 2022, doi: 10.1016/j.ref.2022.06.009.
- [35] A. Omar, Z. Seilkhan, G. Bissembayeva, O. González-Rodríguez, y L. Rojas-Solórzano, «The circular economy approach to evaluating end-of-life cost alternatives of solar PV panels: The case of Burnoye-1, Kazakhstan», *Environ Prog Sustain Energy*, vol. 42, n.º 1, ene. 2023, doi: 10.1002/ep.13948.
- [36] ONU, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible», Web Page. Accedido: 9 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://shorturl.at/eiN02>
- [37] Marcelo Schottlender Group, «Los ODS y la Organización Comunitaria», <https://www.schottlender.net/los-ods-y-la-organizacion-comunitaria/>.
- [38] J. Manuel *et al.*, «ABC Comunal para la participación», 2013.
- [39] Jesus David Villamizar Villamizar, «Índice de Pobreza Energética en Colombia», 2023.
- [40] G. P. Urrego *et al.*, «Colombia potencia mundial de la vida Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026», 2023.
- [41] Iberdrola, «Bioeconomía: los desafíos de un modelo clave para el desarrollo sostenible», Sostenibilidad Iberdrola.
- [42] Ministerio de Minas, *Decreto Reglamentario de Art. 235 PND Comunidades Energéticas*. 2023.
- [43] Ministerio de Minas, «Visor Comunidades Energéticas».
- [44] M. Bruni y D. Spuhler, «Bombeo de agua motorizado», 2018. Accedido: 2 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/distribucion/bombeo-de-agua-motorizado>

- [45] solarmodul, «Kits Bombeo Solar», 2020. Accedido: 2 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://solarmodul.pe/kits-bombeo-solar/>
- [46] L. Pereira, «El Motocarro un medio de Transporte que se mueve en busca de su formalidad», dic. 2022. Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.soloproposiciones.com/el-motocarro-un-medio-de-transporte-que-se-mueve-en-busca-de-su-formalidad/>
- [47] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Resolución 0762 de 2022», jul. 2022. Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/09/Resolucion-762-de-2022.pdf>
- [48] D. Torres, «Anatomía de los carros eléctricos», feb. 2021. Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://bydauto.com.co/blog/carros-electricos-anatomia/>
- [49] Organización Panamericana de la Salud, «Calidad del Aire Ambiente», 2016. Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire/calidad-aire-ambiente>
- [50] G. C. Saavedra Plazas *et al.*, «Estrategia Nacional de Calidad del Aire», Bogotá DC, 2019. Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/ESTRATEGIA_NACIONAL_DE_CALIDAD_DEL_AIRE_1.pdf
- [51] Ministerios de Salud y Proyección Social, «Abecé - Calidad del Aire». Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/abece-calidad-aire-salud.pdf>
- [52] Organización Mundial de la Salud, «Contaminación del aire ambiente (exterior)», dic. 2022. Accedido: 4 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [53] M. Cali, B. Hajji, G. Nitto, y A. Acri, «The Design Value for Recycling End-of-Life Photovoltaic Panels», *Applied Sciences*, vol. 12, n.º 18, p. 9092, sep. 2022, doi: 10.3390/app12189092.
- [54] Avghni Solar, «Solar Street Lighting Systems», <https://augnsolar.com/solar-street-lighting-systems/>.
- [55] María Camila Bonilla, «Eran mineros de carbón y ahora terminaron un diplomado en transición energética», 2023. Accedido: 4 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en:

<https://www.elespectador.com/ambiente/eran-mineros-de-carbon-y-ahora-terminaron-un-diplomado-en-transicion-energetica/>

- [56] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Construcción Sostenible», 2023. Accedido: 4 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/construccion-sostenible/>
- [57] M. Linder, S. Sarasini, y P. van Loon, «A Metric for Quantifying Product-Level Circularity», *J Ind Ecol*, vol. 21, n.º 3, pp. 545-558, jun. 2017, doi: 10.1111/jiec.12552.
- [58] N. Kebir *et al.*, «Second-life battery systems for affordable energy access in Kenyan primary schools», *Sci Rep*, vol. 13, n.º 1, p. 1374, ene. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-28377-7.
- [59] aBanza Empresas, «Política de Reciclaje y Gestión de Residuos», 2022. Accedido: 29 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.abanzaempresas.com/wp-content/uploads/2022/03/Poli%CC%81tica-de-reciclaje-y-gestio%CC%81n-de-residuos.pdf>
- [60] Agència de Residus de Catalunya, «La reutilización del vidrio», sep. 2009. Accedido: 29 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/recollida_selectiva/residus_municipals/vidre/la_reutilitzacio_del_vidre/
- [61] Retorna, «Nuestra propuesta: el Sistema de Retorno de envases», oct. 2012.
- [62] M. Obispo Alonso, «Estudio de la rentabilidad de la reutilización de paneles solares en pequeñas plantas fotovoltaicas», Pregrado, Universidad de Valladolid, Valladolid, 2021. Accedido: 10 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/48999>
- [63] J. P. Romero Campos, «Análisis ciclo vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos», Pregrado, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2019.
- [64] M. González Cano, «Estudio económico de la reutilización de paneles solares en pequeñas instalaciones fotovoltaicas», Pregrado, Universidad de Valladolid, Valladolid, 2020.
- [65] J. Insa, «Placas solares baratas – 8 fallos críticos», feb. 2018. Accedido: 11 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.monsolar.com/blog/placas-solares-baratas-8-fallos-criticos/>
- [66] A. Ranero Mata, «Estudio de viabilidad de un sello de calidad para paneles fotovoltaicos de segundo uso», Pregrado, Universidad de Valladolid, Valladolid, 2021. Accedido: 11 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/47284>

- [67] Clever Solar Devices, «Por qué son tan importantes las Curvas IV», nov. 2020. Accedido: 11 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.cleversd.com/es/blog/que-son-tan-importantes-curvas-iv>
- [68] United Nations Environment Programme, *a catalyst for delivering the Sustainable Development Goals Towards Zero Waste: ii Towards Zero Waste: a catalyst for delivering the Sustainable Development Goals*. 2023.
- [69] Global Footprint Network, «Global Footprint Network ».
- [70] «30032023-infografia_ODS».
- [71] UN Stats, «Ensure sustainable consumption and production patterns».
- [72] DNP, «RESPONSIBLE CONSUMPTION AND PRODUCTION».
- [73] El Colombiano, «El lado oscuro de la energía solar, ¿qué pasará con la ola de desechos de paneles solares que se viene?»
- [74] M. S. Chowdhury *et al.*, «An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling», *Energy Strategy Reviews*, vol. 27. Elsevier Ltd, 1 de enero de 2020. doi: 10.1016/j.esr.2019.100431.
- [75] V. Savvilotidou, A. Antoniou, y E. Gidakos, «Toxicity assessment and feasible recycling process for amorphous silicon and CIS waste photovoltaic panels», *Waste Management*, vol. 59, pp. 394-402, ene. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2016.10.003.
- [76] P. Dias, S. Javimczik, M. Benevit, H. Veit, y A. M. Bernardes, «Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules», *Waste Management*, vol. 57, pp. 220-225, nov. 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.03.016.
- [77] C. E. L. Latunussa, F. Ardente, G. A. Blengini, y L. Mancini, «Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels», *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 156, pp. 101-111, nov. 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.03.020.
- [78] D. Sica, O. Malandrino, S. Supino, M. Testa, y M. C. Lucchetti, «Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82. Elsevier Ltd, pp. 2934-2945, 1 de febrero de 2018. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.039.
- [79] M. S. Chowdhury *et al.*, «An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling», *Energy Strategy Reviews*, vol. 27. Elsevier Ltd, 1 de enero de 2020. doi: 10.1016/j.esr.2019.100431.

- [80] Y. Xu, J. Li, Q. Tan, A. L. Peters, y C. Yang, «Global status of recycling waste solar panels: A review», *Waste Management*, vol. 75. Elsevier Ltd, pp. 450-458, 1 de mayo de 2018. doi: 10.1016/j.wasman.2018.01.036.
- [81] W. Berger, F.-G. Simon, K. Weimann, y E. A. Alsema, «A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules», *Resour Conserv Recycl*, vol. 54, n.º 10, pp. 711-718, ago. 2010, doi: 10.1016/j.resconrec.2009.12.001.
- [82] W. Berger, G. Sapich, y K. Weimann, «RESOLVED (Recovery of Solar Valuable Materials, Enrichment and Decontamination), Technical Final Report LIFE04», 2008.
- [83] B. Seo, J. Y. Kim, y J. Chung, «Overview of global status and challenges for end-of-life crystalline silicon photovoltaic panels: A focus on environmental impacts», *Waste Management*, vol. 128, pp. 45-54, jun. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.04.045.
- [84] X. Wang, X. Tian, X. Chen, L. Ren, y C. Geng, «A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology», *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 248. Elsevier B.V., 1 de diciembre de 2022. doi: 10.1016/j.solmat.2022.111976.
- [85] Y. Yu *et al.*, «Review of silicon recovery in the photovoltaic industry», *Curr Opin Green Sustain Chem*, vol. 44, p. 100870, dic. 2023, doi: 10.1016/j.cogsc.2023.100870.
- [86] Lito S.A.S, «Lito». [En línea]. Disponible en: <https://lito.com.co/nosotros/>