



**Estudio y viabilidad del potencial energético solar en las zonas rurales de  
Barrancabermeja, para el desarrollo de fuentes de generación eléctrica fotovoltaica**

**Christian Fabian Altahona Piñeres**

Código: 21131216168

**Universidad Antonio Nariño**

**Programa Ingeniería Mecánica**

**Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica**

**Bucaramanga, Colombia**

**2023**

**Estudio y viabilidad del potencial energético solar en las zonas rurales de  
Barrancabermeja, para el desarrollo de fuentes de generación eléctrica fotovoltaica**

**Christian Fabian Altahona Piñeres**

Código: 21131216168

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

**Ingeniero Electromecánico**

Director (a):

(Ingeniero, Licenciado, Especialista en TIC) Juan Manuel Murcia Pacheco

Línea de Investigación:

Energías limpias y renovables

**Universidad Antonio Nariño**

**Programa Ingeniería Mecánica**

**Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica**

**Bucaramanga, Colombia**

**2023**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

Estudio y viabilidad del potencial  
energético solar en las zonas rurales de  
Barrancabermeja, para el desarrollo de  
fuentes de generación eléctrica  
fotovoltaica

Cumple con los requisitos para optar

Al título de Ingeniero

Electromecánico

---

Firma del Tutor

---

Firma Jurado

---

Firma Jurado

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Resumen .....	11
Abstract .....	12
Introducción .....	12
1 Planteamiento del problema .....	15
1.1 Formulación del problema .....	16
2 Objetivos .....	17
2.1 General .....	17
2.2 Específicos .....	17
3 Justificación y alcance .....	18
4 Antecedentes .....	20
5 Marco teórico .....	27
6 Metodología .....	33
6.1 Tipo de investigación .....	33
6.2 Diseño de la investigación .....	33
7 Potencial de la oferta energética solar de las zonas rurales de Barrancabermeja a partir de la revisión documental del tema .....	36
8 Cubrimiento de la demanda energética a partir del uso de la energía solar, tomando en cuenta el incremento del uso energético de la zona .....	62
9 Estrategias para el sistema energético a partir del desarrollo de energía sustentable (solar)	66
10 Evaluación del proyecto por una empresa generadora de energía fotovoltaica (paneles solares).....	73

11 Conclusiones .....	79
Referencias Bibliográficas .....	82

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Distribución nodal de Santander .....	38
Figura 2 Distribución nodal de Santander aplicando el Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia .....	38
Figura 3 Irradiación según nodo y base de datos .....	40
Figura 4 Radiación por unidad de área en Colombia.....	41
Figura 5 Radiación diaria de Barrancabermeja.....	42
Figura 6 Índice de claridad de la insolación .....	43
Figura 7 Proporción de albedo (2014 – 2021) .....	44
Figura 8 Proporción de radiación directa ascendente de onda corta en el área estudiada .....	45
Figura 9 Proporción de radiación descendente de onda corta en la zona estudiada (2014 – 2021) .....	46

**Lista de tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Radiación promedio según plataforma utilizada .....	40
Tabla 2 Ubicación geográfica de Barrancabermeja .....	43
Tabla 3 Zona rural de Barrancabermeja (seis ubicaciones) .....	54
Tabla 4 Indicadores solares zona rural de Barrancabermeja, Santander, Colombia.....	60
Tabla 5 Estudios sistemas energéticos a partir de energía sustentable .....	66
Tabla 6 Resumen estudios adelantados en materia de producción de energía sustentable.....	70
Tabla 7 Formato evaluación del estudio que se llevó a cabo.....	76

### Lista de ecuaciones

Ecuación 1 Cálculo de factor de excentricidad.....	48
Ecuación 2 Ángulo de declinación solar.....	48
Ecuación 3 Ángulo de la salida del sol sobre el plano horizontal $W_s$ .....	48
Ecuación 4 Ángulo de salida del sol sobre el plano inclinado $W_{ss}$ .....	49
Ecuación 5 Radiación sobre el plano horizontal $H_{dm}$ .....	50
Ecuación 6 Índice de claridad $K_{tm}$ .....	50
Ecuación 7 Fracción de radiación difusa $F_{Dm}$ .....	50
Ecuación 8 Radiación difusa en el plano horizontal $D_{dm}$ .....	50
Ecuación 9 Radiación solar directa sobre el plano inclinado .....	51
Ecuación 10 Factor de corrección (K) .....	51
Ecuación 11 Radiación directa sobre el panel inclinado $H_{dp}$ .....	52
Ecuación 12 Radiación total sobre el plano inclinado $G_{Hdm}$ .....	53
Ecuación 13 Relación albedo sobre el panel inclinado $AL$ .....	53
Ecuación 14 Radiación total sobre el panel inclinado $G_{tpi}$ .....	54
Ecuación 15 Horas pico solares $HSP_{(h)}$ .....	54



### **Dedicatoria**

*Se menciona que lo mejor que podemos heredar de nuestros padres es la educación, sin embargo, estoy convencido que no es el único legado por el cual deba estar agradecido, ya que mis padres me han guiado para trazar mi propio camino y recórrelo con mis propias fuerzas, son ellos mi guía y modelo en la vida y es por esto que dedico esta tesis de grado a ellos.*

*Gracias a mi madre Brígida Piñeres y a mi padre Marcos Altahona por siempre estar en los momentos más cruciales de mi vida.*

### **Agradecimientos**

Esta nota de agradecimiento está dirigida en primera medida a Dios quien ha sido mi mayor fortaleza espiritual para este largo camino de enseñanza y aprendizaje, a mis padres, que siempre son el apoyo moral y espiritual necesario para continuar cuando las dificultades se han presentado, a mi familia que estuvo en los momentos más duros, tienen mi agradecimiento eterno por velar por mis sueños y por último y no menos importante agradezco enormemente al Ingeniero Juan Manuel Murcia quien ha sido la guía y soporte intelectual en este proceso de investigación, sin todos ellos esto no hubiese podido ser posible. Gracias por su esfuerzo, paciencia, y consideración.

## Resumen

El propósito de este proyecto de grado es poder determinar la capacidad de aprovechamiento energético solar de la ciudad de Barrancabermeja y sus zonas rurales.

Mediante la investigación y la evaluación de la actuación de la incidencia del sol en la ciudad y sus zonas aledañas, se podrá indicar las mejores opciones que permitan abrir un panorama de posibilidades en la región, de esta manera, se puede estructurar y ajustar el escenario de desenvolvimiento que permitirá conseguir un desarrollo efectivo de esta fuente de energía limpia, apalancando así el uso e implementación de energías renovables, que tienen el potencial de brindar soluciones a las necesidades energéticas y que sirven como herramientas con el objetivo de disminuir el efecto que se genera en el entorno natural, así como la dependencia de los combustibles fósiles.

**Palabras clave:** Potencial energético solar, aprovechamiento de energías renovables, generación de energía eléctrica, Barrancabermeja.

## **Abstract**

The purpose of this degree project is to be able to determine the capacity of solar energy use of the city of Barrancabermeja and its rural areas.

Through research and evaluation of the performance of the incidence of the sun in the city and its surrounding areas, it will be possible to indicate the best options that allow opening a panorama of possibilities in the region, in this way, the scenario can be structured and adjusted. of development that will make it possible to achieve an effective development of this source of clean energy, thus leveraging the use and implementation of renewable energies, which have the potential to provide solutions to energy needs and that serve as tools with the aim of reducing the effect that is generated in the natural environment, as well as the dependence on fossil fuels.

**Keywords:** Solar energy potential, use of renewable energy, electricity generation, Barrancabermeja.

## Introducción

La utilización de fuentes de energía alternativas a nivel global está adquiriendo mayor relevancia, considerando que la sobreexplotación de los recursos naturales y los cambios climáticos han impulsado la adopción de métodos de generación de energía novedosos.

“La última década no solo ha sido testigo de un gran cambio en la matriz energética, con la electricidad ganando un lugar y un papel más destacado, sino que se ha visto que la electricidad proviene cada vez más de energías renovables cuya proporción se prevé que alcance el 50% en 2030; por lo que, la integración de la energía fotovoltaica no puede considerarse exitosa sin que tal suministro de electricidad sea sostenible y seguro” (Zsiborács et al., 2021).

“Para hacer frente al conocido desafío de la transición energética, un cambio rápido de los combustibles fósiles a la explotación más amplia de estos recursos, se necesitan fuentes de energía renovables; la energía solar representa el recurso más abundante y fácilmente disponible entre las fuentes de energía renovables. Este documento de visión tiene como objetivo arrojar luz sobre el conocimiento actual y caminos emergentes para la utilización de la energía solar. Concretamente, tras una introducción general y una breve reseña del conocimiento actual, se discuten cuestiones abiertas con respecto a los colectores fotovoltaicos/térmicos (PV/T), la construcción sistemas integrados fotovoltaicos/térmicos (BIPV/T), plantas termosolares de concentración, termoquímica solar, destilación de agua impulsada por energía solar y tecnologías de almacenamiento de energía solar térmica. Posteriormente, este artículo define los desafíos claves fundamentales que deben abordarse para que estas tecnologías desempeñen un papel importante en futuros sistemas energéticos sostenibles. Los desafíos identificados incluyen el desarrollo de nuevos materiales,

rendimiento mejorado, instalación acelerada del sistema y procesos de fabricación mejorados, combinando energía solar con otros sistemas de producción y almacenamiento de energía limpia, e integrando la utilización de la energía solar con la energía local patrones de utilización” (Li et al., 2022)

## 1 Planteamiento del problema

La electrificación rural y urbana es un desafío constante en todo el mundo y Colombia no es una excepción. En el caso particular de Barrancabermeja, una ciudad ubicada en la región oriental, lugar donde se ubica la principal instalación de procesamiento de petróleo del país, posee un gran número de poblaciones rurales que no poseen una provisión constante y eficiente de energía eléctrica. Sumado a esto, el incremento demográfico de población urbana y rural ha evidenciado la falta de cobertura en el suministro eléctrico, por tanto, no se satisface la demanda energética de estas zonas. La falta de suministro eléctrico ha llevado a la población urbana y rural del sector a usar métodos de generación a base de hidrocarburos para suplir sus necesidades, aumentando de forma exponencial la contaminación del medio ambiente; todo lo cual tiene un impacto significativo en el bienestar de estas comunidades y en su progreso tanto económico como social.

Además, la falta de conciencia acerca de las opciones que facilitan el avance de nuevas fuentes de energía eléctrica renovable se convierte en un obstáculo para la realización de proyectos de esta índole. En consecuencia, no se logra obtener una perspectiva de autosuficiencia en la generación de energía ni se promueve la responsabilidad en el cuidado del medio ambiente.

Dentro de este contexto, la energía solar fotovoltaica surge como una alternativa promisoría para afrontar el desafío de la falta de acceso a la electricidad en las áreas urbanas y rurales de Barrancabermeja. La energía solar es una fuente renovable y limpia que puede ser instalada de manera sencilla y con un mantenimiento accesible, incluso en ubicaciones remotas y de difícil acceso. Esto la convierte en una opción atractiva para las comunidades rurales.

Sin embargo, el estudio realizado no se enfocó en analizar la viabilidad de implementar un proyecto de desarrollo energético de esta naturaleza. En realidad, se centra en la necesidad de

comprender en profundidad el potencial energético solar en las áreas urbanas y rurales de Barrancabermeja, lo cual requiere un estudio exhaustivo debido a diversos factores que pueden afectar la eficacia de esta opción energética. En primer lugar, es necesario determinar la disponibilidad de energía solar en la región, lo cual depende de la cantidad de radiación solar que alcanza la zona y de la ubicación y orientación de los paneles solares. En segundo lugar, se debe evaluar la viabilidad técnica de implementar proyectos de paneles solares en las áreas urbanas y rurales. Por último, se deben explorar los desafíos y barreras socioeconómicas y culturales que podrían obstaculizar la adopción de la energía solar en estas comunidades. Todo esto se debe a la necesidad de desarrollar fuentes de generación eléctrica fotovoltaica como una solución para el problema energético que enfrentan estas poblaciones.

### **1.1 Formulación del problema**

¿Cuál es el potencial energético solar en las zonas urbanas y rurales de Barrancabermeja, y cómo se puede viabilizar el desarrollo de fuentes de generación eléctrica fotovoltaica en este municipio para el 2023?



## 2 Objetivos

### 2.1 General

Analizar el potencial energético solar en las zonas urbanas y rurales de Barrancabermeja, para el desarrollo de fuentes de generación eléctrica fotovoltaica, año 2023.

### 2.2 Específicos

- Identificar el potencial de la oferta energética solar de las zonas rurales de Barrancabermeja a partir de la revisión documental del tema y de los cálculos para determinar la capacidad de generación de energía sustentable.
- Determinar el cubrimiento de la demanda energética, a partir del uso de energía solar, tomando en cuenta el incremento del uso energético de la zona y del análisis de proyectos instalados en la región para determinar su incremento del uso de la energía solar fotovoltaica.
- Establecer estrategias vinculadas al estudio realizado para el sistema energético a partir del desarrollo de energía sustentable solar.
- Presentar la evaluación general de la investigación realizada por una empresa relacionada con la generación o distribución de energía fotovoltaica.

### 3 Justificación y alcance

La tecnología fotovoltaica todavía se encuentra en una etapa de desarrollo, y en la actualidad se están llevando a cabo pruebas con materiales de estructuras y composiciones distintas al silicio, que es la materia prima utilizada en esta tecnología. El objetivo es incrementar considerablemente la eficiencia y reducir los costos de producción.

Hasta ahora, la tecnología solar fotovoltaica a gran y mediana escala no ha tenido un impacto significativo en Colombia. Los sectores que la emplean en menor escala incluyen las telecomunicaciones, los pozos petroleros, los oleoductos y la atención sanitaria en áreas rurales o no interconectadas.

Este comportamiento del mercado de la tecnología solar fotovoltaica en Colombia se debe principalmente a su alto costo de inversión, la falta de conocimiento general sobre ella, la incipiente publicidad y comercialización, y la falta de incentivos claros y efectivos por parte del gobierno nacional en cuanto a energías alternativas que permitan la viabilidad de este tipo de proyectos.

La investigación propuesta tiene como objetivo ofrecer, desde una perspectiva documental y práctica, las estrategias necesarias para el desarrollo de sistemas de energía sustentable en la ciudad de Barrancabermeja. Esta ciudad, ubicada en el oriente colombiano en el departamento de Santander, cuenta con la disponibilidad de energía proveniente del sol. Además, gracias a su cercanía con ciudades capitales y su grado de industrialización, se facilita la adquisición de los componentes necesarios para la implementación de plantas fotovoltaicas.

Por lo que no se contempla el diseño de tal sistema, sino la presentación de estrategias que conduzcan a su desarrollo teniendo en cuenta el potencial energético de la región a la que se hace referencia, y las condiciones climáticas de esta ciudad.

Todo esto se refleja en el objetivo del estudio, que consiste en analizar la disponibilidad de energía proveniente del sol de Barrancabermeja teniendo en cuenta sus características geográficas y las instalaciones disponibles para el desarrollo de energías renovables. El propósito es encontrar una alternativa que contribuya a satisfacer la demanda energética de las áreas rurales no interconectadas. Para llevar a cabo este análisis, se utilizarán registros proporcionados por la NASA en relación con la energía solar.

#### 4 Antecedentes

Estudios llevados a cabo en países como la India, ilustran el auge de este desarrollo de las fuentes de energía sustentable. Tal es el caso del estudio llevado a cabo por Rahul Chandel, Shyam Singh Chandel y Prashant Malik, quienes afirman que los sistemas integrados de energía proveniente de la radiación solar capturada y convertida mediante tecnología fotovoltaica (PV) ubicados en los techos de los edificios contribuyen significativamente a la descentralización de la generación de energía. Se presenta una perspectiva del análisis de como la generación de energía descentralizada para techos mejora la generación de energía y crecimiento de la industria solar en la India, caso particular la implementación de estos sistemas en las cubiertas o techos de las edificaciones (Chandel et al., 2022).

Los autores presentan el proyecto principal de producción de energía eléctrica mediante el uso de tecnología fotovoltaica en la India, que enfrenta una serie de desafíos, incluida la resistencia de empresas distribuidoras de energía; así mismo, se realiza el análisis de la tarifa eléctrica, para sugerir medidas correctivas. La novedad del estudio es que identifica tarifa solar, costo de referencia y patrón de subsidio de energía (Chandel et al., 2022).

En Tanzania, se encontró un estudio que proporciona una metodología estandarizada para evaluar la idoneidad del uso de energía solar fotovoltaica autónoma en sistemas fotovoltaicos para diferentes usos productivos de la energía (PUE) a nivel nacional. El abordaje se hizo en este país, pero la metodología es adecuada para cualquier lugar del mundo con similares condiciones climáticas (Little & Blanchard, 2022).

Evaluar el potencial del uso productivo es un proceso complejo con múltiples partes interesadas y factores de decisión. Por lo que los autores del referido estudio no pretenden ser una respuesta definitiva, sino más bien resaltar las características técnicas y económicas de los usos

productivos potenciales para poder compararlos; siendo, por tanto, un primer paso para evaluar la idoneidad de sistemas fotovoltaicos autónomos para aplicaciones PUE a nivel nacional (Little & Blanchard, 2022).

La energía solar se ha vuelto crucial para brindarle al mundo la oportunidad de reducir la huella de carbono, así como luchar contra las consecuencias del cambio climático. Además, África está a la vanguardia de las regiones afectadas por el cambio climático con una expectativa de empeoramiento de las consecuencias, además de ser una región con diversas complicaciones eléctricas, demandas energéticas y contribuciones a las emisiones de efecto invernadero. Por lo tanto, África no sólo tiene una gran necesidad de adoptar medidas tecnológicas eficientes de energía renovable por sus aparentes preocupaciones futuras, sino que, además, ya se considera una región que tiene un importante la disponibilidad de energía proveniente del sol debido a sus abundantes recursos naturales y renovables (Abdelrazik et al., 2022).

El potencial de la energía solar en África no solo podría ser una solución a muchas de las complicaciones del continente, sino que también podría ayudar a que prospere la economía de esta región. Por otro lado, el potencial de la energía solar en África, así como las técnicas para implementarlo de manera eficiente han despertado mucho interés recientemente; sin embargo, este artículo tiene como objetivo resaltar a través de la revisión documental no solo el potencial y las tecnologías disponibles para su adopción sino también los desafíos que complican la implementación (Abdelrazik et al., 2022).

Así mismo, el estudio presentado por Ayodele et al. (2021), analiza la posibilidad de satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica de la ciudad de Ibadan (una de las ciudades cosmopolitas de Nigeria) utilizando los sistemas fotovoltaicos solares en los techos de la edificación, con el objetivo de determinar la disponibilidad de esta ubicación para el despliegue

fotovoltaico. En primer lugar, el ángulo de inclinación óptimo, así como irradiación solar sobre superficies inclinadas se determinan para la ciudad, a partir de entonces, el área de techo disponible para La posible colocación de techos solares fotovoltaicos se analiza utilizando la técnica del factor de reducción con la ayuda de ArcGIS, Google Earth Imágenes y técnicas de muestreo de población. Algunos de los resultados clave revelan que el área total del techo de la ciudad de Ibadan es de aproximadamente 49,54 km<sup>2</sup>, mientras que el área del techo disponible para la energía fotovoltaica en la azotea El despliegue es de unos 7,54 km<sup>2</sup> con una capacidad máxima de instalación de 1734,8MWp, a un nivel óptimo inclinación fija de 11. Esto podría generar electricidad fotovoltaica de alrededor de 6,67 TWh por año. Este estudio es importante ya que podría servir como información científica de primera mano para agencias gubernamentales, ONG, inversores, investigadores y legisladores para maximizar el potencial de los techos solares fotovoltaicos en Nigeria (Ayodele et al., 2021).

Mahmoud Ouria, en su estudio realizado, se enfocó en la aplicación de la energía solar en áreas urbanas y edificios, tomando como ejemplo la ciudad de Tabriz en Irán. Se tuvieron en cuenta todos los factores geográficos y climáticos para estimar la capacidad de aprovechamiento de energía solar en la ciudad de Tabriz utilizando el modelo angstrom en SPSS. Se realizó una investigación detallada de la disponibilidad de energía proveniente del sol en la Mezquita Azul (BM en inglés) de Tabriz. Se analizó la tasa de irradiación solar para las superficies curvas, horizontales y verticales de la Mezquita Azul en Tabriz utilizando software como Ladybug para Rhino y programas como Microsoft Excel. Los resultados demostraron que, mediante la orientación y geometría adecuadas de los elementos de construcción, es posible aprovechar una cantidad significativa de energía solar incluso en un clima nublado como el de Tabriz. (Ouria, 2019).

Otro aspecto a tener en cuenta en relación a los antecedentes encontrados en esta investigación es el correspondiente al reciclaje de los implementos propios de los sistemas energéticos sostenibles. De tal manera que, con el propósito de alcanzar el séptimo Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS), que busca asegurar el acceso a servicios de energía asequibles, confiables, sostenibles y modernos para todos, numerosas aldeas no conectadas a la red eléctrica han recibido paneles solares como apoyo externo. Sin embargo, estas comunidades rara vez tienen la capacidad de reinversión cuando la batería se deteriora. Este estudio propone reutilizar los paneles solares abandonados como fuente de energía suministro para estaciones de carga de celulares y amplificadores de señal. Los resultados identificaron que, junto con un negocio existente, un tiempo de recuperación de la inversión de cuatro meses se puede lograr bajo un escenario estándar. Además, el final de la vida útil de los paneles solares supone una carga sostenible medioambiental. Se debe considerar el uso que puede aprovechar al máximo la vida útil de la tecnología al donar tecnologías a otros países, con miles de millones de usuarios (Pandyaswargoa et al., 2022).

Estudios como el llevado a cabo por Romero (2019) en Chile mencionan la necesidad de analizar la forma cómo se deben disponer los residuos provenientes de los paneles solares que ya hayan agotado su vida útil, identificando varios métodos de hacerlo para que el impacto ambiental sea mínimo y algunos de sus componentes puedan ser reutilizados en otro tipo de instalación.

Teniendo en cuenta los actuales modelos de diseño de construcción urbana, así como el avance continuo de la urbanización, la preocupación por el impacto del efecto entre edificios en el uso de energía urbana ha ido incrementándose. Por lo que, el estudio realizado por Pengcheng Wang et al. (2021) hace una revisión exhaustiva de la correlación entre el efecto entre edificios y la energía de la construcción y el uso de la energía solar por primera vez, para ciudades con

diferentes climas. Se analiza el impacto de interconstrucción y los efectos sobre el consumo de energía de los edificios, incluida la refrigeración, la calefacción y la iluminación, resumido cuantitativamente. La revisión encontró que el efecto del grado de influencia de la interconstrucción varía mucho con las diferentes zonas climáticas. Así mismo, teniendo en cuenta el efecto entre edificios como guía inicial, el diseño urbano puede reducir en gran medida el consumo de energía de los edificios y aumentar la utilización de la energía solar. Se discuten las limitaciones de la investigación actual, así como recomendaciones generales para el futuro. Trabajo futuro requiere que ingenieros y científicos en la industria de la construcción y más allá trabajen juntos para contribuir al desarrollo sostenible del uso de la energía urbana (Pengcheng et al., 2021)

En el contexto colombiano, país que ha centrado su matriz energética en fuentes tradicionales como la energía hidroeléctrica y los combustibles fósiles, se han implementado sistemas que presentan fragilidades y carecen de eficiencia, a pesar de la abundancia de recursos naturales y el reconocimiento de oportunidades que podrían favorecer la adopción eficiente de energías renovables.

Dentro de esas cualidades favorables, se destaca su amplio potencial en energía solar, el cual se ve influenciado por su ubicación geográfica y, como resultado, el clima que propicia condiciones óptimas de radiación solar para que diversas zonas del país puedan aprovechar y convertir la energía solar mediante tecnologías aplicadas. Esta fuente de energía solar es inagotable y constante.

Durante las últimas décadas, un número creciente de estudios han centraron su atención en el desarrollo de modelos de sistemas energéticos para facilitar estrategias de planificación



energética sostenible y comprender los desafíos técnicos asociados con la integración de fuentes de energía renovables. Sin embargo, estos modelos por lo general requieren una gran cantidad de datos detallados como entradas; por lo que los datos presentados en este artículo proporcionan insumos clave y modelos supuestos adoptados en el trabajo de investigación titulado “Large scale” (a gran escala) integración de fuentes de energía renovables (RES) en el futuro sistema energético colombiano”. Este conjunto de datos puede ser utilizados por los investigadores y formuladores de políticas con el fin de analizar diferentes vías orientado al desarrollo de estrategias bajas en carbono para Colombia y países con sistemas energéticos similares (Pupo-Roncallo et al., 2020)

Por otro lado, proporcionar energía limpia y asequible para todos es una prioridad mundial, especialmente para las regiones sin conexión a la red y de bajos ingresos. Los nuevos modelos de negocio, como Pay-as-you-go (PAYG), han sido una estrategia para proporcionar electricidad sostenible en regiones sin conexión a la red, especialmente en países africanos. Sin embargo, existe la necesidad de herramientas de análisis, de modo que se pueda probar por adelantado que el potencial de este esquema varía según el contexto local; por lo que se propone el uso de dinámicas de sistemas para la evaluación de políticas energéticas. El método se prueba mediante un estudio del caso colombiano. La aplicación de la metodología muestra simulaciones que indican que el efecto de PAYG es limitado en las condiciones actuales del mercado de las regiones colombianas sin conexión a la red, considerando que las empresas solares obtienen la mayor parte de sus ingresos directamente del subsidio del gobierno. Se obtienen mejores resultados al implementar PAYG en un escenario de menor subsidio, que indica el potencial para optimizar la asignación de subsidios (Montoya-Duque et al., 2022)

En este orden de ideas, el trabajo realizado por Ospina Mataute et al. (2022), demostró la

utilización de la energía solar que incide sobre superficies verticales en la implementación de sistemas fotovoltaicos integrados (BIPV) como una oportunidad para contribuir a lograr un consumo energético sostenible en edificios en espacios urbanos. Los resultados muestran la necesidad de posicionar los diseños de superficies verticales en un rango de ángulos azimutales dada la variabilidad de energía para cada ciudad, tanto en horario matutino como vespertino y a lo largo de los años. Además, se analiza el potencial de la generación de energía de las superficies verticales con respecto a un panel horizontal considerando el máximo radiante energía recibida, encontrando que una sola superficie vertical puede recibir un 17% menos de energía radiante que un panel horizontal, pero al considerar un par orientado según los ángulos óptimos, se puede exceder hasta en un 60% (Ospina-Metaute et al., 2022)

Los estudios realizados en diferentes países destacan el crecimiento de las fuentes de energía sustentable, como la energía solar fotovoltaica. Se han analizado casos de generación descentralizada de energía a través de sistemas integrados en los techos de edificios, lo cual contribuye al desarrollo de la industria solar. También se ha evaluado el potencial de la energía solar en diferentes regiones, como India, Tanzania, África y Colombia, resaltando su importancia para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y enfrentar los desafíos del cambio climático. Además, se han investigado aspectos como la disposición de residuos de paneles solares, el impacto del efecto entre edificios en el consumo de energía y el uso de tecnologías como el Pay-as-you-go en regiones sin conexión a la red. Estos estudios brindan información relevante para la planificación energética sostenible y el desarrollo de estrategias bajas en carbono.

## 5 Marco teórico

Para el desarrollo del tema referente al estudio y viabilidad del potencial energético solar en las zonas rurales de Barrancabermeja, se deben tomar en cuenta diversos aspectos teóricos, tales como:

Energía solar fotovoltaica: se debe comprender el funcionamiento de los paneles solares y cómo convierten la energía solar en electricidad. Además, se deben conocer los diferentes tipos de paneles solares, su eficiencia y su costo.

El estudio desarrollado por Rueda Tovar (2020), permite identificar aspectos básicos de este concepto:

La radiación solar tiene diferentes usos para las actividades humanas, entre los cuales está, pero no se limita a la capacidad de ser transformada en corriente eléctrica para su aplicación doméstica e industrial. El principio físico que la rige es el efecto fotoeléctrico, gracias al cual determinados materiales poseen la capacidad de absorber haces de fotones, liberando electrones y generando una corriente eléctrica (Pineda, 2020). Si bien existen otros fenómenos naturales involucrados, como el efecto Compton y la producción de pares, hay tres fundamentos que permiten entender las bases de este fenómeno, de manera general estos son: 1. Generación de carga: excitación de los electrones, 2. Separación de la carga y 3. Colección de carga: depósito de la energía de los electrones en una carga externa (Zelaya Aguilar, 2015).

Radiación solar: es importante tener un conocimiento detallado sobre la cantidad de radiación solar que llega a la región, la variación diaria y estacional, la influencia del clima y la topografía, entre otros aspectos.

La energía radiante del sol, la cual es emitida a través del espacio interplanetario del mismo, es conocida como radiación solar. Esta situación se genera debido a que en el interior de

la estrella se producen diversas reacciones químicas, además de pequeñas fusiones atómicas, que logran convertir la masa de esta estrella en energía. Esta viaja en forma de ondas electromagnéticas (radiación), a una velocidad promedio de 299.792 Km/s, a la cual se desplazan todas las ondas en el vacío, hasta llegar a la tierra (Rueda Tovar, 2020, p. 45).

Por otro lado, se tiene la radiación solar emitida hacia el espacio cada segundo y es de  $5.6 \times 10^{35}$  GeV, en forma de partículas cargadas de alta energía y radiación electromagnética; en el espacio exterior, se registra un total de  $1,73 \times 10^{14}$  kW de radiación solar, lo que equivale a 1.353 kW/m<sup>2</sup> y se conoce como la constante solar. Este valor puede variar aproximadamente en un  $\pm 3\%$  debido a la distancia entre la Tierra y el sol a lo largo del año. De toda esta radiación solar, solo el 47% llega o incide en la superficie terrestre, y de esta cantidad, solo el 31% llega directamente, mientras que el restante 16% se ve obstaculizado por elementos en la atmósfera, como polvo, vapor de agua o átomos de agua, y llega de forma imprecisa (Bautista, 2015).

La constante solar es la cantidad de energía solar por unidad de tiempo y área que incide en una superficie perpendicular a la dirección de la radiación solar en el límite exterior de la atmósfera. Mediante el uso de satélites ubicados en esta región atmosférica, se ha determinado su influencia en el paso de la radiación solar y se ha establecido un valor estándar conocido como constante solar (IO), con una irradiancia normal de 1353 W/m<sup>2</sup> (Dávila Matute y García Mojica, 2020).

En el contexto de los paneles solares, estos están compuestos por células fotovoltaicas, que son unidades formadas por materiales semiconductores capaces de generar una corriente eléctrica a través del efecto fotovoltaico al unir las regiones N y P. Estos materiales exhiben propiedades conductoras o aislantes dependiendo de factores como la temperatura y la energía aplicada. Los materiales más utilizados incluyen el arseniuro de galio, el telurio de cadmio y el

silicio, siendo este último el más conocido y utilizado debido a sus propiedades covalentes al tener 14 electrones, 4 de los cuales se encuentran en su capa de valencia (Dávila Matute y García Mojica, 2020).

El proceso de interconexión de células solares en un módulo fotovoltaico y la relación entre la tensión, intensidad y potencia generada por el módulo, están dadas, en primer lugar, porque las células solares están interconectadas eléctricamente entre sí para formar el módulo fotovoltaico. Todas estas células son idénticas y operan bajo las mismas condiciones de irradiación y temperatura.

A continuación, se establece la relación entre la tensión, intensidad y potencia generada por el módulo fotovoltaico. Se utiliza la notación  $U_M$  para representar la tensión del módulo en voltios (V),  $U_C$  para representar el voltaje eléctrico generado por la célula cuando está expuesta a la radiación solar ( $v$ ) y  $N_S$  para representar la cantidad de células solares agrupadas en serie.

La relación establece que la tensión del módulo  $U_M$  es igual al producto del número de células en serie  $N_S$  y la tensión de una célula solar  $U_C$ . En términos simples, la tensión del módulo se obtiene al multiplicar la tensión de una célula solar individual por el número de células solares conectadas en serie.

De tal manera que, los módulos fotovoltaicos se forman mediante la interconexión de células solares y establece una relación entre la tensión del módulo y la tensión de una célula solar, teniendo en cuenta el número de células solares conectadas en serie (Castejón, 2010, como lo citó Dávila y García, 2020, p. 34).

Las celdas o células fotovoltaicas se clasifican de acuerdo con el material semiconductor que la conforme, entre los que se tiene, como ya se mencionó, el silicio en sus diferentes formas de presentación, por lo que la clasificación se hace de acuerdo con si son cristalinos,

policristalinos y amorfos.

Estas celdas o células producen un efecto fotovoltaico, que se origina en las características del elemento semiconductor que la conforma.

Los módulos fotovoltaicos están formados por varias células fotovoltaicas conectadas en serie, generalmente entre 36 y 96 células. En ocasiones, se pueden conectar grupos de células en serie y luego conectar estos grupos en paralelo.

Los módulos fotovoltaicos están compuestos por una cubierta de vidrio templado con un espesor de 3 a 4 mm. Este vidrio tiene una excelente capacidad de transmitir la radiación solar y brinda protección contra condiciones atmosféricas adversas y posibles impactos, como granizo o vandalismo. La superficie exterior del vidrio es antirreflejante y está tratada para evitar la acumulación de polvo y suciedad. Por otro lado, la superficie interior suele ser rugosa, lo que favorece la adherencia con el encapsulante de las células solares y permite una mejor penetración de la radiación solar (Castejón, 2010, como lo citó Dávila y García, 2020, p. 38).

La cubierta posterior de los módulos se realiza utilizando una capa de polivinilo fluoruro (PVF, conocido comercialmente como TEDLAR) (Castejón, 2010) o poliéster. Esta capa, junto con la cubierta frontal, protege al módulo contra la humedad y otros elementos atmosféricos, al tiempo que proporciona aislamiento eléctrico.

La cubierta del módulo solar proporciona estabilidad y resistencia mecánica, además de funcionar como sistema de sujeción. También puede tener una conexión para la toma de tierra. Es crucial tener en cuenta que no se debe realizar ningún tipo de mecanizado en la cubierta, ya que las vibraciones podrían causar daños al cristal frontal de la cubierta (Castejón, 2010, como lo citó Dávila y García, 2020, p. 39).

El marco de los módulos está fabricado con aluminio anodizado, que brinda dureza y

firmeza mecánica al panel, además de servir como sistema de sujeción. El marco también incluye un enlace para la conexión a tierra.

El convertidor es otro componente del módulo solar que tiene la función de ajustar la tensión y las características de la corriente recibida para adaptarlas al uso requerido (suministro). Hay diferentes tipos de convertidores, como los de corriente continua a corriente continua (cc/cc), corriente alterna a corriente continua (ca/cc), corriente alterna a corriente alterna (ac/ac) y corriente continua a corriente alterna (cc/ca) (Ramos, 2007, citado por Dávila y García, 2020, p. 39). El convertidor más comúnmente utilizado en instalaciones fotovoltaicas aisladas es el tipo cc/ca, que convierte la tensión de la batería a una corriente alterna de 230 voltios para los consumos.

Por último, se tiene el regulador de carga, cuya función es controlar los procesos de carga y descarga de la batería. Sus principales tareas son evitar la sobrecarga de la batería, asegurándose de que no continúe cargando una vez alcanzado el máximo nivel de carga (100% EDC). Esto impide la reproducción de vapores y la disminución del líquido en el acumulador, lo que a su vez prolonga la vida útil del mismo. También impide la descarga excesiva de la batería en períodos de baja radiación solar, evitando que la batería se descargue por completo.

Teniendo esto en cuenta, es necesario que, para el diseño y ubicación de un sistema de producción de energía solar fotovoltaica, se tomen en consideración los elementos mencionados además del diseño y la ubicación de los sistemas fotovoltaicos, que incluyen la orientación de los paneles solares, la distancia entre los paneles, la altura de los paneles y la ubicación del sistema de almacenamiento de energía.

Costos y beneficios del proyecto a desarrollar: antes de iniciar cualquier tipo de intervención en la región, es necesario que se evalúen los costos de instalación y mantenimiento

de los sistemas fotovoltaicos, incluyendo los costos de los paneles solares, los sistemas de almacenamiento de energía y los costos de mano de obra. Además, se deben examinar las ventajas que a nivel económico y del medio ambiente posee la energía solar fotovoltaica.

**Políticas y regulaciones:** es importante conocer las políticas y regulaciones que rigen la implementación de sistemas fotovoltaicos en Colombia, incluyendo los incentivos fiscales y las regulaciones para la conexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica.

**Aspectos socioeconómicos y culturales:** así mismo, se deben considerar los aspectos socioeconómicos y culturales que pueden influir en la adopción de la energía solar fotovoltaica en las zonas rurales de Barrancabermeja, como las actitudes hacia la tecnología, la disposición a invertir en sistemas fotovoltaicos y las barreras culturales y lingüísticas que pueden dificultar la implementación.



## 6 Metodología

### 6.1 Tipo de investigación

La metodología implementada fue del tipo revisión sistemática documental, definida como una revisión exhaustiva de la evidencia científica basada en un protocolo, generalmente diseñada para responder una pregunta de investigación específica.

### 6.2 Diseño de la investigación

Fase I. Búsqueda del material documental. Se realizó la búsqueda exhaustiva de documentos académicos en bases de datos indexadas como Scopus, IDEE, Dialnet, entre otras, a partir de las palabras claves o descriptores, lo que permitió el hallazgo de 43 archivos, los cuales fueron revisados y analizados, quedando 24 de ellos, y otros que surgen de las variables emergentes en el estudio, como la de los proyectos que se han venido implementado en el país, específicamente en la zona de estudio, que revelan no solo la capacidad energética de Colombia, para este tipo de energía sostenible, sino el interés de la empresa pública y privada ante este desafío contemplado en los objetivos de desarrollo sostenible para el 2023.

Igualmente, se procedió a calcular los diferentes índices de la energía solar fotovoltaica a partir de la información suministrada por la página de la NASA, en relación con seis localidades o ubicaciones (corregimientos) que conforman la zona rural aledaña a la ciudad de Barrancabermeja, Santander, Colombia.

Dichas localidades o ubicaciones son:

- Corregimiento El Llanito Barrancabermeja, Colombia, latitud: 7.155534 | longitud: -73.761001
- Corregimiento Meseta de San Rafael Barrancabermeja, Colombia, latitud:

7.144001359819174 | longitud: -73.58469104708242

- Corregimiento La Fortuna Barrancabermeja, Colombia, latitud: 7.137617717999743 | longitud: -73.47609258637472
- Corregimiento El Centro Barrancabermeja, Colombia, latitud: 6.940615097399172 | longitud: -73.761085503535
- Corregimiento Ciénaga Del Opón Barrancabermeja, Colombia, latitud: 6.9030451237991555 | longitud: -73.89898804139008
- Corregimiento San Rafael De Chucuri Barrancabermeja, Colombia, latitud: 6.876108488245267 | longitud: -74.0343187664822

Fase II. Desarrollo de objetivos específicos. Los documentos seleccionados fueron analizados con la finalidad de obtener los datos correspondientes al potencial de la oferta energética de la zona en estudio, así como el cubrimiento de la demanda energética a partir del incremento del uso energético que ha tenido esta región; todo lo cual permitió establecer las estrategias correspondientes a un sistema energético a partir de energía solar fotovoltaica.

Con los datos obtenidos de los cálculos mencionados en la primera fase, se obtuvo la información necesaria para calcular el potencial energético de la zona rural de Barrancabermeja, con los detalles que cada uno de los índices permite determinar para conocer a cabalidad cuál es potencial de esta zona.

Así mismo, se revisaron proyectos que involucran la generación de energía mediante paneles solares que se han venido desarrollando en la región geográfica conformada por los seis corregimientos, para identificar la demanda de energía de la zona, así como el valor correspondiente al desarrollo de este tipo de proyectos (con base a los proyectos revisados) y el valor actual de la unidad de energía para los usuarios de estas localidades, lo que conlleva al

conocimiento del ahorro en dinero que se podría tener de ser implementado este tipo de proyectos en la región.

De igual manera, se procedió a ubicar una empresa que ha llevado a cabo proyectos de esta naturaleza en otras partes del mundo, para que evaluara la posibilidad de implementar este tipo de proyectos en la zona analizada.

Fase III. Elaboración informe final del proyecto. Posteriormente, con los documentos obtenidos se pudo dar respuesta a cada uno de los objetivos propuestos, tomando en cuenta que son estudios ya desarrollados, en los que la especificidad de la zona o el tiempo exacto representó una limitante para la elaboración del informe final.

Fase IV. Evaluación por entidad externa al estudio. Se procedió a contactar a una empresa relacionada con la producción de energía fotovoltaica en el país, a la cual se le presentó el informe final para su evaluación, de la cual se anexa el reporte correspondiente.

## **7 Potencial de la oferta energética solar como fuente sustentable en las zonas rurales de Barrancabermeja: una revisión documental y cálculos para determinar la capacidad de generación energética**

Uno de los aspectos significativos del desarrollo de las energías renovables es la posibilidad de explorar zonas urbanas y rurales que se encuentran alrededor de grandes y medianas urbes, que podrían ser fuente inagotable de energía para abastecerse a sí mismas y a las ciudades aledañas. Ese el caso que se desea investigar en este apartado, llegar a determinar cuál es la oferta de energía solar presente en las zonas rurales del municipio de Barrancabermeja en el departamento de Santander, que posibiliten la generación de energía sostenible.

Haciendo acopio de una serie de elementos contenidos en estudios previos, es posible obtener la información relevante para este objetivo, por lo que a continuación, se realizará la descripción de los hallazgos en torno a este potencial energético.

Se comenzará por inscribir a Colombia como país productor de energía, altamente dependiente de generación hidráulica; sin embargo, también es productora de gas, petróleo y carbón. Sin embargo, no se ha tomado en cuenta el potencial tan importante que en materia de fuentes renovables posee, ya que tan solo la generación hídrica ha sido aprovechada en las últimas décadas. Ahora bien, otros recursos como la energía solar, la que se denominará en este caso, potencial fotovoltaico, o la energía eólica, no han sido desarrolladas hasta hacer parte de la oferta de energías renovables en el país, ya que “estos recursos constituyen un ejemplo de lo que podría lograrse cuando el capital natural es puesto a jugar un papel catalizador de desarrollo” (Castro Feria y Hernández Moreno, 2010).

La generación de electricidad mediante sistemas fotovoltaicos ha estado tradicionalmente enfocada en áreas rurales, debido a los altos costos de generación derivados principalmente del

precio de los combustibles y los gastos de operación y mantenimiento en zonas remotas. En consecuencia, la generación solar resulta más económica a largo plazo y confiable en estos contextos (Castro y Hernández, 2010).

Colombia cuenta con un notable potencial energético en todo su territorio. La región de La Guajira, por ejemplo, se destaca como una de las zonas con mayor radiación solar, alcanzando los 5,9 kWh/m<sup>2</sup>/día, lo que la convierte en un área con una gran viabilidad para la reproducción de energía proveniente del sol. De manera similar, la costa Caribe presenta un promedio de irradiación solar de 5,4 kWh/m<sup>2</sup>/día. El departamento del Valle del Cauca también cuenta con un alto potencial solar, con un promedio de irradiación solar de aproximadamente 5,2 kWh/m<sup>2</sup>/día. Por último, el departamento de Santander, en el contexto de este estudio, también muestra un alto potencial solar, con un promedio de irradiación solar de alrededor de 5,1 kWh/m<sup>2</sup>/día (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2021).

En cuanto a la zona objeto de estudio, zonas urbanas y rurales del municipio de Barrancabermeja, el grupo investigador se basará en los hallazgos de un estudio realizado por Acebedo y Santamaría, quienes en el año 2017, realizaron una evaluación del potencial solar en el departamento de Santander utilizando diversas herramientas como Meteonorm, PVsyst, la base de datos de Nasa Retscreen y el Mapa Interactivo del IDEAM. Mediante la construcción de una malla y un enfoque nodal, se identificaron los municipios con mayor potencial solar y se analizaron los factores que influyen en el rendimiento de un sistema fotovoltaico. (Acebedo y Santamaria, 2017).

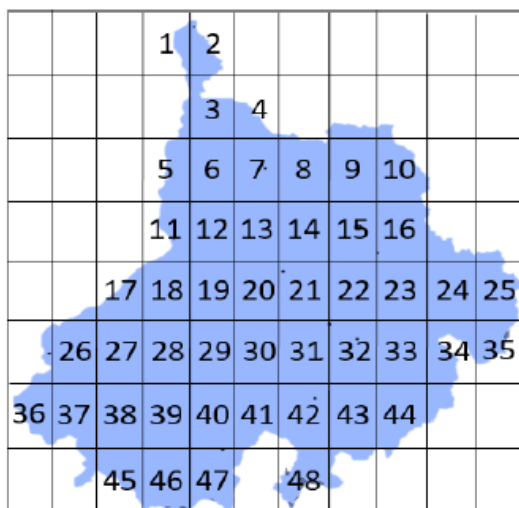
Con el fin de calcular la radiación solar anual, se procedió a identificar las coordenadas geográficas del punto central de cada nodo. A continuación, se realizó una evaluación del potencial solar para dicho punto en cada plataforma, y se utilizó este resultado como una

estimación del potencial solar para el nodo en su totalidad.

La distribución nodal final se muestra en siguiente figura.

### Figura 1

*Distribución nodal de Santander*



*Nota.* La figura representa los valores del potencial por nódulos del departamento de Santander. Tomado de: Acebedo y Santamaria (2017, p. 2).

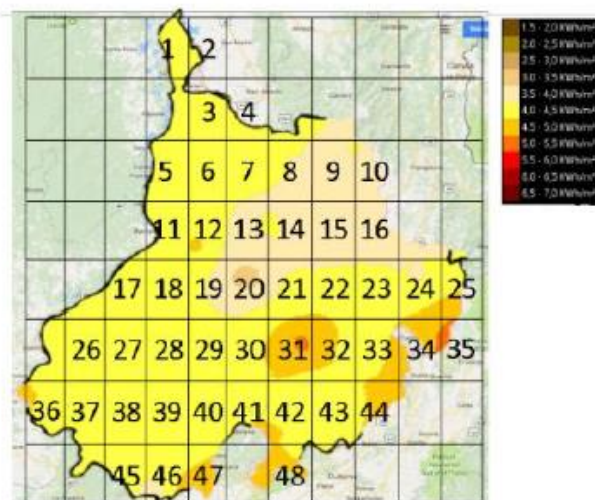
La primera plataforma empleada en este estudio es la base de datos de Nasa Ret Screen, que resulta útil debido a su capacidad para evaluar múltiples ubicaciones en la superficie terrestre. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el tamaño del área asignada a cada nodo en esta plataforma para Colombia es bastante amplio, lo cual puede generar incertidumbre al recopilar datos precisos para puntos específicos (Acebedo y Santamaria, 2017).

La segunda plataforma utilizada es el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia, una herramienta esencial para evaluar la disponibilidad de radiación solar y brillo en todo el territorio colombiano, así como para comprender el comportamiento de la radiación ultravioleta y el ozono. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) construyó este atlas utilizando datos de alrededor de 110 piranómetros instalados en

estaciones automáticas satelitales, lo que garantiza una alta confiabilidad debido a su calibración realizada entre los años 2014 y 2015 (Acebedo y Santamaria, 2017).

## Figura 2

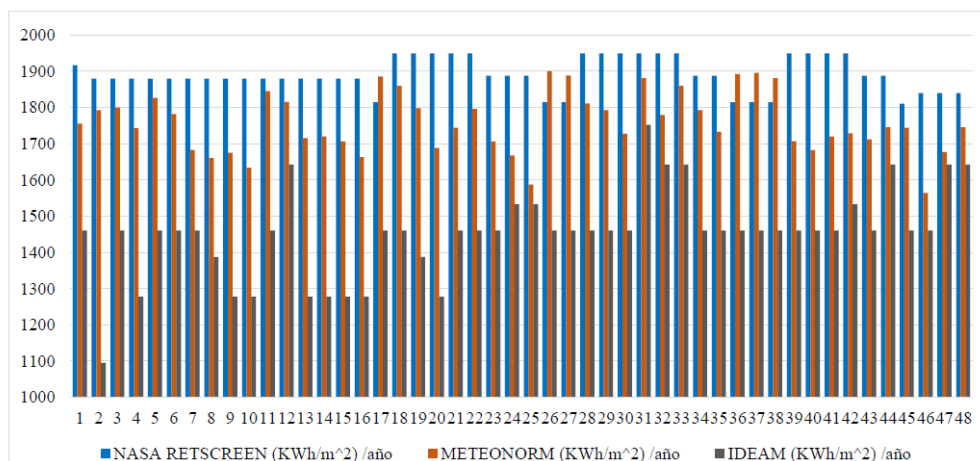
*Distribución nodal de Santander aplicando el Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*



*Nota.* Tomado de: Acebedo y Santamaria (2017, p. 2).

Otra herramienta empleada en el estudio fue Meteonorm 7, un software de referencia meteorológica desarrollado por la empresa suiza Meteotest. Este software contiene datos meteorológicos provenientes de 5 satélites y 8350 estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes regiones del mundo.

Los resultados de la aplicación de las tres plataformas se resumen en la siguiente figura. (Véase Figura 3).

**Figura 3***Irradiación según nodo y base de datos*

*Nota.* Tomado de: Acebedo y Santamaria (2017, p. 2).

**Tabla 1***Radiación promedio según plataforma utilizada*

Plataforma	Radiación promedio en los nodos (KWh/m <sup>2</sup> ) / año
Nasa Ret Screen	1891,08
Meteonorm	1758,375
IDEAM	1452,396

*Nota.* Tomado de: Acebedo y Santamaria, (2017, p. 2).

Se observa que el potencial total más cercano al dato obtenido de la estación meteorológica de la UNAB corresponde a Meteonorm, con una diferencia del 0.7%. Sin embargo, se encontraron discrepancias en los cálculos realizados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Nasa Retscreen para la ciudad, ya que presentan diferencias significativas en sus datos mensuales: el IDEAM subestima el potencial de Bucaramanga en un 11.7%, mientras que Nasa Retscreen lo sobreestima en un 12.3%.

Con base en estos resultados y considerando que Bucaramanga es la capital del departamento estudiado, se consideran los datos obtenidos por Meteonorm como los más adecuados para llevar a cabo el proceso.

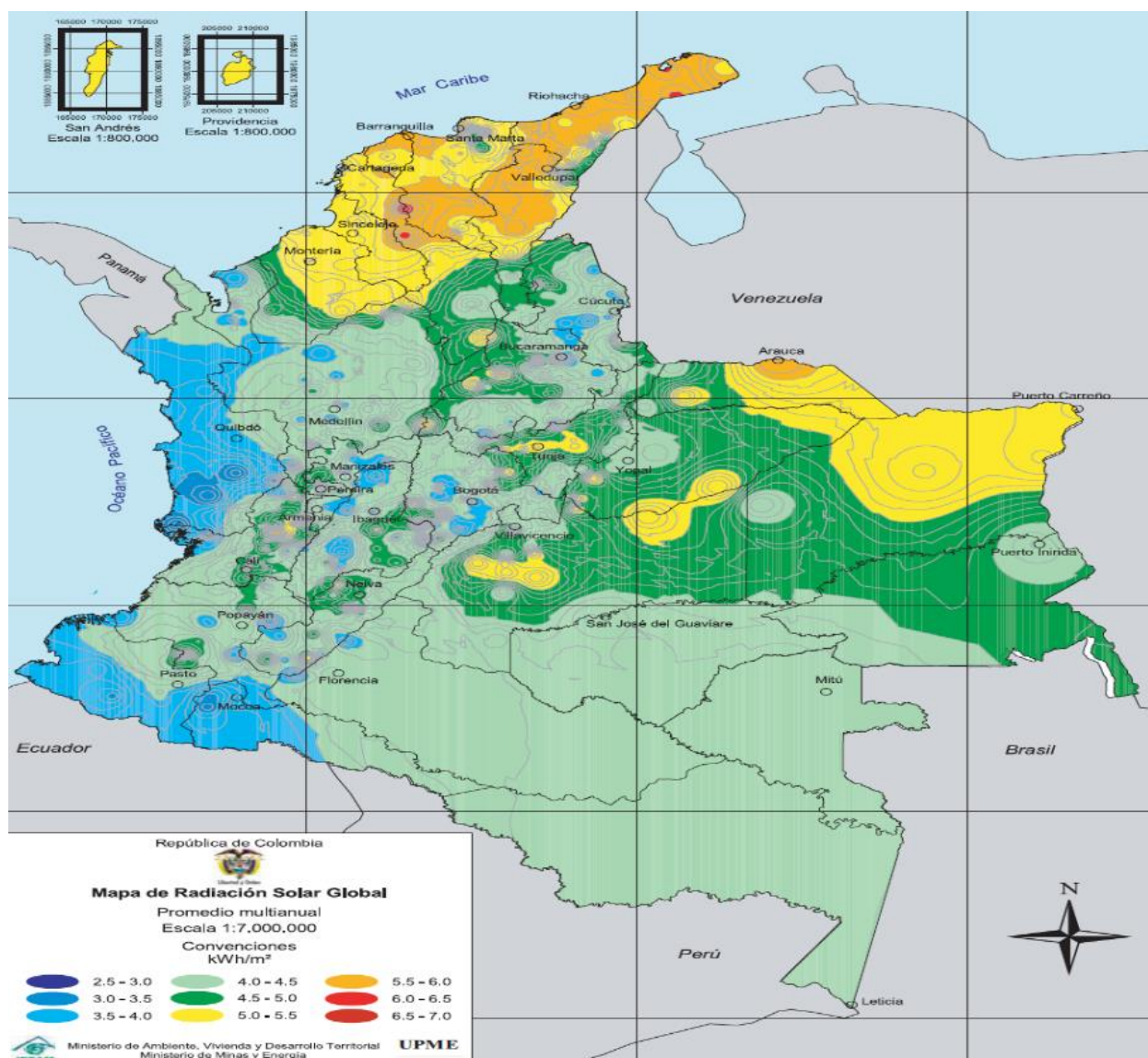


Para responder la inquietud en torno a la capacidad energética de la zona rural de Barrancabermeja, se encontró un estudio que determinó la radiación solar de este municipio, lo cual aporta de manera significativa a esta investigación.

En cuanto al cálculo de la unidad de radiación solar en territorio colombiano, se tiene el aporte del estudio llevado a cabo por Duarte y Gutiérrez (2020), en la figura siguiente.

#### Figura 4

##### *Radiación por unidad de área en Colombia*



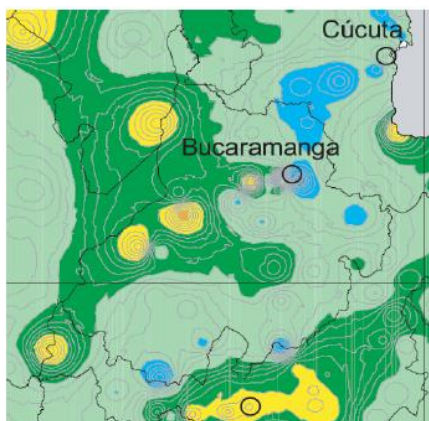
Fuente: Duarte y Gutiérrez (2020, p. 73).

Como se aprecia en la figura anterior, las regiones en Colombia con mayor unidad de radiación solar se encuentran en Arauca, Guajira, Atlántico y Cesar.

El estudio menciona también la radiación diaria de Barrancabermeja, la cual puede verse en la siguiente figura.

### **Figura 5**

#### *Radiación diaria de Barrancabermeja*



Fuente: Duarte y Gutiérrez (2020, p. 73).

En la figura anterior se muestra la ubicación de Barrancabermeja en el mapa, y de acuerdo con la clasificación de la figura 4, la radiación correspondiente al rango 5.0 – 5.5 kWh/m<sup>2</sup>.

El estudio de Rueda Tovar (2020), menciona la conformación de la región analizada, ubicada al noroccidente del departamento de Santander y conformada por Betulia, el Carmen de Chucurí, Puerto Wilches, Sabana de Torres, San Vicente de Chucurí, Zapatoca y Barrancabermeja, se encuentra la provincia de Mares. Barrancabermeja, tomada como la capital de esta provincia, es conocida ampliamente por sus pozos petroleros, ecoturismo y actividades acuáticas como deportes náuticos debido a su ubicación sobre una de las cuencas del río Magdalena (Becerra Sánchez, 2017).

Correspondiente a datos oficiales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

Ambientales (IDEAM), el departamento de Santander se encuentra en una posición en la que surge una generación promedio entre los 4 y los 5 kW-h por metro cuadrado día. (Véase la figura 4).

En esta ciudad, conocida popularmente como la hija del sol, por motivo de su posición geográfica observada en la tabla 2, la radiación solar se encuentra en el promedio de los 4.5 a 5 kWh/m<sup>2</sup>/día, lo que la hace propicia para la generación de energía solar fotovoltaica.

**Tabla 2**

*Ubicación geográfica de Barrancabermeja*

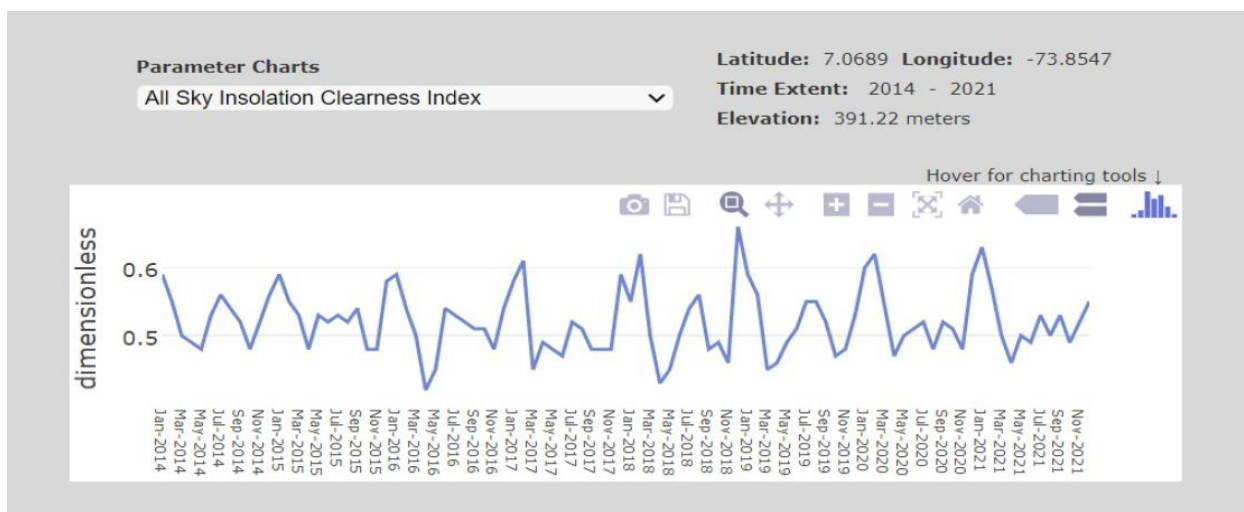
<b>Latitud</b>	°N	7.067
<b>Longitud</b>	°E	-73.847

Fuente: Google map como lo citó Rueda Tovar (2020, p. 46).

De igual manera, se estiman los datos obtenidos a través de la página correspondiente a informes de carácter gratuito de Nasa, que determina información de los años 2014 al 2021 en los gráficos que servirán para fundamentar los hallazgos del estudio.

**Figura 6**

*Índice de claridad de la insolación*



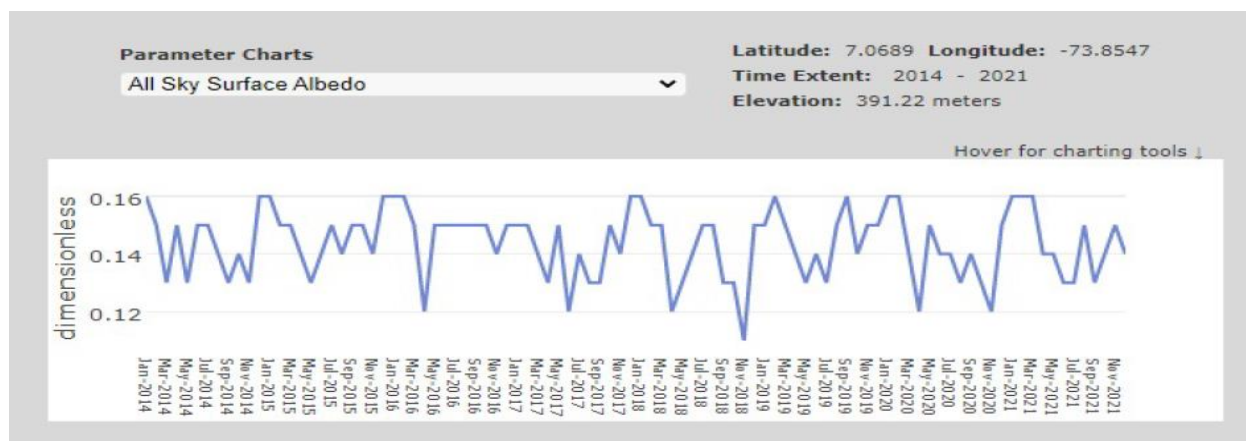
Fuente: (NASA, 2023).

El índice de claridad de insolación de cielo completo es una medida utilizada para evaluar

la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre en un día determinado, en relación con la cantidad máxima de radiación solar posible para ese día y lugar específico. Se calcula utilizando mediciones de radiación solar directa y difusa y se expresa típicamente en una escala de 0 a 1, donde 0 indica cielos completamente nublados y 1 indica cielos completamente despejados. Un valor alto del índice indica que hay poca nubosidad y mucha luz solar, mientras que un valor bajo indica que hay mucha nubosidad y poca luz solar. Este índice es útil para los estudios de energía solar y la planificación de sistemas de energía solar fotovoltaica, permitiendo estimar la cantidad de energía solar disponible en un lugar específico y en un día determinado. También se puede utilizar para monitorear los patrones de cambio climático y las tendencias a largo plazo en la radiación solar. En la figura 6 se observa que los picos más altos (cerca de 0.6) corresponden a los meses de enero, siendo el más alto el del 2019, lo que indica que se acerca a una mayor claridad del cielo y por ende, mayor luz solar; por el contrario, para el período marzo – mayo de los años graficados, es mayor la nubosidad por lo que hay menos cantidad de luz solar, siendo el 2016 el año que presentó más marcado este hallazgo.

### Figura 7

*Proporción de albedo (2014 – 2021)*



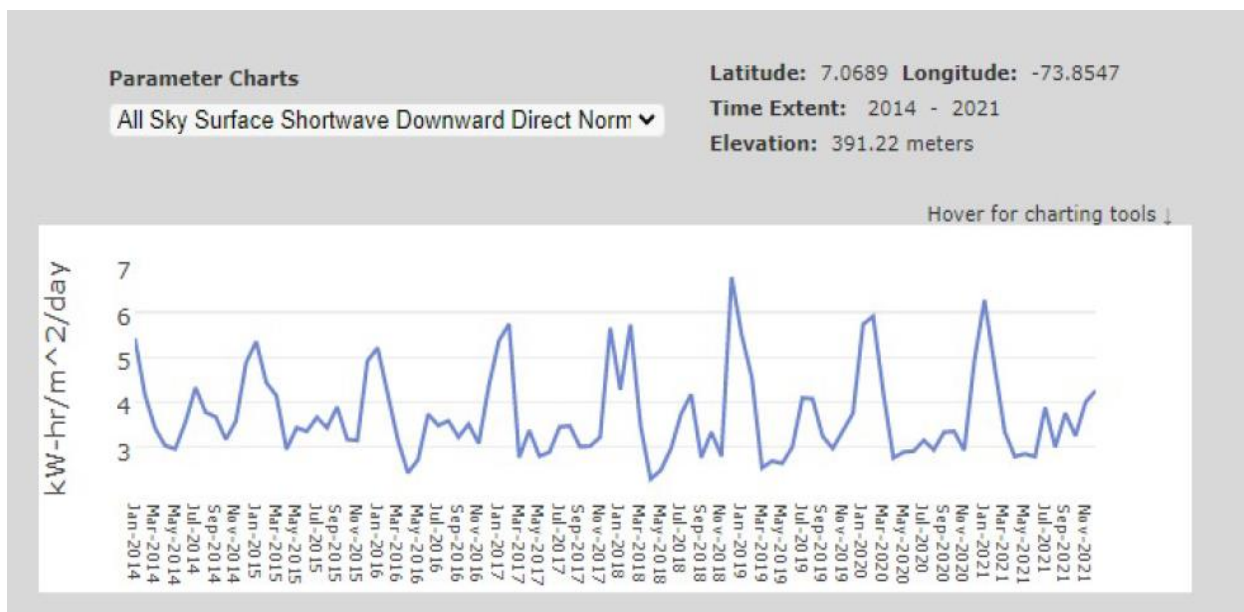
Fuente: (NASA, 2023).

El All Sky Surface Albedo es la proporción de radiación solar reflejada (indirecta) por la

tierra en un lugar determinado, medida en una escala de 0 a 1; cuanto más cerca esté el valor de 1, más reflectante es la superficie y cuanto más cerca esté de 0, menos reflectante es la superficie. Este indicador es importante para la investigación en climatología, energía solar, glaciología y oceanografía, así como para la evaluación de la calidad del aire. Se utiliza para planificar y diseñar sistemas de energía solar y renovable y es un indicador de las condiciones meteorológicas y la formación de contaminantes como el ozono. La cantidad de radiación reflejada depende del tipo de superficie y de las características de la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre. En la figura 7 se observa que en el período enero – marzo de los años graficados las zonas estudiadas son más reflectantes; mientras que, para el mes de noviembre de los años 2018 y 2020, son mucho menos reflectantes de la radiación solar.

### Figura 8

*Proporción de radiación directa ascendente de onda corta en el área estudiada*



Fuente: (NASA, 2023).

La All Sky Surface Shortwave Downward Direct Normal Irradiance (irradiancia directa normal descendente de onda corta en toda la atmósfera) se refiere a la cantidad de radiación solar

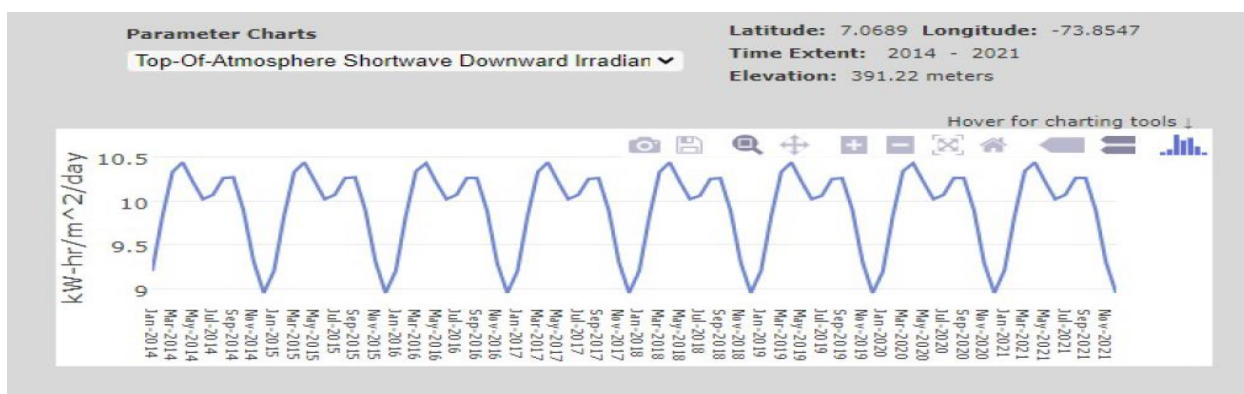
de onda corta que llega directamente a una superficie perpendicular a los rayos solares sin ser dispersada por la atmósfera. Esta medida es importante en aplicaciones de energía solar, ya que es la radiación que puede ser capturada por paneles solares.

Se mide en unidades de potencia por unidad de área (generalmente en vatios por metro cuadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ )), y se tiene en cuenta las condiciones atmosféricas variables. Los diseñadores de sistemas de energía solar utilizan esta medida para determinar el tamaño y la ubicación adecuados de los paneles solares y para calcular la cantidad de energía eléctrica que pueden generar.

De la figura 8 es posible inferir que para la zona de Barrancabermeja este parámetro ha tenido los más altos valores entre enero y marzo de 2019 cuando fue de 7 kw/hr; por el contrario, entre marzo y mayo de los años estudiados, fue menor de 3 kw/hr, lo que puede afectar la producción de energía solar en estos meses del año, consecuente con los resultados de los datos de los indicadores anteriormente mencionados. Se observa que el valor promedio de 5,5 kw/hr se mantiene en los meses enero a marzo de cada año siendo el más alto el del 2021.

### Figura 9

*Proporción de radiación descendente de onda corta en la zona estudiada (2014 – 2021)*



Fuente: (NASA, 2023).

El término Top of Atmosphere Shortwave Downward Irradiance (TOA) (Irradiación

descendente de onda corta) se refiere a la cantidad de energía solar de onda corta que llega a la parte superior de la atmósfera de la Tierra sin ser afectada por la atmósfera misma; es la cantidad de radiación solar directa que llega a la parte superior de la atmósfera de la tierra desde el sol, antes de que esta radiación solar sea absorbida o dispersada por la atmósfera terrestre. Es importante en la climatología porque proporciona una medida de la cantidad de energía solar total que la tierra recibe del sol. La medida TOA se expresa en unidades de potencia por unidad de área y se mide en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Es importante tener en cuenta que la cantidad de energía solar que llega a la tierra desde el sol varía dependiendo de la posición de la tierra en su órbita alrededor del sol y de otros factores.

El TOA es una medida importante para entender la cantidad total de energía solar que la Tierra recibe del Sol antes de ser absorbida o dispersada por la atmósfera terrestre. Es una medida de la radiación solar total que llega a la Tierra, incluyendo la radiación directa y la radiación difusa.

En la figura 9 se puede establecer un “patrón” de resultados en los años estudiados, 2014 a 2021, medidos en  $W/m^2$ , puesto que los valores se incrementan de 9,2 y 10,5 para los meses de enero a marzo de cada año; de mayo a julio decrecen de 10,5 a 10,1; y de septiembre a noviembre pasan de 10,3 al mínimo que es 9, lo que podría traducirse en menor capacidad de producción de energía solar para estos meses y la más alta para los meses de enero a marzo.

De todo lo cual se puede inferir la radiación mensual para el municipio de Barrancabermeja y sus zonas adyacentes (rurales); se tiene una mayor radiación para los meses de sequía y verano, que corresponden a los meses de mayor producción de energía, o llamados “pico”, y los llamados “valle” con menor producción de energía por ser épocas de invierno o lluvias con menor radiación.

Luego de la presentación de los hallazgos documentales del tema a tratar en este capítulo, se procede a describir a continuación los resultados de los cálculos de los índices solares relacionados con la producción de energía solar fotovoltaica, con los datos correspondientes a seis localidades de la zona rural de Barrancabermeja.

Para ello se tomarán en cuenta todos los elementos para calcular la irradiación solar de estas ubicaciones, teniendo las fórmulas y los cálculos aplicados en el programa MatLab, apropiados para tal fin.

El factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre es una medida de la variación energética que depende del día del año, representado por el valor  $d_n$ , el cual fluctúa entre 1 en el primer día de enero y 365 en el último día de diciembre.

### **Ecuación 1**

*Cálculo de factor de excentricidad*

$$\varepsilon = 1 + 0,33 * \cos\left(2\pi * \frac{d_n}{365}\right)$$

Donde:

$\varepsilon$  = Excentricidad

$d_n$  = Número de día del año (contando de 1 a 365);

El ángulo de declinación solar es el ángulo que se forma entre los rayos solares y el plano ecuatorial.

### **Ecuación 2**

*Ángulo de declinación solar  $\delta$*

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 * \frac{284 + d_n}{365}\right)$$

Utilizando la declinación solar como base, se determina el ángulo horario del ocaso solar o el ángulo de salida del sol para cada día mediante la aplicación de la siguiente fórmula.



**Ecuación 3**

*Ángulo de la salida del sol sobre el plano horizontal  $W_s$*

$$W_s = -\arccos(-\tan(\delta) * \tan(\phi))$$

Dónde:

$\phi = \text{latitud del lugar } (^\circ)$

$\delta = \text{ángulo de declinación solar}$

Para cada día del año y en un lugar específico de la Tierra, es importante comprender cómo afecta la variación anual de la distancia entre la Tierra y el Sol al flujo de radiación extraterrestre en comparación con la constante solar GC. El valor aceptado para esta constante es de 1367 W/m<sup>2</sup>, que representa la densidad de flujo promedio anual de energía solar recibida en una superficie perpendicular a la dirección Sol-Tierra, fuera de la atmósfera.

**Ángulo de salida del sol sobre el plano inclinado**

Los paneles solares están ubicados en un plano inclinado para mejorar captación de energía solar y este ángulo depende del lugar donde se ubiquen y /o inclinación de los techos donde se monten los paneles.

**Ecuación 4**

*Ángulo de salida del sol sobre el plano inclinado  $W_{ss}$*

$$W_{ss} = -\cos^{-1}(-\tan(\delta) * \tan(\phi - \beta))$$

Donde  $\beta$  es una constante de inclinación del plano del panel solar igual a 20°.

## Radiación sobre el plano horizontal $H_{dm}$

### Ecuación 5

*Radiación sobre el plano horizontal  $H_{dm}$*

$$H_{dm} = \left(\frac{T}{\pi}\right) I_o * \varepsilon_o \left[ - \left(\frac{\pi}{180}\right) * (Wss * \text{sen}(\phi) * \text{sen}(\delta)) \right. \\ \left. - (\text{cos}(\phi) * \text{cos}(\delta) * \text{sen}(Wss)) \right]$$

### Índice de Claridad

Este índice representa la proporción entre la irradiación solar recibida en la superficie terrestre y la irradiación solar que alcanzaría la superficie si no hubiera atmósfera, ambas medidas en el plano horizontal. y está definido por la Ecuación 5.

### Ecuación 6

*Índice de claridad  $K_{tm}$*

$$K_{tm} = \frac{G_{Hdm}}{H_{dm}}$$

Donde:

$G_{dm}$ = Irradiación global media diaria mensual (datos tomados de la NASA)

$H_{dm}$ = radiación solar sobre el plano inclinado (según la ecuación 5).

Es necesario establecer una conexión entre la fracción difusa de la irradiación horizontal y el índice de claridad, y esta conexión se denomina fracción de radiación difusa. y se calcula con la Ecuación 6:

### Ecuación 7

*Fracción de radiación difusa  $F_{Dm}$*

$$F_{Dm} = 1 - 1,13 * K_{tm}$$

La siguiente fórmula también puede ser expresada como la relación entre la radiación difusa y la radiación global, ambas medidas en el plano horizontal, siguiendo la correlación

establecida por Page. Mediante el conocimiento de la fracción de irradiación difusa y la irradiación global, es posible despejar la ecuación 7 y obtener el valor correspondiente de la radiación difusa en el plano horizontal.

### **Ecuación 8**

*Radiación difusa en el plano horizontal  $D_{dm}$*

$$D_{dm(0)} = F_{Dm} * G_{dn}$$

La radiación solar directa que llega a la superficie de la Tierra varía debido a diversos factores, como cambios en la radiación solar extraterrestre y fenómenos atmosféricos como la dispersión y absorción. La radiación difusa, conocida también como dispersión atmosférica, ocurre cuando la radiación solar interactúa con partículas de aire, vapor de agua y polvo en la atmósfera, dispersando parte de la radiación en direcciones aleatorias sin modificar su longitud de onda. Esta dispersión reduce la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre, ya que parte de la radiación es redirigida al espacio. Por lo tanto, la Ecuación 9 se utiliza para calcular la radiación solar directa en una superficie horizontal, considerando estos efectos atmosféricos.

### **Ecuación 9**

*Radiación solar directa sobre el plano inclinado*

$$H = G_{dm} - D_{dm}$$

Para obtener la suma de la irradiación global recibida en superficies horizontales, es necesario realizar los cálculos mencionados para todos los meses del año, a fin de obtener las componentes directas y difusas. Se asume que la irradiación reflejada es nula.

Con el objetivo de determinar el ángulo de inclinación adecuado para la ubicación de los paneles solares, se deben aplicar las siguientes ecuaciones para obtener las componentes directas

y difusas de la irradiación global en superficies inclinadas a un ángulo  $\beta$  determinado. En el caso de Colombia, debido a su ubicación geográfica, se recomienda orientar los módulos fotovoltaicos de la siguiente manera: para las regiones en el hemisferio norte, la inclinación no debe superar los  $15^\circ$  con respecto a la horizontal y deben estar orientados hacia el sur; mientras que, para las regiones en el hemisferio sur, la inclinación no debe superar los  $12^\circ$  con respecto a la horizontal y deben estar orientados hacia el norte. En todos los casos, se sugiere que la inclinación no sea inferior a  $10^\circ$  (Espitia Rey, 2017).

Asimismo, se debe calcular el Factor de corrección (K), que representa la relación entre las radiaciones diarias directas sobre una superficie inclinada y una superficie horizontal. Por lo tanto, el cálculo de K se realiza mediante la aplicación de la Ecuación 10

#### **Ecuación 10**

*Factor de corrección (K)*

$$K = \frac{\left(\frac{\pi}{180}\right) * (W_{ss} * \text{sen}(\phi - \beta) * \text{sen}(\delta)) + (\cos(\phi - \beta) * \cos(\delta) * \text{sen}(W_{ss}))}{\left(\frac{\pi}{180}\right) * (W_s * \text{sen}(\phi) * \text{sen}(\delta)) + (\cos(\phi) * \cos(\delta) * \text{sen}(W_s))}$$

Donde  $W_{ss}$  es el ángulo de salida del sol sobre la superficie inclinada, y está dado por la ecuación 4.

### ***Radiación directa sobre el panel inclinado***

#### **Ecuación 11**

*Radiación directa sobre el panel inclinado  $H_{dp}$*

$$H_{dp} = \text{Radiacion que llega al plan inclinado} * \text{Factor de correccion}$$

$$H_{dp} = H * K$$

Donde

$$H = G_{dn} - D_{dm}$$

### **Ecuación 12**

*Radiación difusa sobre el plano inclinado  $D_{bpi}$*

$$D_{bpi} = \text{Radiacion difusa} * \left[ \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right]$$

Una vez que se tienen los valores de irradiación para cada mes, teniendo en cuenta la inclinación seleccionada, se busca identificar el mes con la menor irradiación solar. A continuación, este valor se divide entre la irradiación solar incidente utilizada como referencia (1 kW/m<sup>2</sup>) para calibrar los módulos. De esta manera, se obtiene el número de horas sol pico (HSP) aplicando la ecuación 15. El concepto de HSP se utiliza para representar el número de horas equivalentes que el sol debería brillar a una intensidad constante de 1000 W/m<sup>2</sup> para obtener la insolación total de un día. Esto se debe a que, en realidad, la intensidad del sol varía a lo largo del día.

### ***Relación albedo sobre el panel inclinado***

El albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras, y las brillantes más que las mates. El albedo medio de la tierra es del 37-39% de la radiación que proviene del sol.

### **Ecuación 13**

*Relación albedo sobre el panel inclinado  $AL$*

$$AL = \text{reflectividad del suelo} * \frac{\text{Radiacion solar global} * (1 - \cos(\beta))}{2}$$

Donde

Reflectividad del suelo es igual a 0,2.

### **Radiación total sobre el panel inclinado**

#### **Ecuación 14**

*Radiación total sobre el panel inclinado  $G_{tpi}$*

$$G_{tpi} = \text{Radiacion directa} + \text{Radiacion difusa} + \text{Radiacion Albedo}$$

$$G_{tpi} = H_{dp} + D_{bpi} + AL$$

#### **Ecuación 15**

*Horas pico solares  $HSP_{(h)}$*

$$HSP_{(h)} = \frac{\text{Radiación solar } \frac{(kWh)}{m^2}}{1000 \left( \frac{Wh}{m^2} \right)}$$

Habiendo descrito cada uno de estos cálculos, se mencionan a continuación las latitudes y longitudes de las seis localidades o ubicaciones de la zona rural de Barrancabermeja, Santander, Colombia.

#### **Tabla 3**

*Zona rural de Barrancabermeja (seis ubicaciones)*

CORREGIMIENTO	LATITUD	LONGITUD
MESETA DE SAN RAFAEL	7,140014	-73,58469
EL LLANITO	7,155534	-73,76100
LA FORTUNA	7,137617	-73,47609
SAN RAFAEL DE CHUCURÍ	6,876110	-74,03432
CIENÉGA DEL OPÓN	6,903045	-73,89898
EL CENTRO	6,940615	-73,76108

A continuación, se presentan los resultados de los cálculos para una de estas localidades.

**Corregimiento Meseta de San Rafael. Barrancabermeja, Santander, Colombia.**

Período: 01/01/2021 – 31/12/2021

Latitud: 7.144001359819174

Longitud: -73.58469104708242

Cálculos índices energía solar fotovoltaica

### **Día crítico**

Radiación promedio por mes (en kWh/m<sup>2</sup>/día):

Enero: 4.87; febrero: 5.00; marzo: 5.06; abril: 5.25; mayo: 5.27; junio: 5.26; julio: 5.24; agosto: 5.14; septiembre: 5.04; octubre: 4.93; noviembre: 4.77; diciembre: 4.76.

Mes de menor radianza: diciembre (4.76)

Se puede ver que la radiación más baja se registra en diciembre, con un valor de 4.76 kWh/m<sup>2</sup>/día. Por lo tanto, el día crítico para esta ubicación en el año 2022 sería el día con la radiación más baja en diciembre, que corresponde al día 15 de diciembre.

De lo cual se extra el dn para la fórmula del ángulo de declinación solar:

$$\begin{aligned}
 d_n = & \mathbf{31 \text{ dias de enero} + 28 \text{ dias de febrero} + 31 \text{ dias de marzo}} \\
 & + \mathbf{30 \text{ dias de abril} + 31 \text{ días de mayo} + 30 \text{ días de junio}} \\
 & + \mathbf{31 \text{ días mes de julio} + 31 \text{ días mes de agosto}} \\
 & + \mathbf{30 \text{ días mes de septiembre} + 31 \text{ mes de octubre}} \\
 & + \mathbf{30 \text{ días mes de noviembre} + 15 \text{ días mes de diciembre} = 349}
 \end{aligned}$$

### **Calculo del angulo de declinacion solar $\delta$ .**

Este dato es básico para el cálculo de las horas pico solares en los proyectos de energía solar fotovoltaica.

$$\delta = 23,45^\circ * \text{sen} \left( 360^\circ * \frac{284+d_n}{365} \right) = 23,45^\circ * \text{sen} \left( 360^\circ * \frac{284+349}{365} \right) = -23,33^\circ$$

### **Ángulo de salida del sol sobre el plano horizontal $W_s$**

Se calcula el ángulo de salida del sol ( $W_s$ ) para el día crítico que es el 15 de diciembre con un ángulo de declinación solar de -23,33°.

$$W_s = -\arccos(-\text{tg}(\delta) * \text{tg}(\emptyset))$$

donde  $\delta = -23,33^\circ$  y  $\phi = \text{latitud} = 7,1440014$

$$W_s = -\arccos(-\text{tg}(-23,33^\circ) * \text{tg}(7,1440014^\circ))$$

$$W_s = -86,9011294^\circ$$

### **Ángulo de salida del sol sobre un plano inclinado $W_{ss}$**

Los paneles solares están ubicados en un plano inclinado para mejorar captación de energía solar y este ángulo depende del lugar donde se ubiquen y/o inclinación de los techos donde se monten los paneles.

$$\delta = -23,33 ; \phi = 7,1440014 ; \beta = 20^\circ \text{ (inclinacion del plano del panel solar)}$$

Calculamos el ángulo de salida del sol sobre el plano inclinado con la siguiente expresión:

$$W_{ss} = -\cos^{-1}(-\tan(\delta) * \tan(\phi - \beta))$$

$$W_{ss} = -\cos^{-1}(-\tan(-23,33^\circ) * \tan(7,1440014^\circ - 20^\circ)) = -95,648759^\circ$$

### **Factor de excentricidad $\varepsilon$**

$$\varepsilon = 1 + 0,33 * \cos\left(2\pi * \frac{dn}{265}\right)$$

$dn$  es conocido y vale 349 luego calculamos

$$\varepsilon = 1 + \left(0,33 * \cos\left(2\pi * \frac{349}{265}\right)\right) = 1,3265$$

Básicamente el **factor de excentricidad** es una medida de que tan lejos o que tan cerca está la distancia de la tierra al sol en determinado día del año con respecto a un valor promedio de distancia.

### **Radiación sobre el plano horizontal**

$$H_{dm} = \left(\frac{T}{\pi}\right) I_o * \varepsilon_o \left[ -\left(\frac{\pi}{180}\right) * (W_{ss} * \text{sen}(\phi) * \text{sen}(\delta)) \right. \\ \left. - (\cos(\phi) * \cos(\delta) * \text{sen}(W_{ss})) \right]$$



$$T = \text{long. del Dia} = 24 \text{ horas} \quad I_o = K_{te} \text{ solar} = 1367 \text{ W/m}^2$$

$$\varepsilon_o = \text{Factor de excentricidad} = 1.3265 \quad \phi = \text{latitud} = 7,1440014$$

$$\delta = \text{declinacion solar} = -23,33^\circ$$

$$W_{ss} = \text{Angulo de salida del sol sobre un plano inclinado} = -95.648759^\circ$$

$$H_{dm} = \left(\frac{24}{\pi}\right) 1367 \text{ W/m}^2 * 1,3265 \left[ -\left(\frac{\pi}{180}\right) * (-95.648759^\circ * \text{sen}(7,1440014^\circ) * \text{sen}(-23,33^\circ)) - (\cos(7,1440014^\circ) * \cos(-23,33^\circ) * \text{sen}(-95,648759^\circ)) \right]$$

$$H_{dm} = 11423,02259 \text{ Whr/m}^2$$

**Índice de claridad**

$$K_{TM} = \frac{G_{dn}}{H_{dm}} = \text{índice de claridad} \quad \text{donde}$$

$$G_{dn} = \text{Radiacion solar global}$$

$$G_{dn} = \text{menor valor datos nasa de radiacion global}$$

$$G_{dn} = \text{diciembre} = 4,76 \text{ kWhr/m}^2$$

$$K_{TM} = \frac{G_{dn}}{H_{dm}} = \frac{4760}{11423,022} = 0,416$$

**Fracción difusa de la radiación y radiación difusa**

La fracción difusa es la fracción de irradiancia (o irradiación) global que es difusa

$$F_{Dm} = 1 - 1,13 * K_{TM}$$

$$F_{Dm} = 1 - 1,13 * 0,416 = 0,529$$

$$D_{dm(o)} = F_{Dm} * G_{dn}$$

$$D_{dm(o)} = \text{Fraccion difusa} * \text{Radiacion solar global}$$

$$D_{dm} = 0,529 * 4760 \frac{\text{Whr}}{\text{m}^2} / \text{dia} = 2522,41 \frac{\text{Whr}}{\text{m}^2} / \text{dia}$$

**Radiación directa sobre el plano inclinado**

***H = Radiacion que llega al plano inclinado***

***H = Radiacion global – Radiacion difusa***

$$H = G_{dn} - D_{dm}$$

$$H = 4760 \frac{Whr}{m^2} / dia - 2522,41 \frac{Whr}{m^2} / dia = 2237,59 \frac{Whr}{m^2} / dia$$

***Factor de corrección***

Factor de corrección es un índice entre el plano inclinado y el plano horizontal denominado K.

$$K = \frac{\left(\frac{\pi}{180}\right) * (Wss * \text{sen}(\phi - \beta) * \text{sen}(\delta)) + (\cos(\phi - \beta) * \cos(\delta) * \text{sen}(Wss))}{\left(\frac{\pi}{180}\right) * (Ws * \text{sen}(\phi) * \text{sen}(\delta)) + (\cos(\phi) * \cos(\delta) * \text{sen}(Ws))}$$

$$K =$$

$$\frac{\left(\frac{\pi}{180}\right) * (-95.648759^\circ) * \text{sen}(7.1440014 - 20) * \text{sen}(-23,33^\circ) + \cos(7.1440014 - 20) * \cos(-23,33^\circ) * \text{sen}(-95.648759^\circ)}{\left(\frac{\pi}{180}\right) * (-86.9011294^\circ) * \text{sen}(7.1440014) * \text{sen}(-23,33^\circ) + \cos(7.1440014) * \cos(-23,33^\circ) * \text{sen}(-86.9011294^\circ)}$$

$$K = 1.24$$

***Radiación directa sobre el panel inclinado***

***H<sub>dp</sub> = Radiacion que llega al plan inclinado \* Factor de correccion***

$$H_{dp} = 2237,59 \frac{Whr}{m^2} / dia * 1.24 = 2774,61 \frac{Wh}{m^2} / dia$$

***Radiación difusa sobre el panel inclinado***

$$D_{bpi} = \text{Radiacion difusa} * \left[ \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right]$$

$$D_{bpi} = 2522,41 \frac{Whr}{m^2} / dia * \left[ \frac{1 + \cos(20^\circ)}{2} \right] = 2446,35 \frac{Wh}{m^2} / dia$$

***Relación albedo sobre el panel inclinado***

$$AL = \text{reflectividad del suelo} * \frac{\text{Radiacion solar global} * (1 - \cos(\beta))}{2}$$

$$\text{reflectividad del suelo} = 0,2$$

$$AL = 0,2 * \frac{4760 * (1 - \cos(20^\circ))}{2} = 28,70 \frac{Wh}{m^2} / dia$$

El albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras, y las brillantes más que las mates. El albedo medio de la Tierra es del 37-39% de la radiación que proviene del Sol.

### ***Radiación total sobre el panel inclinado***

$$G_{tpi} = \text{Radiacion directa} + \text{Radiacion difusa} + \text{Radiacion Albedo}$$

$$G_{tpi} = H_{dp} + D_{bpi} + AL$$

$$G_{tpi} = 2774,61 \frac{Wh}{m^2} / dia + 2446,35 \frac{Wh}{m^2} / dia + 28,70 \frac{Wh}{m^2} / dia$$

$$G_{tpi} = 5249,66 \frac{Wh}{m^2} / dia$$

### ***Horas pico solares***

$$HPS(h) = \frac{G_{tpi}}{1000 \frac{Wh}{m^2}} = \frac{5249,66 \frac{Wh}{m^2} / dia}{1000 \frac{Wh}{m^2}} = 5,24966 \text{ horas/dia}$$

Ahora bien, de las latitudes y longitudes descritas en la tabla 3, se obtienen los datos que se aprecian en la siguiente tabla (4).

**Tabla 4***Indicadores solares zona rural de Barrancabermeja, Santander, Colombia*

CORREGIMIENTO	Radiación sobre el plano horizontal H <sub>dm</sub> (Whr/m <sup>2</sup> )	índice de claridad (K_TM)	Fracción difusa de la radiación y radiación difusa (D(dm(0)) Wh/m <sup>2</sup> /día)	Radiación directa sobre el plano inclinado H (Wh/m <sup>2</sup> /día)	Factor de corrección (K)	Radiación directa sobre el plano inclinado H <sub>dp</sub> (Wh/m <sup>2</sup> /día)	Radiación difusa sobre el plano inclinado Dbpi (Wh/m <sup>2</sup> /día)	Relación albedo sobre el plano inclinado AL (Wh/m <sup>2</sup> /día)	Radiación total sobre el panel inclinado G <sub>tpi</sub> (Wh/m <sup>2</sup> /día)	Horas pico solares HPS(h) (horas/día)
<b>MESETA DE SAN RAFAEL</b>	11.568,01	0.4114	2.546,73	2.213,26	1,2430	2.751,17	2.546,70	28,7063	5.326,59	5,3265
EL LLANITO	11.566,03	0.4072	2.542,61	2.167,38	1,2431	2.694,37	2.542,59	28,4047	5.265,36	5,2653
LA FORTUNA	11.569,10	0.4053	2.541,55	2.148,44	1,2429	2.670,47	2.541,53	28,2841	5.240,28	5,2402
SAN RAFAEL DE CHUCURÍ	11.613,90	0.4072	2.553,18	2.176,81	1,2405	2.700,50	2.553,15	28,5253	5.282,18	5,2821
CIENÉGA DEL OPÓN	11.609,30	0.3979	2.542,42	2.077,57	1,2408	2.577,89	2.542,40	27,8620	5.148,16	5,1481
EL CENTRO	11.602,87	0.4059	2.549,49	2.160,50	1,2411	2.681,54	2.549,47	28,4047	5.259,42	5,2594

De donde se puede inferir que la radiación total sobre el plano inclinado es en promedio para la zona estudiada de 5,8 Wh/m<sup>2</sup>/día, lo cual comparado a los datos presentados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para zonas adyacentes como las del departamento del Norte del Santander, donde se tiene una radiación total en promedio de 5,05 Wh/m<sup>2</sup>/día, la evaluación revela que la zona estudiada tiene un potencial energético solar adecuado para la implementación de proyectos de generación de energía a partir de esta fuente. Esto la convierte en un lugar viable para la instalación de un sistema de generación fotovoltaica, especialmente en comparación con otras áreas donde la irradiación solar es inferior al 50% de las condiciones normales (1 Wh/m<sup>2</sup>). A continuación, se describen algunas iniciativas relacionadas con este tema.

En Colombia se han venido desarrollando una serie de iniciativas tendientes a consolidar la producción de energías sustentables como la solar a partir de la implementación de la tecnología solar fotovoltaica. Ecopetrol, la empresa del Estado colombiano para la producción y comercialización de hidrocarburos, presentó una propuesta para el desarrollo de 8 parques de energía solar. El Grupo Ecopetrol tiene planes de desarrollar seis nuevos proyectos fotovoltaicos que contribuirán a la transición energética del país. Estos proyectos se sumarán a los dos megaparques solares San Fernando y Castilla, ubicados en el municipio de Castilla La Nueva, departamento del Meta. Con la adición de estos seis nuevos proyectos, se alcanzará un total de ocho proyectos fotovoltaicos para el año 2021 (Grupo Ecopetrol, 2020).

De manera similar, el Grupo Ecopetrol, su filial Cenit y AES Colombia han puesto en funcionamiento el parque solar de autogeneración de energía más grande construido en el país, y uno de los más innovadores y modernos de la región. Se encuentra ubicado en el municipio de Castilla La Nueva, en el departamento del Meta (Ecopetrol, 2021).

El ecoparque San Fernando tiene una capacidad instalada de 61 megavatios (MWp), equivalente a energizar una ciudad de aproximadamente 93.000 habitantes, y será utilizado para abastecer parte de la demanda energética de las operaciones de Ecopetrol y Cenit en los Llanos Orientales (Ecopetrol, 2021).

Este parque solar abarca una extensión de 57 hectáreas, lo cual equivale a aproximadamente 70 canchas de fútbol profesionales. En este espacio se encuentran más de 114.000 paneles solares de última generación, los cuales tienen la capacidad de seguir la trayectoria del sol y cuentan con tecnología bifacial que les permite captar energía en ambos lados, garantizando así un mayor rendimiento y eficiencia.

La construcción de esta megaestructura solar fue llevada a cabo por AES Colombia, a solicitud de Cenit, bajo un contrato de suministro de energía por un periodo de 15 años, que incluye su operación y mantenimiento. La inversión total se estima en aproximadamente 40 millones de dólares, lo que equivale a más de 150 mil millones de pesos colombianos (Grupo Ecopetrol, 2021).

En Colombia se han desarrollado y se están llevando a cabo varios proyectos de energía solar. Uno de ellos es el Parque Solar Cuetecitas, que se construirá en Riohacha, La Guajira, con una capacidad propuesta de 600MW y una inversión estimada de US\$128 millones. Otro proyecto es Puerta de Oro, ubicado en Guaduas, Cundinamarca, con una capacidad propuesta de 300MW y se espera que comience a operar en 2021. También está el proyecto SC Solar San Martín en El Paso, Cesar, con una capacidad propuesta de 240MW y se prevé que comience a operar en 2022. Estos proyectos requieren permisos adicionales y SC Solar está en negociaciones con inversionistas internacionales. Otros proyectos incluyen el Parque PV de Altamira en Huila, el Parque Fotovoltaico Canoas en Soacha, el proyecto La Orquídea en Santa Rosa, el Parque

Fotovoltaico Santa Teresa en Riohacha, el proyecto Valle Negro en Montelíbano y el Parque Solar Perales en Ocaña, Norte de Santander. Estos proyectos tienen capacidades propuestas de 200MW cada uno y se espera que comiencen a operar en diferentes momentos, desde 2021 hasta diciembre de 2022 (Bnamericas, 2020).

**8 Cubrimiento de la demanda energética a partir del uso de la energía solar, tomando en cuenta el incremento del uso energético de la zona y del análisis de proyectos instalados en la región para determinar su incremento del uso de la energía solar fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica es una fuente de electricidad en rápido crecimiento y asequible en Colombia. Los proyectos solares ofrecen beneficios como adaptarse a las necesidades energéticas, reducir la huella de carbono y ahorrar en la factura de energía. Enel X, líder mundial en energías renovables, ofrece soluciones personalizadas y garantiza un alto rendimiento a lo largo del tiempo. Además, la legislación colombiana proporciona ventajas adicionales, como la generación de excedentes de energía y exenciones de impuestos (Semana, 2021).

El uso de energía solar en Colombia está en aumento y se espera que tenga una mayor participación en la matriz energética del país en los próximos años. La demanda de energía eléctrica ha aumentado, especialmente en el sector industrial, seguido por los sectores residencial y comercial. Empresas como Bavaria han implementado proyectos solares para cubrir parte de su demanda energética. Enel X ha desarrollado proyectos solares en diversas empresas y ofrece opciones como el PPA para satisfacer las necesidades energéticas de manera sostenible. El gobierno colombiano ha implementado medidas para promover el uso de energías renovables, incluyendo incentivos fiscales (UPME, El Espectador).

En cuanto al consumo energético, la demanda de energía eléctrica en Colombia ha aumentado en comparación con años anteriores. En la región oriental del país, donde se encuentra Barrancabermeja, se ha registrado un incremento significativo de la demanda, impulsado por actividades económicas como la manufactura y la minería. Aunque no se dispone de datos específicos para la zona rural cercana a Barrancabermeja, se puede inferir un aumento



en la demanda energética en línea con la tendencia regional (El Espectador).

Ahora bien, teniendo en cuenta este dato así como la información del crecimiento de los proyectos de producción de energías renovables, como la energía solar (fotovoltaica), se puede inferir que dichos proyectos están abocados precisamente a cubrir ese incremento de la demanda energética de esta zona del país, tomando en cuenta, que es posible producir energía solar a partir de la implementación de paneles solares, puesto que potencial de la oferta energética de la zona de los Santanderes, es bastante elevado, en comparación con otras zonas aledañas. Para efectos de clarificar el tema propuesto en este capítulo, se describen a continuación algunos de los proyectos por implementar y desarrollados que permiten concluir en relación con el cubrimiento de la demanda energética a partir del uso de la energía solar, considerando el uso energético de la zona en estudio, y más que esta región, las localidades que en Colombia albergan un potencial energético significativo.

El Parque Fotovoltaico Carare es un proyecto de energía solar fotovoltaica de 200MW ubicado en Santander, Colombia. Actualmente se encuentra en la etapa de prefactibilidad y análisis técnico. Se espera que la construcción comience en 2022 y que entre en operación comercial en diciembre de 2024 (UPME).

La Granja Solar Celsia Chicamocha es una megaplanta solar de 80MW ubicada en la vereda Tabacal, en el municipio de Mesa de los Santos, Santander. Desarrollada por Celsia, esta planta tiene la capacidad de satisfacer el consumo básico de 100,000 familias campesinas. La construcción del proyecto ha generado inversiones significativas y más de 300 empleos directos, contribuyendo a la reactivación económica de la región. Además, se ha construido una nueva subestación eléctrica que mejora la prestación del servicio en el departamento y amplía la cobertura de energía eléctrica para 35,000 hogares en la zona rural de Santander (Sánchez Molina, 2020).

## 9 Estrategias para el sistema energético a partir del desarrollo de energía sustentable (energía limpia fotovoltaica solar)

Para presentar las estrategias para el sistema energético a partir del desarrollo de energía sustentable, es necesario conocer algunos de los estudios que, en este sentido, se han llevado a cabo en el país; algunos de los cuales se detallan en la siguiente tabla.

**Tabla 5**

*Estudios sistemas energéticos a partir de energía sustentable*

Localización	Tipo de estudio	Hallazgos	Conclusiones
<b>Tolima</b>	Estudio de viabilidad técnica y económica de energía solar fotovoltaica en una zona rural de Colombia (2018)	El estudio demostró la viabilidad técnica y económica de la generación de energía solar fotovoltaica en la zona rural de Colombia, lo que permitiría mejorar la calidad de vida de la población local y reducir el que se dependa de los llamados combustibles prehistóricos.	La adopción de un sistema de generación de energía solar fotovoltaica puede jugar un papel fundamental en la transición hacia un sistema energético más sostenible en Colombia.
<b>Cali</b>	Evaluación de la generación de energía a partir de biogás en un relleno sanitario de Colombia (2020)	El estudio reveló que el vertedero de Cali tiene un gran potencial para la producción de energía a través del biogás, lo que implicaría una reducción significativa en las emisiones de gases de efecto invernadero y un aporte importante a la mitigación del cambio climático.	La generación de energía a partir de biogás es una alternativa viable y sostenible para la gestión de residuos sólidos en Colombia.
<b>Medellín</b>	Estudio de la generación de energía eléctrica a partir de residuos de palma aceitera en Colombia (2019)	El estudio encontró que la generación de energía eléctrica a partir de residuos de palma aceitera es una alternativa viable y sostenible para la producción de energía en Colombia, lo que permitiría reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover la transición hacia un sistema energético más sostenible.	La generación de energía a partir de residuos de palma aceitera es una alternativa viable y sostenible para la producción de energía en Colombia.
<b>La Guajira</b>	Evaluación del potencial de energía eólica en la península de La Guajira en Colombia (2017)	El estudio encontró que la península de La Guajira tiene un alto potencial para la generación de energía eólica, lo que permitiría diversificar la matriz energética de Colombia y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.	La generación de energía eólica es una alternativa viable y sostenible para la producción de energía en Colombia, especialmente en regiones con un alto potencial para la energía renovable.

Estos estudios demuestran que la generación de energía renovable es una alternativa viable y sostenible para la producción de energía en diferentes ubicaciones de Colombia, lo que permitiría reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover la transición hacia un sistema energético más sostenible en el país.

Además de los estudios mencionados, es importante destacar que en Colombia se han implementado diversas políticas y programas para fomentar la generación de energía renovable y promover la transición hacia un sistema energético más sostenible.

Entre estos estudios se tiene que el Gobierno Nacional de Colombia ha establecido metas ambiciosas para la generación de energía renovable, incluyendo la meta de que el 10% de la energía eléctrica del país provenga de fuentes renovables para el año 2022. Además, se han implementado diversos programas de incentivos y financiamiento para la implementación de proyectos de energía renovable, incluyendo programas de energía solar fotovoltaica, energía eólica y biogás.

Por otro lado, también es importante destacar que la generación de energía renovable no solo tiene beneficios ambientales, sino también sociales y económicos. Por ejemplo, la generación de energía renovable puede crear empleos locales, mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales y reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados, lo que puede tener un impacto positivo en la economía del país.

En resumen, la generación de energía renovable representa una oportunidad para promover un desarrollo sostenible en Colombia, que permita satisfacer las necesidades energéticas del país de manera más sostenible, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad de vida de las comunidades locales.

Así mismo, en la localidad de Barrancabermeja se han realizado números estudios para

evaluar la capacidad energética de la zona para el desarrollo de energías sustentables como la fotovoltaica; uno de ellos es la investigación titulada Estudio de la generación de energía eléctrica con celdas fotovoltaicas en Barrancabermeja (2019)

La Universidad Industrial de Santander realizó un estudio para evaluar la factibilidad técnica y económica de la generación de energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas en Barrancabermeja. Los resultados de dicho estudio mostraron que la región posee un gran potencial para la generación de energía solar, especialmente en áreas con menor densidad de población y menor consumo eléctrico.

El estudio propone la instalación de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica en Barrancabermeja como una opción viable para aumentar la seguridad energética y disminuir la dependencia de fuentes no renovables. Se estima que este sistema de 10 kW tendría un período de retorno de inversión de aproximadamente 6 años. En general, la investigación demuestra que la generación de energía solar en Barrancabermeja es factible y podría impulsar una transición hacia un sistema energético más sostenible y seguro en la región. Este estudio es relevante para la zona, ya que resalta la viabilidad y la rentabilidad de la generación de energía renovable, y podría servir como modelo para futuros proyectos en la región y en el país en general, promoviendo la adopción de tecnologías sostenibles y contribuyendo a una transición energética más amplia en Colombia.

En el ámbito de la investigación sobre estrategias de generación de energía sostenible a partir de fuentes solares, se han llevado a cabo diversos estudios que analizan las oportunidades y aplicaciones de la energía solar en diversos contextos y regiones.

Por ejemplo, un estudio publicado en 2019 por la Universidad Nacional de Colombia, titulado "Estudio técnico-económico de la incorporación de la energía solar en sistemas

eléctricos aislados de la Amazonia colombiana"; el estudio investigó la viabilidad técnica y económica de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en comunidades aisladas de la región amazónica del país. Los resultados indicaron que la energía solar fotovoltaica puede ser una solución rentable y efectiva para la electrificación de estas comunidades, disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles y mejorando la calidad de vida de sus habitantes.

Otro estudio publicado en 2020 por la Universidad de los Andes, titulado "Análisis técnico-económico de la integración de sistemas solares fotovoltaicos en redes eléctricas de baja tensión en Colombia", evaluó la integración de sistemas solares fotovoltaicos en redes eléctricas de baja tensión en áreas urbanas y rurales de Colombia. Los investigadores concluyeron que la energía solar fotovoltaica puede ser una opción viable y rentable para fortalecer la resiliencia de las redes eléctricas y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

Además, existen varios estudios que exploran la posibilidad de integrar sistemas solares fotovoltaicos en edificios urbanos para reducir la demanda energética y mejorar la eficiencia energética. Por ejemplo, un estudio publicado en 2019 por la Universidad de los Andes, titulado "Evaluación de la viabilidad técnica y económica de la integración de sistemas fotovoltaicos en edificios de oficinas en Bogotá", analizó la viabilidad técnica y económica de la integración de sistemas solares fotovoltaicos en edificios de oficinas en la ciudad de Bogotá. Los autores encontraron que la integración de sistemas solares fotovoltaicos en edificios puede ser una solución viable y rentable para reducir la demanda energética y mejorar la eficiencia energética.

En resumen, existen numerosos estudios que exploran las posibilidades de la energía solar fotovoltaica en diferentes contextos y regiones en Colombia, y estos estudios sugieren que la energía solar fotovoltaica puede ser una solución viable y rentable para mejorar la sostenibilidad del sistema energético del país.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los estudios mencionados (Tabla 4).

**Tabla 6**

*Resumen estudios adelantados en materia de producción de energía sustentable*

<b>Estudio</b>	<b>Localización</b>	<b>Tipo de estudio</b>	<b>Hallazgos</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>Referencia</b>
"Estudio técnico-económico de la incorporación de la energía solar en sistemas eléctricos aislados de la Amazonia colombiana"	Región amazónica de Colombia	Técnico-económico	La energía solar fotovoltaica es una solución viable y rentable para la electrificación de comunidades aisladas en la región amazónica, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles.	La energía solar fotovoltaica debe ser considerada una solución prioritaria para la electrificación de comunidades aisladas en la región amazónica de Colombia.	Rivera et al. 82019). Estudio técnico-económico de la incorporación de la energía solar en sistemas eléctricos aislados de la Amazonia colombiana," Revista Internacional de Energías Renovables, vol. 8, no. 1, pp. 29-38.
"Análisis técnico-económico de la integración de sistemas solares fotovoltaicos en redes eléctricas de baja tensión en Colombia"	Zonas urbanas y rurales de Colombia	Técnico-económico	La energía solar fotovoltaica es una solución viable y rentable para mejorar la resiliencia de las redes eléctricas y reducir la dependencia de los combustibles fósiles en zonas urbanas y rurales de Colombia.	La integración de sistemas solares fotovoltaicos en redes eléctricas de baja tensión debe ser considerada como una solución para mejorar la sostenibilidad del sistema energético de Colombia.	Ramírez et al. (2020). Análisis técnico-económico de la integración de sistemas solares fotovoltaicos en redes eléctricas de baja tensión en Colombia. Revista Internacional de Energías Renovables, vol. 10, no. 1, pp. 25-34.
"Evaluación de la viabilidad técnica y económica de la integración de sistemas fotovoltaicos en edificios de oficinas en Bogotá"	Ciudad de Bogotá	Técnico-económico	La integración de sistemas solares fotovoltaicos en edificios de oficinas en Bogotá es una solución viable y rentable para reducir la demanda energética y mejorar la eficiencia energética.	La integración de sistemas solares fotovoltaicos en edificios de oficinas en Bogotá debe ser considerada una solución prioritaria para mejorar la sostenibilidad del sistema energético de la ciudad.	Medina et al. (2019). Evaluación de la viabilidad técnica y económica de la integración de sistemas fotovoltaicos en edificios de oficinas en Bogotá. Revista Internacional de Energías Renovables, vol. 9, no. 1, pp. 1-8.

En general, los estudios presentados demuestran que la energía solar fotovoltaica es una solución viable y rentable para mejorar la sostenibilidad del sistema energético de Colombia en diferentes contextos, como la electrificación de comunidades aisladas, la mejora de la resiliencia de las redes eléctricas, la reducción de la demanda energética en edificios de oficinas y la generación distribuida en zonas urbanas y rurales.

Las estrategias sugeridas incluyen la integración de sistemas solares fotovoltaicos en las redes eléctricas existentes, tanto de baja como de alta tensión, la promoción de la generación distribuida en hogares, empresas y edificios públicos, la implementación de programas de financiamiento y subsidios para incentivar la adopción de energía solar, y la implementación de políticas y regulaciones que fomenten la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

Siendo más específicos en la formulación de las estrategias que se pueden derivar de los estudios mencionados, a continuación, se presentan algunas de ellas.

Los incentivos fiscales, a través de los cuales el Estado podría ofrecer incentivos fiscales, como exenciones de impuestos, para aquellos que instalen paneles solares en sus hogares o empresas. Esto podría hacer que los paneles solares sean más asequibles y atractivos para los consumidores a nivel empresarial y comercial en general.

Otra de las estrategias a tener en cuenta son los subsidios directos que puede ofrecer el gobierno para ayudar a financiar la instalación de paneles solares. Esto podría ser especialmente útil para comunidades rurales que no tienen acceso a la red eléctrica.

Los programas de capacitación y educación, de especial importancia por cuanto es necesario que se formulen e implementen programas de capacitación y educación para que los consumidores conozcan la tecnología y los beneficios de la energía fotovoltaica. Esto podría ser

especialmente importante para los hogares y comunidades más pobres, que a menudo no tienen acceso a información sobre tecnologías renovables.

Por otro lado, las asociaciones público-privadas, que representan las alianzas entre el gobierno para colaborar con empresas privadas en el desarrollo de proyectos de energía solar a gran escala. Esto ayudará a reducir los costos y hacer que la energía solar sea más asequible para los consumidores.

Los programas de investigación y desarrollo de estos tipos de energía sustentable. El gobierno debe invertir en investigación y desarrollo de tecnologías solares más avanzadas y eficientes. Esto ayudará a reducir los costos y mejorar la eficiencia de la energía solar en el largo plazo.

Finalmente, la formulación de políticas de energía renovable, a través de la cual el Estado colombiano podrá establecer políticas para promover la adopción de energías renovables, como la energía solar, en lugar de fuentes de energía más contaminantes. Esto incluye objetivos a largo plazo para aumentar la proporción de energía renovable en la red eléctrica y requisitos para que las empresas utilicen fuentes renovables.

Todo lo cual representa una oportunidad para que la energía solar fotovoltaica mejore la sostenibilidad del sistema energético de Colombia, al reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los efectos del cambio climático. La implementación de estrategias basadas en la energía solar debe ser una prioridad en las políticas energéticas del país.



## **10 Evaluación del proyecto por una empresa generadora de energía fotovoltaica (paneles solares)**

En atención a la inquietud generada por la investigación que se llevó a cabo, se solicitó a una empresa que comercializa equipos para la generación de energía solar a partir de la implementación de paneles solares, generara la evaluación correspondiente a los aspectos más significativos del estudio realizado, obteniéndose los resultados que se presentan en la tabla 5.

La empresa Enertis Applus, está ubicada en la ciudad de Bogotá. Es una firma de consultoría e ingeniería de rango global completo, experta en proyectos de energía renovable y soluciones de almacenamiento.

Enertis Applus+ cuenta con una trayectoria de más de 15 años en los sectores de energías renovables y almacenamiento y una experiencia acumulada de más de 200 GW y 10 GWh en almacenamiento a nivel mundial.

Su misión es asegurar la máxima rentabilidad a sus clientes y la adecuada gestión del riesgo de sus proyectos, proporcionando servicios innovadores y de alto valor añadido.

Desde 2021 forman parte de Applus+, una de las empresas líderes a nivel mundial en el sector de la inspección, ensayo y certificación con más de 20 años de experiencia en el sector renovable y el objetivo es potenciar la actividad del Grupo Applus+ en el sector solar y de almacenamiento de energía en el mercado mundial.

En la actualidad desarrollan proyectos de energía sustentable en varios países de la región y del mundo, entre los que se tienen:

### **Planta Solar Fotovoltaica El Romero**

País: Chile, América del Sur

Capacidad: 247 MWp

Servicios: Inspección de fabricación de módulos fotovoltaicos, pruebas antes y después de la instalación y supervisión del montaje de la estructura. Ensayos de control de degradación de módulos fotovoltaicos y calibración de piranómetros.

Clientes: Acciona Energía Chile

Enertis Applus+ r llevó a cabo inspecciones de calidad durante la fabricación de los módulos fotovoltaicos, donde se realizaron auditorías en las líneas de producción para supervisar y verificar el proceso de fabricación, así como garantizar la trazabilidad de los materiales utilizados; realizando pruebas en su laboratorio independiente e inspecciones de electroluminiscencia y visuales a la entrega de los módulos para la validación de lotes. Enertis también supervisó el proceso de montaje y completó la obra realizando termografías, inspecciones visuales y pruebas nocturnas de electroluminiscencia en los módulos fotovoltaicos instalados. Durante la fase de operación, Enertis Applus realizó medidas de degradación de módulos y calibraciones de piranómetros solares.

### **Creek Portafolio**

País: EE. UU.

Capacidad: más de 280 MW fotovoltaicos, con aproximadamente 400 MWh de almacenamiento de energía, en total

Servicios: Ingeniería del propietario

Clientes: Carolina Energía Solar

Esta cartera se compone de cinco proyectos fotovoltaicos, con 50-60 MW fotovoltaicos por sitio y un promedio de 100 MWh de almacenamiento de energía (ESS) de larga duración en 4 de los sitios totales. Enertis Applus+ agradece trabajar como Owner's Engineer, mientras que Carolina Solar Energy y las entidades del proyecto desarrollaron y avanzaron con éxito en esta

cartera. Las solicitudes de interconexión (IA) fueron completadas y aprobadas por las empresas de servicios públicos afectadas para la operación de PV + ESS en las 5 ubicaciones. Enertis Applus+ trabajó en estrecha colaboración con los profesionales comerciales y de ingeniería de Carolina Solar Energy para establecer las bases de los documentos de diseño, la ingeniería, el modelado de energía PV+ ESS y proporcionar otro tipo de apoyo y asesoramiento a los proyectos.

### **Planta fotovoltaica Serra do Mel**

País: Brasil, América del Sur

Capacidad: 580 MW (Serra do Mel I & II 320 MW+ Serra do Mel III-VI 260 MW)

Servicios: Servicios de asesoramiento y control de calidad de la fabricación de equipos fotovoltaicos en China y Brasil

Clientes: Voltalia


Enertis Applus+ ayudó a Voltalia aportando su asesoramiento especializado e independiente durante las fases de prefabricación, fabricación y preembarque. Como parte de los servicios prestados, la empresa llevó a cabo la supervisión de proveedores, es decir, inspecciones de fábrica, en China para supervisar y evaluar las materias primas de los módulos fotovoltaicos solares. Asimismo, Enertis Applus+ evaluó el cumplimiento del proceso de fabricación con los estándares de calidad establecidos y sus experimentados inspectores de calidad supervisaron todo el proceso de fabricación en China. Los servicios también incluyeron pruebas de aceptación en fábrica (FAT) previas al envío. Enertis Applus+ también realizó ensayos adicionales y específicos de los módulos en su laboratorio externo acreditado (ISO/IEC 17025, ISO/IEC 17020 y CBTL/IECEE), incluyendo la determinación de la potencia máxima en condiciones estándar, visual, EL, Light Induced Degradation (LID), la degradación inducida por potencial (PID) y las pruebas de índice de degradación inducida por luz y temperatura elevada (LeTID). Estas tareas son necesarias para evaluar la calidad y el rendimiento óptimo de los módulos. Asimismo, se

realizaron ensayos específicos a inversores y seguidores solares para verificar el cumplimiento de los requisitos técnicos predefinidos.

Estos son algunos de los proyectos que ha desarrollado la empresa seleccionada para la evaluación del informe de la investigación realizada, por lo que se estimó con suficiente experiencia a evaluar los ítems propuestos, de lo cual se puede detallar los resultados en la siguiente tabla.

**Tabla 7**

*Formato evaluación del estudio que se llevó a cabo*

					
Preguntas:	Escala de Valoración				
	1	2	3	4	5
<b>Estudio de mercado:</b>					
• Análisis de la demanda energética actual y futura de la zona.				x	
• Identificación de los potenciales clientes y sus necesidades energéticas.				x	
• Identificación de los principales competidores en el mercado.			x		
<b>Contexto y justificación del proyecto:</b>					
• Descripción del contexto socioeconómico y energético de la zona de estudio					x
• Razones por las que se considera importante el análisis del potencial energético solar en las zonas rurales de Barrancabermeja					x
• Objetivos específicos del proyecto					x
<b>Metodología del proyecto</b>					
• Descripción detallada de la metodología utilizada para analizar el potencial energético solar en las zonas rurales de Barrancabermeja					x
• Inclusión de mapas, datos, y herramientas utilizadas para el análisis					x
• Especificación de los criterios utilizados para seleccionar los sitios donde se realizará el análisis					x

**Tabla 3***(Continuación)*

<b>Preguntas:</b>	<b>Escala de Valoración</b>				
	1	2	3	4	5
<b>Evaluación de la ubicación:</b>					
• Identificación de las zonas con mayor potencial solar de la región.					X
• Análisis de las características geográficas y climáticas de la zona.					X
• Evaluación de la disponibilidad de terrenos aptos para la instalación de paneles solares.					X
<b>Análisis de recursos</b>					
• Evaluación de la disponibilidad y calidad de la radiación solar en la zona.					X
• Identificación de los recursos técnicos necesarios para el proyecto.					X
• Evaluación de la disponibilidad de agua y otros recursos necesarios para la generación de energía fotovoltaica.					X
<b>Análisis económico-financiero:</b>					
• Estimación del costo de inversión del proyecto.				X	
• Análisis de los ingresos y gastos del proyecto.				X	
• Evaluación de la rentabilidad y el retorno de la inversión del proyecto.				X	
<b>Evaluación ambiental:</b>					
• Identificación de los impactos ambientales del proyecto.				X	
• Evaluación de las medidas de mitigación y compensación necesarias para minimizar los impactos ambientales.				X	
<b>Resultados del análisis</b>					
• Resumen de los resultados del análisis del potencial energético solar en las zonas rurales de Barrancabermeja					X
• Inclusión de mapas, gráficos y otros datos relevantes para la evaluación					X
• Identificación de los sitios con mayor potencial para la generación de energía fotovoltaica					X

**Tabla 3***(Continuación)*

Preguntas:	Escala de Valoración				
	1	2	3	4	5
<b>Evaluación técnica del proyecto</b>					
• Descripción de los aspectos técnicos del proyecto de generación de energía fotovoltaica propuesto					x
• Se realizó una evaluación para determinar la viabilidad técnica del proyecto, basándose en los resultados del análisis del potencial energético solar en la zona de estudio.					x
Comentarios: como institución desarrolladora de proyectos de producción de energía sustentable, como la fotovoltaica, creemos que el estudio analizado representa una oportunidad para evaluar más a fondo la viabilidad de llevar a cabo un proyecto de producción de energía fotovoltaica en la zona, tomando en cuenta los detalles presentados acerca del potencial energético y la demanda que se tiene para este tipo de energía. Por lo que se estima, genera suficiente información para llevar a cabo estudios a profundidad con la intención de desarrollar proyectos de esta naturaleza en la región de la mano de las políticas de producción energética del país.					

*Nota.* Elaboración propia.

De lo cual se puede inferir que resulta de especial significancia la información presentada en el informe final con relación a demanda y cubrimiento de esta a partir de la identificación del potencial energético de la zona rural de Barrancabermeja, Colombia, que como se pudo evidenciar, está por el orden de los 5,8 Kwh/m<sup>2</sup>/día.

## 11 Conclusiones

Las conclusiones del estudio realizado son las siguientes:

En cuanto al potencial de la oferta energética solar en zonas rurales de Barrancabermeja, se pudo determinar que existe un gran potencial en la oferta energética solar en las zonas rurales de Barrancabermeja, lo que se debe principalmente a su ubicación geográfica y las características climáticas de la región. Siendo este un objetivo clave para entender las posibilidades de una transición energética hacia fuentes renovables en la región. La revisión documental del tema proporcionó información valiosa sobre las condiciones climáticas, geográficas y socioeconómicas de la región, así como las políticas públicas y los incentivos existentes para la implementación de proyectos de energía solar en las zonas rurales.

Al analizar la información disponible, se pudo determinar el potencial de la energía solar en términos de capacidad de generación, viabilidad técnica y posibles barreras a la implementación. Además, se logró identificar las necesidades y expectativas de las comunidades locales con respecto a la energía solar, así como los obstáculos sociales, culturales y políticos que podrían dificultar la transición hacia fuentes renovables.

Por otro lado, la identificación del potencial de la oferta energética solar en las zonas rurales de Barrancabermeja puede ser un primer paso importante para diseñar y desarrollar proyectos de energía solar a pequeña y gran escala que sean sostenibles y adecuados para las necesidades de las comunidades locales. Los resultados de esta investigación pueden ser utilizados por los actores locales, como las empresas de servicios públicos, las organizaciones no gubernamentales y el gobierno local, para planificar e implementar proyectos de energía solar que promuevan el desarrollo económico y social de la región, al mismo tiempo que contribuyen a la mitigación del cambio climático y la reducción de la huella de carbono.

Por tanto, la identificación del potencial de la oferta energética solar en las zonas rurales

de Barrancabermeja es un objetivo crucial para avanzar hacia una transición energética sostenible y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

Para el cubrimiento de la demanda energética con energía solar, se concluye que es posible cubrir una parte importante de la demanda energética de la zona a partir del uso de energía solar.

No obstante, se debe tener en cuenta el incremento del uso energético de la zona para poder establecer un balance adecuado entre oferta y demanda energética.

Esto con base al análisis efectuado tomando en cuenta el incremento del uso energético de la zona partiendo de la demanda actual y futura, con factores como el crecimiento demográfico, el aumento de consumo, el desarrollo económico y empresarial de esta zona del país, además de la viabilidad técnica y económica de la generación de energía solar de esta región. Todo lo cual constituye un objetivo clave para comprender la viabilidad de una transición energética hacia fuentes renovables en la región y para identificar posibles soluciones a los problemas de acceso y cobertura de la energía.

Con relación a las estrategias para el sistema energético, se describen estudios llevados a cabo en la zona en estudio y en otras regiones del país con el propósito de establecer diversas estrategias para el desarrollo de un sistema energético sustentable a partir de la energía solar. Entre ellas se destacan la promoción del uso de tecnologías más eficientes, la diversificación de fuentes energéticas y la implementación de políticas públicas que fomenten la inversión en energías renovables.

Finalmente, en cuanto a la evaluación de la investigación realizada por una empresa de energía fotovoltaica, fue seleccionada la empresa Enertis Applus, por su experiencia y amplio portafolio de productos y proyectos llevados en países del continente, entre los que se tiene Chile, México, Brasil y Estados Unidos. La evaluación realizada por la empresa de energía fotovoltaica fue positiva, demostrando que la generación y distribución de energía a partir de



fuentes renovables es una opción viable y rentable en la zona de estudio. Además, se han identificado áreas de mejora en el proceso de implementación de la tecnología y en la capacitación de los usuarios finales.

### Referencias Bibliográficas

- Abdelrazik, M., Abdelaziz, S., Hassan, M., & Hatem, T. (2022). Climate action: Prospects of solar energy in Africa. (Acción climática: Perspectivas de la energía solar en África). *Energy Reports*(8), 11363–11377.
- Acebedo, R. G. y Santamaria, J.D. (2017). *Evaluación del Potencial de Energía Solar en Santander, Colombia*. Universidad Autónoma de Bucaramanga, Bucaramanga, Santander, Colombia.
- Ayodele, T., Ogunjuyigbe, A., & Nwakanma, K. (september de 2021). Solar energy harvesting on building's rooftops: A case of a Nigeria cosmopolitan. *Renewable Energy Focus*, 38.
- Bautista, M. (2015). *Diseño de una planta termosolar con receptor central*.
- Becerra Sánchez, J. (2017). *Revisión de la radiación promedio de los municipios de la provincia de mares-Santander–Bucaramanga*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25117.72164>.
- Bnamericas. (9 de julio de 2020). *Los principales proyectos solares en Colombia* . Obtenido de <https://www.bnamericas.com/es/reportajes/los-11-principales-proyectos-solares-de-colombia>
- Castro Feria, J.J. y Hernández Moreno, O.D. (2010). *Definición de características técnicas y económicas de tres zonas no interconectadas de Colombia para la implementación de fuentes renovables de energía*. Universidad de la Salle.
- Chandel, R., Chandel, S. S., & Malik, P. (2022). Perspective of new distributed grid connected roof top solar photovoltaic power generation policy interventions in India (Perspectiva de la nueva energía solar fotovoltaica en la azotea conectada a la red distribuida Intervenciones de políticas de generac. *Energy Policy*(168).
- Consultora Deloitte. (2020). *Energía solar en Colombia: un análisis del potencial y las barreras*

*para su desarrollo.*

Dávila Matute, G. A. y García Mojica, L.E. (2020). *Estudio del comportamiento de un sistema de generación fotovoltaico con paneles solares integrado a la red de suministro energético y evaluación de la factibilidad para la implementación en la I.E. Liceo Amiguitos* . Unidades Tecnológicas de Santander .

Duarte Cristancho, S.A. y Gutiérrez Bermúdez, D.E.F. . (2020). *Infraestructura de medición avanzada en sistemas de distribución con generación distribuida en redes e instalaciones eléctricas de baja tensión para adoptar políticas en materia de eficiencia energética*. Unidades Tecnológicas de Santander .

Ecopetrol. (2021). *Grupo Ecopetrol, Cenit y AES pusieron en operación el Parque Solar San Fernando en el Meta*. Recuperado el febrero de 2023, de [https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?1dmy&page=detalleNoticias&urile=wcm%3apath%3a%2Fecopetrol\\_wcm\\_library%2Fas\\_es%2Fnoticias%2Fnoticias%2B2021%2Fgrupo-ecopetrol-ceni-aes-inauguraron-parque-solar-san-fernando#:~:text=El%20Grupo%20Ecopetrol%2C%](https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?1dmy&page=detalleNoticias&urile=wcm%3apath%3a%2Fecopetrol_wcm_library%2Fas_es%2Fnoticias%2Fnoticias%2B2021%2Fgrupo-ecopetrol-ceni-aes-inauguraron-parque-solar-san-fernando#:~:text=El%20Grupo%20Ecopetrol%2C%20)

El Espectador. (18 de enero de 2022). Colombia incrementó su demanda energética un 5,51 % en 2021. *El Espectador* . Obtenido de <https://www.elespectador.com/economia/colombia-incremento-su-demanda-energetica-un-551-en-2021/>

Espitia Rey, C. (2017). *Guía metodológica para la implementación de sistemas fotovoltaicos a pequeña a escala en Colombia. (Trabajo de grado, Maestría)*. Universidad de Santander.

Grupo Ecopetrol. (2020). Recuperado el febrero de 2023, de Grupo Ecopetrol contará con 8 parques solares en 2021: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?1dmy&page=detalleNoticias&urile=>

wcm%3Apath%3A%2Fecopetrol\_wcm\_library%2Fas\_es%2Fnoticias%2Fnoticias%2B2021%2Fgrupo-ecopetrol-tendra-8-parques-solares-en-2021

Grupo Ecopetrol. (2021). *Grupo Ecopetrol, Cenit y AES pusieron en operación el Parque Solar San Fernando en el Meta*. Recuperado el febrero de 2023, de [https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?1dmy&page=detalleNoticias&urile=wcm%3Apath%3a%2Fecopetrol\\_wcm\\_library%2Fas\\_es%2Fnoticias%2Fnoticias%2B2021%2Fgrupo-ecopetrol-ceni-aes-inauguraron-parque-solar-san-fernando#:~:text=El%20Grupo%20Ecopetrol%2C%](https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?1dmy&page=detalleNoticias&urile=wcm%3Apath%3a%2Fecopetrol_wcm_library%2Fas_es%2Fnoticias%2Fnoticias%2B2021%2Fgrupo-ecopetrol-ceni-aes-inauguraron-parque-solar-san-fernando#:~:text=El%20Grupo%20Ecopetrol%2C%20)

Li, G., Li, M., Taylor, R., Hao, Y., Besagni, G., & CN, M. (2022). Solar energy utilisation: Current status and roll-out potential (Utilización de energía solar: estado actual y potencial de implementación). *Applied Thermal Engineering*, 209.

Little, M., & Blanchard, R. (2022). Pre-feasibility methodology to compare productive uses of energy supplied by stand-alone solar photovoltaic systems: A Tanzanian case study. (Metodología de prefactibilidad para comparar usos productivos de la energía suministrado por sistemas solares. *Energy for Sustainable Development*(70), 497–510.

Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Plan Solar Colombia*.

Montoya-Duque, L., Arango-Aramburo, S., & Arias-Gaviria, J. (2022). Simulating the effect of the Pay-as-you-go scheme for solar energy diffusion in Colombian off-grid regions (Simulando el efecto del esquema de Pay-as-you-go para energía solar difusión en regiones aisladas de Colombia). *Energy* 244.

NASA. (2023). *Acceso a datos*. Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Ospina-Metaute, C., Medina-Garzón, L., & Betancur, E. (2022). Study of the optimal orientation of vertical surfaces in different thermal floors in Colombia for solar energy harvesting

- (Estudio de la orientación óptima de superficies verticales en diferentes condiciones térmicas. pisos en Colombia para aprovechamiento. *Solar Energy*, 239, 25–32.
- Ouria, M. (2019). Solar energy potential according to climatic and geometrical parameters of cities and buildings: A case-study from Tabriz City-Iran (Potencial de energía solar según condiciones climáticas y geométricas parámetros de ciudades y edificios: un estudio de ca. *Urban Climate*, 28.
- Pandya Swargoa, A., Wibowob, A., & Onodac, H. (2022). Reusing solar panels to improve access to information and communication in an off-grid village: A financial feasibility assessment (Reutilización de paneles solares para mejorar el acceso a la información y comunicación en un pueblo fuera de la red: una v. *Energy Reports*(8), 857–865.
- Pengcheng, W., Zhongbing, L., & Ling, Z. (2021). Sustainability of compact cities: A review of Inter-Building Effect on building energy and solar energy use (Sostenibilidad de ciudades compactas: una revisión del efecto entre edificios en uso de la energía solar y la energía de los edificios). *Sustainable Cities and Society* 72 (2021) 103035, 72.
- Pineda, J. (2020). *¿Qué es la energía solar fotovoltaica y cuáles son sus aplicaciones más comunes?* La Brújula Verde. Obtenido de <https://www.labrujulaverde.com/2020/03/que-es-la-energia-solar-fotovol>
- Pupo-Roncallo, O., Campillo, J., Ingham, D., Hughes, K., & Pourkashanian, M. (2020). Renewable energy production and demand dataset for the energy system of Colombia. (Producción y demanda de energías renovables conjunto de datos para el sistema energético de Colombia). *Data in brief*(28).
- Romero Campos, J. (2019). *Análisis ciclo vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos. (Trabajo de grado, Ing. Electro mecánica).*

Universidad de Chile. <https://doi.org/RECICLAJE DE PANELES SOLARES>

FOTOVOLTAICOS

Rueda Tovar, R. (2020). *Desarrollo de una central de energía solar fotovoltaica en edificio empresarial*. Universidad Pontificia Bolivariana.

Sánchez Molina, P. (2 de noviembre de 2020). *Celsia construirá en Colombia una planta solar de 80 MW*. Obtenido de <https://www.pv-magazine-latam.com/2020/11/02/celsia-construira-en-colombia-una-planta-solar-de-80-mw/>

Semana. (1 de septiembre de 2021). *La demanda de energía solar en Colombia sigue creciendo*. Obtenido de Semana: <https://www.semana.com/hablan-las-marcas/articulo/enel-x-ha-instalado-en-colombia-mas-de-5-mil-paneles-solares-que-reduciran-la-emision-de-872-tonelada-de-co2-al-ano/202100/>

Semana. (25 de febrero de 2022). El gran potencial en radiación solar que tiene Colombia, que supera en un 60 % al promedio mundial, ha atraído a múltiples empresas de todo el mundo que a diario, a lo largo y ancho del país, inauguran grandes proyectos de generación de energía solar que,. *Semana*.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2021). *Plan energético nacional 2050*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/>

Universidad de los Andes. (2019). *Evaluación del impacto de la generación distribuida con energía solar fotovoltaica en Colombia*. Uniandes.

Universidad del Valle. (2021). *Evaluación del potencial fotovoltaico en Colombia y su impacto en la reducción de emisiones de CO2*. Univalle.

Universidad Nacional de Colombia. (2019). *El potencial de la energía solar fotovoltaica en Colombia: una evaluación técnica y económica*.

Zelaya Aguilar, M. (2015). *Principios de la energía solar fotovoltaica*. Obtenido de

[https://es.overleaf.com/articles/principios-de-la-energia-solar-](https://es.overleaf.com/articles/principios-de-la-energia-solar-fotovoltaica/wzhydpgwckhw)

[fotovoltaica/wzhydpgwckhw](https://es.overleaf.com/articles/principios-de-la-energia-solar-fotovoltaica/wzhydpgwckhw)

Zsiborács, H., Pintér, G., Vincz, A., & Birkner, Z. (2021). Grid balancing challenges illustrated

by two European examples: Interactions of electric grids, photovoltaic power generation,

energy storage and power generation forecasting (Desafíos de equilibrio de la red

ilustrados por dos ejemplos europeos: Interacc. *Energy Reports*(7), 3805–3818.