

ANÁLISIS CONCEPTUAL DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR
FOTOVOLTAICA EN LA PROVINCIA DE SOTO NORTE EN EL DEPARTAMENTO DE
SANTANDER

PAULA ANDREA SERRANO BANDERA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2024

ANÁLISIS CONCEPTUAL DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR
FOTOVOLTAICA EN LA PROVINCIA DE SOTO NORTE EN EL DEPARTAMENTO DE
SANTANDER

PAULA ANDREA SERRANO BANDERA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director

Erik Giovany Montes Páez

Magister en Ingeniería de Hidrocarburos

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2024

DEDICATORIA

Dedicado a mi sobrino Jesús Gabriel Serrano Hernández, quien lleno de luz y alegría mi vida dejando una huella imborrable en ella.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por guiar mi camino y darme la fortaleza para culminar mis estudios. A mi familia, especialmente a mi papá, mi hermano, mi abuelo y mi tío, quienes siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo incondicional en cada paso que di.

Quiero dedicar un agradecimiento especial a mi mamá y a mis abuelas, quienes, con su amor, sacrificio y constante apoyo, me han permitido llegar hasta aquí. Ellas han sido mi inspiración y mi mayor fortaleza, y gracias a ellas soy la mujer que soy hoy. A todas ellas, les debo gran parte de este logro.

Finalmente, quiero dar gracias a todas y cada una de las personas que hicieron parte de mi proceso y que me acompañaron este largo camino.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander por brindarme una sólida formación académica y profesional a lo largo de mi carrera. Su apoyo ha sido fundamental en el desarrollo de esta tesis y en mi crecimiento como ingeniera.

También quiero agradecer al Grupo de Investigación en Planeamiento Energético Galileo, por su constante apoyo y por proporcionarme el entorno adecuado para el desarrollo de esta investigación. Su compromiso con la excelencia académica fue clave en la culminación de este trabajo.

De manera especial, agradezco al Dr. Erik Giovany Montes Páez, mi director de tesis, por su guía, dedicación y consejos a lo largo de este proceso. Su orientación fue esencial para superar los desafíos y completar este proyecto con éxito.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	21
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBELMA	21
2. JUSTIFICACIÓN	23
3. OBJETIVOS	24
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	24
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3. MARCO REFERENCIAL	25
3.1 MARCO TEÓRICO.....	25
3.1.1 Contexto Energético Actual de las Energías Renovables	25
3.1.2 Energía Solar	26
3.1.2.1 Energía solar fotovoltaica	27
3.1.2.2 Tipos de Plantas Solares.....	28
3.1.3 Medición del Potencial de la Radiación Solar.....	28
3.1.3.1 Instrumentos Básicos	29
4. Metodología.....	33
4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	33
4.2 ENFOQUE.....	34
4.3 MÉTODO.....	34
4.4 PASO METODOLÓGICOS DE DESARROLLO	35
5. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO	37
5.1 IDENTIFICACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA DETERMINACIÓN DE POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	37
5.2 RECOPIACIÓN DE DATOS GEOGRÁFICOS, METEOROLÓGICOS Y AMBIENTALES QUE PERMITAN CALCULAR EL POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	39

6. RESULTADO DEL TRABAJO DE GRADO	45
6.1 Metodologías para determinación del potencial de energía solar	45
6.1.1 Medios de Recolección de Datos	45
6.2. RECOPIACIÓN DE DATOS GEOGRÁFICOS, METEOROLÓGICOS Y AMBIENTALES PARA EL CÁLCULO DE POTENCIAL	73
6.2.1. Datos Geográficos de la Provincia de Soto Norte	73
6.3. CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA EN SOTO NORTE	84
5. CONCLUSIONES.....	140
6. RECOMENDACIONES	143
BIBLIOGRAFÍA	145

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Metodologías para Determinación del Potencial de Energía Solar	38
Figura 2 Metodología para la Identificación de los Datos Geográficos, Meteorológicos y ambientales para determinar el Potencial de Energía Solar Fotovoltaica	40
Figura 3 Radiómetro desarrollado por DES	46
Figura 4. Topografía y Relieve de Soto Norte – Elevaciones	74
Figura 5 Características Hidrográficas de Soto Norte	75
Figura 6 Actividad Económica y Uso de Suelo	77
Figura 7 Nivel de Precipitación de la Provincia Soto Norte	79
Figura 8 Vientos de Soto Norte	80
Figura 9 Ubicación de Provincia de Soto Norte – Santander	84
Figura 10 Radiación Solar de Santander	85
Figura 11 Radiación Solar Promedio en Santander – Enero (IDEAM)	86
Figura 12 Radiación Global y Difusa – Provincia de Soto Norte – Mes de Julio 2023 ...	88
Figura 13 Inicio de SAM	89
Figura 14 Selección de Modelo de Simulación.....	90
Figura 15 Características de Análisis del Modelo de Simulación	92
Figura 16 Áreas Óptimas para el desarrollo de proyectos eólicos y solares en la Provincia de Soto Norte	94
Figura 17 Áreas con Restricción para el Desarrollo de Sistemas Fotovoltaicos	95
Figura 18 Restricciones Físicas para el Desarrollo de los Proyectos Solares y Eólicos de Soto Norte	96
Figura 19 Restricciones Económicas para proyectos solares en Soto Norte.	98
Figura 20 Solar Research Library.....	100
Figura 21 Descarga de Datos Climáticos	101
Figura 22 Colocación de Ubicaciones Múltiples	101
Figura 23. Polígono 1	103

Figura 24 Información de Datos Climáticos Cargados	103
Figura 25 Módulo Solar – SunPower E19-310	104
Figura 26 Módulo Inversor.....	104
Figura 27 Tamaño del Proyecto en AC < 100 m	105
Figura 28 Configuración de Tamaño en DC.....	106
Figura 29 Configuración de Seguimiento y Orientación	106
Figura 30 Pérdidas Anuales de Irradiancia por Suciedad	107
Figura 31 Pérdidas en DC.....	107
Figura 32 Costos Directos de Capital.....	108
Figura 33 Costos Indirectos de Capital	109
Figura 34 Impuesto por Ventas	109
Figura 35 Parámetros de Análisis	110
Figura 36 Financiación de la Construcción	110
Figura 37 Inicio de Simulación	111
Figura 38 Simulación Polígono 1 – Inclinación 0° - 1 axis	111
Figura 39 Simulación Polígono 1 – Inclinación 10° - 1 axis.....	113
Figura 40 Simulación Polígono 1 – Inclinación 20° - 1 axis.....	114
Figura 41 Simulación Polígono 1 – 2 axis	115
Figura 42 Polígono 4 Simulación 1 - inclinación 0° – 1 axis	116
Figura 43 Polígono 2 Simulación 2 - inclinación 10° – 1 axis	119
Figura 44 Polígono 2 Simulación 3 - inclinación 20° – 1 axis	120
Figura 45 Polígono 2 Simulación 4 - 2 axis	121
Figura 46 Polígono 2 con cambio de módulo fotovoltaico	122
Figura 47 Polígono 2 con cambio de módulo fotovoltaico	123
Figura 48 Modificación System Desing	126
Figura 49 Costos de Instalación	126
Figura 50 Resultados de Simulación del Polígono 1	127
Figura 51 Resultado de Costos de Instalación	128
Figura 52 Comportamiento de la Energía Solar en el Primer año (kWh)	129
Figura 53 Comportamiento de Eficiencia del Proyecto en 25 años	130

Figura 54 Tamaño del arreglo para polígono 2	131
Figura 55 Costos de Instalación de Polígono 2	131
Figura 56 Resultado del Polígono 2	132
Figura 57 Desempeño del Proyecto en el Primer año	133
Figura 58 Generación de Electricidad de la Red a 25 años	134

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1 <i>Características de la Base de Datos Surface Meteorology and Solar Energy</i> ...	51
Tabla 2 <i>Variables y Datos Proporcionados por DDS de la NASA</i>	52
Tabla 3. <i>Aplicaciones de Desarrollo de Surface Meteorology and Solar Energy</i>	53
Tabla 4 <i>Características de la Base de Datos National Renewable Energy Laboratory (NREL)</i>	54
Tabla 5 <i>Variables y Datos Proporcionados por National Renewable Energy Laboratory (NREL)</i>	55
Tabla 6 <i>Aplicaciones por National Renewable Energy Laboratory (NREL)</i>	55
Tabla 7 <i>Características de ArcGIS</i>	56
Tabla 8 <i>Componentes de ArcGIS</i>	57
Tabla 9 <i>Aplicaciones de ArcGIS</i>	57
Tabla 10 <i>Características de QGIS</i>	58
Tabla 11 <i>Componentes de QGIS</i>	59
Tabla 12 <i>Aplicaciones de QGIS</i>	59
Tabla 13 <i>Características de PVGIS</i>	61
Tabla 14 <i>Componentes de PVGIS</i>	62
Tabla 15 <i>Cálculo de Radiación Solar</i>	62
Tabla 16 <i>Cálculo de Rendimiento Fotovoltaico</i>	63
Tabla 17 <i>Características Principales de HOMER Pro</i>	64
Tabla 18 <i>Componentes Principales de HOMER Pro</i>	65
Tabla 19 <i>Simulación de Sistemas de Energía Híbrida</i>	65
Tabla 20 <i>Optimización de Sistemas</i>	66
Tabla 21 <i>Análisis de Sensibilidad</i>	66
Tabla 22 <i>Características de SAM</i>	67
Tabla 23 <i>Componentes de SAM</i>	68

Tabla 24 Simulación de Producción de Energía.....	68
Tabla 25 Análisis Financiero	69
Tabla 26 Modelado de Tecnologías Diversas	69
Tabla 27 Análisis Comparativo de Herramientas de Modelado y Simulación	70
Tabla 28 Resumen de Actividades Económicas de Soto Norte – Santander.....	76
Tabla 29 Niveles de Radiación Solar Promedio	86
Tabla 30 Parámetros Característicos para el Modelo de Simulación	90
Tabla 31 Criterios de Ubicación de Sistemas de Energía Solar	93
Tabla 32 Polígonos Geográficos de Menor Pendiente	102
Tabla 33 Comparativa de Escenarios con Cambio de Módulo Fotovoltaico	124
Tabla 34 Escenarios.....	125
Tabla 35 Comparativa de Resultados	135
Tabla 36 Polígonos de inclinación de 0% a 5%.....	137
Tabla 37 Polígonos de inclinación de 6-10%	138

GLOSARIO

CAPACIDAD INSTALADA: potencial total de producción de energía de una planta fotovoltaica o sistema solar instalado en una región.

CELDA FOTOVOLTAICA: dispositivos que convierten la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico.

DESARROLLO SOSTENIBLE: desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades, aplicado aquí en el contexto de la generación de energía solar.

EFICIENCIA ENERGÉTICA: relación entre la energía útil producida y la energía total recibida, maximizada en sistemas fotovoltaicos para mejorar su rendimiento.

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA: energía obtenida mediante la conversión directa de la luz solar en electricidad utilizando celdas fotovoltaicas.

ENERGÍAS RENOVABLES: fuentes de energía que se regeneran naturalmente, como la solar, eólica, hidroeléctrica y biomasa.

FACTIBILIDAD TÉCNICA: evaluación de la viabilidad de implementar tecnologías solares en una región determinada, considerando aspectos técnicos y logísticos.

GENERACIÓN DISTRIBUIDA: producción de electricidad cercana al punto de consumo, como en instalaciones solares domésticas o comerciales.

IMPACTO AMBIENTAL: efectos que las instalaciones solares pueden tener sobre el entorno natural y social, incluyendo aspectos positivos y negativos.

INVERSOR SOLAR: dispositivo que convierte la corriente continua (CC) generada por las celdas fotovoltaicas en corriente alterna (CA) utilizable por la red eléctrica.

IRRADIACIÓN SOLAR: cantidad de energía solar recibida por unidad de área, normalmente medida en kWh/m^2 por día o año.

MATRIZ ENERGÉTICA: Composición de las diferentes fuentes de energía que abastecen la demanda de electricidad en una región o país.

PANEL SOLAR: Conjunto de celdas fotovoltaicas agrupadas para captar y convertir la energía solar en electricidad.

POTENCIAL SOLAR: Capacidad de una región para generar energía solar, determinada por factores como la irradiación solar y las condiciones climáticas.

RED ELÉCTRICA: Sistema de transmisión y distribución de electricidad desde los puntos de generación hasta los consumidores finales.

REGULACIÓN ENERGÉTICA: Normativas y leyes que gobiernan la producción, distribución y consumo de energía en una región, afectando el desarrollo de proyectos solares.

SANTANDER: Departamento de Colombia donde se encuentra la provincia de Soto Norte, el área de estudio para el proyecto de energía solar.

SOSTENIBILIDAD: Capacidad de desarrollar proyectos energéticos que no comprometan los recursos naturales a largo plazo y minimicen el impacto ambiental.

SOTO NORTE: Región en el departamento de Santander, Colombia, que se considera para el análisis de potencial solar fotovoltaico.

VIABILIDAD ECONÓMICA: Análisis de los costos y beneficios asociados a la implementación de proyectos de energía solar, incluyendo inversiones y retornos financieros.

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS CONCEPTUAL DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA PROVINCIA DE SOTO NORTE EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER *

AUTOR: PAULA ANDREA SERRANO BANDERA **

PALABRAS CLAVE: ENERGÍA SOLAR, PANEL FOTOVOLTAICO, POTENCIAL ENERGÉTICO, PROVINCIA SOTO NORTE

DESCRIPCIÓN: Con la finalidad de realizar un análisis conceptual del potencial de generación de energía solar en la Provincia de Soto Norte en el departamento de Santander.

El trabajo se inició con recopilación documental de las metodologías que se emplean para determinar el potencial de energía solar, de modo que se identificaron sus ventajas y desventajas. En la segunda parte, se realizó recolección de información relacionada a datos geográficos, meteorológicos y ambientales que influyen en el cálculo de potencial de energía solar fotovoltaica en la zona de estudio. Por último, a partir de la información recopilada se planteó una cuantificación teórica del potencial de los recursos disponibles para generación de energía solar, a partir de sistemas fotovoltaicos. La metodología empleada estuvo basada en la recopilación de datos, trabajos e informes de entidades del orden nacional del lugar del proyecto, bajo una investigación descriptiva con enfoque mixto. Los resultados encontrados en la investigación mostraron que, para realizar la evaluación de potencial de energía solar en la Provincia de Soto se empleó con el software SAM (System Advisor Model), de manera que para desarrollo de la simulación se tuvo en cuenta la ubicación geográfica, cercanía a infraestructuras, cuerpos de agua y redes eléctricas, así como parámetros físicos, bióticos y políticos para establecer la viabilidad del proyecto. Además, se consideraron configuraciones de inclinación, seguimiento solar y módulos específicos como el Sunpower SPR-X21-255, los que ayudó a identificar la viabilidad de diferentes ubicaciones. De los dos polígonos que cumplieron con los criterios empleados, el Polígono 2 mostró un mejor rendimiento energético y menores costos que el Polígono 1.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Petróleos. Director: Erik Giovany Montes Páez. Magister en Ingeniería de Hidrocarburos. Codirector: Nombres y Apellidos completos. Título Académico completo de mayor rango.

ABSTRACT

TITLE: CONCEPTUAL ANALYSIS OF THE POTENTIAL FOR PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY GENERATION IN THE PROVINCE OF SOTO NORTE IN THE DEPARTMENT OF SANTANDER *

AUTHOR: PAULA ANDREA SERRANO BANDERA **

KEY WORDS: Solar energy, photovoltaic panel, energy potential, Soto Norte province

DESCRIPTION: With the aim of conducting a conceptual analysis of the potential for solar energy generation in the Province of Soto Norte in the department of Santander.

The work began with the collection of documentation on the methodologies used to determine the potential of solar energy, identifying their advantages and disadvantages. In the second part, information related to geographic, meteorological, and environmental data that influence the calculation of photovoltaic solar energy potential in the study area was collected. Finally, based on the information gathered, a theoretical quantification of the potential of the available resources for solar energy generation using photovoltaic systems was proposed. The methodology used was based on the collection of data, works, and reports from national entities in the project's area, under a descriptive research with a mixed approach. The results found in the investigation showed that the evaluation of solar energy potential in the Soto Province was carried out using the SAM (System Advisor Model) software. For the simulation development, factors such as geographical location, proximity to infrastructure, bodies of water, and electrical grids, as well as physical, biotic, and political parameters, were considered to determine the project's feasibility. Additionally, tilt configurations, solar tracking, and specific modules like the Sunpower SPR-X21-255 were taken into account, which helped identify the viability of different locations. Of the two polygons that met the applied criteria, Polygon 2 showed better energy performance and lower costs than Polygon 1.

*Degree work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Academic Program. Director: Erik Giovany Montes Páez. Master in Hydrocarbon Engineering. Co-director: Full Name. Full highest academic title

INTRODUCCIÓN

A nivel global, se está impulsando el desarrollo de proyectos de energía limpia para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y minimizar el impacto ambiental. En este contexto, el uso de fuentes de energía renovables está en aumento¹. Entre las energías renovables más utilizadas se encuentran la solar y la eólica, debido a sus costos, mínimo impacto ambiental y bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Específicamente, la energía solar fotovoltaica se ha establecido como una de las energías renovables más populares a nivel mundial, gracias a su alta eficiencia y versatilidad². Los avances en la tecnología solar fotovoltaica y las políticas de apoyo a las energías renovables han impulsado su adopción desde pequeñas escalas, como en hogares, hasta grandes escalas industriales, satisfaciendo diversas necesidades energéticas (Bolaños Jiménez & Gómez Ramírez, 2023).

En un contexto en el que la demanda de energía eléctrica es en gran medida satisfecha por fuentes no renovables, es vital explorar y fomentar el uso de la energía solar como una alternativa sostenible y limpia. Sin embargo, existen diversos desafíos y obstáculos que deben superarse para lograr una transición exitosa hacia esta tecnología (Cevallos Sierra & Martín, 2018). La disponibilidad, viabilidad y rendimiento de la energía solar se sustentan en beneficios ambientales como la reducción de emisiones de carbono, mitigación del calentamiento global, diversificación energética y transición a energías limpias. Además, la energía fotovoltaica ha mostrado un crecimiento significativo entre

¹ TORRES ÁLVAREZ, Nicolas Esteban. Huella de Carbono y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) evitadas para la toma de decisiones frente al aprovechamiento de residuos sólidos en una empresa del sector textil. Trabajo de grado de Ingeniero Ambiental. Medellín. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería, 2022 1-39 p.

² ABED ANWARZAI, Mohammad; NAGASAKA, Ken. Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis. En Renewable and Sustainable Energy Reviews, Tokyo University of Agriculture and Technology. 2021, vol.71, p., 150-160

las energías alternativas a nivel mundial, con una tasa de crecimiento anual superior al 37%³.

Colombia ha decidido impulsar el desarrollo de proyectos para el uso masivo de la energía solar. Sin embargo, el país carece de estudios exhaustivos que permitan cuantificar detalladamente el potencial de energía solar fotovoltaica de cada zona, la confiabilidad de los recursos, la sostenibilidad de los costos de desarrollo, instalación y operación de proyectos, las limitaciones para su implementación y los impactos sociales asociados⁴. En este sentido, el grupo de investigación en planeamiento energético GALILEO ha propuesto el proyecto INERCIA (Inventario Nacional de Energías Renovables en Colombia), que busca determinar el potencial energético del país. Este proyecto pretende apoyar el desarrollo de la fase 1 del proyecto INERCIA, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander⁵.

Uno de los principales objetivos del Acuerdo de París es limitar el aumento medio de la temperatura global a 2 grados Celsius respecto a los niveles preindustriales y redoblar esfuerzos para no superar los 1,5 grados a finales de este siglo, alcanzando la neutralidad climática en 2050⁶. En línea con estos esfuerzos globales, se resalta la importancia de

³ IRENA. El futuro de la energía solar fotovoltaica. International Renewable Energy Agency. [Consultado: 14 de noviembre de 2019]. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_summary_2019_ES.pdf?Ia=en&hash=DE82F7DC53286F720D8E534A2142C2B8D510FB0B.

⁴ Baco Mundial. Colombia lidera el camino hacia la sostenibilidad en América Latina. Banco Mundial. [Consultado: 7 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2022/08/31/colombia-leading-the-path-to-sustainability-in-latin-america>.

⁵ Grupo Galileo. Galileo Grupo de Investigación en Planeamiento Energético. [Consultado: 2 de junio de 2024]. Disponible en: <https://grupogalileo.org/nuestro-grupo>

⁶ UNCC. ¿Qué es el Acuerdo de París?. Uniyed Natios Climate Change. [Consultado: 12 de diciembre de 2015]. Disponible en: <https://unfccc.int/es/most-requested/que-es-el-acuerdo-de-paris>

implementar nuevas tecnologías que maximicen el uso de los recursos disponibles, entre las cuales la energía solar fotovoltaica es una de las más destacadas.

El presente trabajo de grado tuvo como objetivo analizar de manera conceptual las diferentes metodologías disponibles para determinar el potencial de energía solar en la provincia de Soto Norte, en el departamento de Santander. Para ello, se recopilaron datos geográficos, meteorológicos y ambientales necesarios para cuantificar teóricamente el potencial de los recursos disponibles. Este análisis buscó proporcionar una base sólida para el desarrollo de proyectos de energía solar en la región, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética y a la reducción del impacto ambiental.

La justificación de este estudio radica en la urgente necesidad de diversificar las fuentes de energía en Colombia y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Además, la implementación de proyectos de energía solar fotovoltaica tiene el potencial de generar beneficios sociales y económicos, como la creación de empleos y el desarrollo de tecnologías limpias. En última instancia, este proyecto buscó apoyar los esfuerzos globales para combatir el cambio climático y promover el desarrollo sostenible a través del uso de energías renovables.

El enfoque metodológico utilizado en esta investigación se basa en la recopilación de datos, trabajos e informes de entidades nacionales del lugar del proyecto, bajo una investigación descriptiva con enfoque mixto. Esto permitió una evaluación integral del potencial de energía solar fotovoltaica en la provincia de Soto Norte, al proporcionar información para futuros proyectos de energía limpia en la región.

En el capítulo 1, se llevó a cabo una contextualización de la problemática, al identificar las causas y los efectos relacionados a la falta de investigaciones que analicen el potencial de energía solar en Colombia, esto como apoyo al grupo GALILEO, en el marco del proyecto INERCIA, para la reducción de los impactos de las energías convencionales.

En el capítulo 2 se presenta de forma detallada la justificación del proyecto, el capítulo 3 muestra el objetivo general y los objetivos específicos propuestos para el trabajo de grado. En el capítulo 4 se expone un marco referencial que busca contextualizar al lector sobre temas relacionados a las energías renovables, energía solar, energía solar fotovoltaica, tipos de sistemas de redes eléctricas fotovoltaicas, instrumentos, herramientas y software que permiten la medición del potencial de energía solar.

El capítulo 5 presenta la metodología empleada, el tipo de investigación, el enfoque, el método empleado y una descripción de los pasos metodológicos empleados para la obtención de la información y el análisis de los datos recolectados.

El capítulo 6 describe de forma detallada el proceso llevado a cabo para cada uno de los objetivos planteados para el desarrollo del trabajo de grado, describe las metodologías para la determinación del potencial de energía solar, presenta la forma en la que se recopilaron los datos geográficos, meteorológicos y ambientales, con el apoyo del grupo GALILEO y revisión de datos e información de entes nacionales, con base en datos iniciales de los últimos 4 años y posteriormente una búsqueda de información de 2010 a 2019.

Además, se presentan los resultados del trabajo, al describir los elementos de medición, los instrumentos, dispositivos, bases de datos climáticas y meteorológicas, y los softwares que se emplean para recolectar y almacenar la información que permite medir el potencial de generación de energía solar. Además, se exhibe una comparativa de los programas de simulación que se utilizan con mayor frecuencia, de modo que se logró seleccionar a SAM, como el programa idóneo para los requisitos del proyecto. Por otra parte, se muestran los resultados de los datos geográficos, actividades económicas del uso de suelos, características climáticas, así como datos ambientales.

También, se expone una descripción detallada de los procesos desarrollados para lograr la cuantificación del potencial de energía solar de la provincia de Soto Norte, de forma

que se presenta el desarrollo de los procesos de simulación con el software seleccionado, con un análisis de sensibilidad que tuvo en cuenta la localización geográfica, el módulo de panel solar, el modelo de inversor, los parámetros de diseño del sistema, las pérdidas características y estándar de este tipo de sistemas fotovoltaicos, las pérdidas por degradación de los dispositivos, costos de instalación y una evaluación financiera, de manera que al simular los parámetros se midiese el potencial de generación de energía solar en la zona del estudio.

El análisis del potencial de energía solar en la Provincia de Soto Norte, Santander, reveló que la recolección precisa de datos meteorológicos y geográficos es esencial para garantizar proyectos eficientes y sostenibles. La integración de software especializado como SAM permitió modelar diferentes configuraciones y escenarios, optimizando la ubicación y diseño de los sistemas solares para maximizar el rendimiento energético. Sin embargo, los resultados de las simulaciones muestran que, a pesar del buen potencial energético, los altos costos de capital y los desafíos financieros limitan la viabilidad económica de los proyectos, requiriendo incentivos financieros y estrategias para reducir los costos de instalación.

Para mejorar la rentabilidad de los proyectos solares en la región, es importante investigar mecanismos que reduzcan los costos de capital, incluyendo la optimización de materiales y procesos de instalación, así como la obtención de subsidios gubernamentales. Además, futuras investigaciones deben profundizar en el uso de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial para optimizar la producción energética y reducir costos. También se recomienda realizar estudios prospectivos que analicen cambios en las políticas energéticas y fluctuaciones del mercado, y evaluar los impactos ambientales y socioeconómicos de los proyectos para asegurar su sostenibilidad a largo plazo.

1. CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En un contexto donde la demanda de electricidad continúa desde una perspectiva mayoritariamente satisfecha por fuentes no renovables, es esencial explorar y promover el uso de la energía solar como una opción sostenible y limpia. Sin embargo, la transición hacia la energía solar enfrenta diversos desafíos que deben ser abordados para asegurar su éxito⁷.

Para Becerra⁸ (2020) la adopción y el rendimiento de la tecnología solar se basan en sus beneficios ambientales, como la reducción de emisiones de carbono, la mitigación del calentamiento global, la diversificación de las fuentes de energía y la transición hacia energías limpias. Según un informe de *National Geographic*⁹ (2022) e información del *Renewable Energy*¹⁰ (2021), el nivel de bajas emisiones de carbono que proporciona la energía solar, la presentan como una opción sostenible desataca el crecimiento de las

⁷ GIRALDO, María; VACCA RAMÍREZ, Raúl; URREGO QUINTANILLA, Andrés. Las energías alternativas: ¿una oportunidad para Colombia?. En Revista Punto de Vista. Repositorio Politécnico Grancolombiano. 2021, vol 9, num 1, p.1-88

⁸ BECERRA PÉREZ, Luis A.; GONZÁLEZ DÍAZ, Romel R.; VILLEGAS GUTIERREZ, Ana C. La energía solar fotovoltaica, análisis costo beneficio en los proyectos en México. Revista Internacional de Desarrollo Regional Sostenible), vol. 5, nro. 2, p. 1-12.

⁹ National Geographic. La energía solar y su potencial para ayudar a reducir el calentamiento global. National Geographic. [Consultado: 20 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/04/la-energia-solar-y-su-potencial-para-ayudar-a-reducir-el-calentamiento-global>

¹⁰ IEA. Renewable electricity. [Consultado: 5 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021/renewable-electricity?mode=market®ion=Latin+America&publication=2021&product=PV>

energías alternativas, al tomar como base datos la capacidad de generación aumentará a una media de 305 GW (gigavatios) de capacidad instalada a 2026.

A partir de la investigación de Thema y Roa¹¹ (2023), Colombia ha decidido acelerar el desarrollo de proyectos que permitan el uso masivo de la energía solar. No obstante, el país aún carece de estudios detallados que cuantifiquen de manera precisa el potencial de generación de energía solar fotovoltaica en cada región, así como la confiabilidad de los recursos, la viabilidad económica de los proyectos, los costos de instalación y operación, las limitaciones para su implementación y los impactos sociales asociados.

La falta de estos estudios necesarios tiene varias causas, dentro de las que se incluyen limitaciones en la financiación de la investigación, la ausencia de políticas de apoyo robustas y la carencia de datos precisos y actualizados sobre los recursos solares. Si esta problemática no se soluciona, los efectos se verán reflejados en la dependencia continuada de fuentes no renovables, lo que incrementará las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que, a su vez será un aporte al calentamiento global y sus consecuencias ambientales. Además, se perderá la oportunidad de diversificar la matriz energética del país, lo que podría aumentar la vulnerabilidad a fluctuaciones en los precios de combustibles fósiles y limitar el desarrollo económico sostenible.

¹¹ THEMA, Johannes; ROA GARCÍA, María Cecilia. La transición energética en Colombia: Situación actual, proyecciones, desafíos, narrativas y políticas públicas. Universidad de los Andes, Bogotá. 2022 1-39 p.

2. JUSTIFICACIÓN

El grupo de investigación en planeamiento energético GALILEO¹², ha propuesto el desarrollo del proyecto INERCIA (Inventario Nacional de Energías Renovables en Colombia) en el cual, se busca determinar el potencial energético del país. Este proyecto busca constituirse como un apoyo al desarrollo de la fase 1 del proyecto INERCIA, el cual comprende la ejecución de un proyecto de investigación financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander.

Entre uno de los principales objetivos del acuerdo de París ¹³se encuentran limitar el aumento medio de la temperatura global a 2 grados Celcius respecto a los niveles preindustriales, redoblar esfuerzos para no superar la cota de 1,5 grados a final de este siglo y alcanzar la neutralidad climática en 2050, en otras palabras, es reducir el CO2 liberado a la atmósfera (principal gas responsable del calentamiento global) por la actividad humana sea equivalente a la que absorben los sumideros naturales, como los bosques (CMNUCC, 2015). En concordancia con estos esfuerzos que han realizado las distintas naciones, se evidencia la importancia y necesidad de la implementación de nuevas tecnologías que permitan el aprovechamiento de los recursos al máximo, entre las principales fuentes que se contempla implementar esta la energía solar fotovoltaica.

¹² GALILEO Op. cit.

¹³ UNCC Op. cit.

3. OBJETIVOS

Para este trabajo de grado se plantea un objetivo general que abarca la idea principal a desarrollar, el cual se realizara por medio de dos objetivos específicos que permitirán alcanzar el objetivo general del trabajo de grado.

3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar de forma conceptual el potencial de generación de energía solar fotovoltaica en la provincia de Soto Norte en el departamento de Santander.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar las metodologías disponibles para la determinación del potencial de energía solar fotovoltaica, teniendo en cuenta sus ventajas y desventajas para ser aplicadas en el contexto colombiano.

Recopilar datos geográficos, meteorológicos y ambientales que permitan calcular el potencial de energía solar fotovoltaica en la Provincia Soto Norte del Departamento de Santander.

Cuantificar teóricamente el potencial de recursos disponibles para la generación de energía solar fotovoltaica en la Provincia Soto Norte del Departamento de Santander.

3. MARCO REFERENCIAL

En esta sección se presentan un bosquejo teórico y conceptual de los aspectos relevantes a temas relacionados a proyecto con el fin de establecer un base centrado en información importante para el proyecto, que logrará contextualizar al lector que se interese en adquirir nuevos conocimientos o contar con una base previa al desarrollo del trabajo de grado.

3.1 MARCO TEÓRICO

Para la realización del trabajo de grado es necesario entender el contexto energético actual de las energías renovables, cómo funciona la energía solar fotovoltaica y como se realiza la medición de esta energía, por lo tanto, se realiza la investigación mostrada a continuación.

3.1.1 Contexto Energético Actual de las Energías Renovables

Actualmente, la transición energética ha sido apoyada por diferentes países a nivel mundial, esto con el fin de contribuir a la conservación del medio ambiente, por lo cual, dentro de los planes de gobierno se han brindado diferentes incentivos para la implementación de proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER)¹⁴. Uno de los principales focos de atención en estas fuentes, se debe al bajo impacto ambiental que genera y que a su vez se cuenta con el recurso disponible, como lo son las energías eólica o solar. La implementación de esta fuente de energías renovables es una alternativa de cara a la transición energética sin dejar a un lado los recursos que actualmente se disponen para cubrir la demanda energética actual, cuyos

¹⁴ MINISTERIO DE ENERGÍA. Fuentes No Convencionales de Energía Renovable – FNCER: Ley 1715 de 2014. Ministerio de Energía. Bogotá. [Consultado: 10 de junio de 2024]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/fuentes-no-convencionales-de-energ%C3%ADa-renovable-fncer/>.

principales aportes provienen de los combustibles fósiles, lo que se busca es generar una coexistencia o complementar este tipo de recursos convencionales con aquellas fuentes de energía que pueden ser más limpias y a su vez presentar una alta eficiencia. Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la implementación de las energías renovables en el suministro eléctrico global pasará del 28,7% en 2021 al 43% en 2030, de las cuales las energías eólica y solar fotovoltaica, se prevé tendrán el mayor crecimiento¹⁵.

3.1.2 Energía Solar

La energía solar es el proceso mediante el cual se realiza la conversión a electricidad o calor aprovechando la radiación proveniente del sol. Principalmente para la implementación de este tipo de sistemas, es importante considerar el promedio de radiación solar en la zona de interés, debido a que la eficiencia de los sistemas solares depende de las horas de sol que recibe la zona diariamente¹⁶.

En los últimos años, las energías renovables, especialmente la energía solar, han tomado un papel importante a nivel global debido al incremento en su capacidad instalada y la reducción de costos, lo que ha llevado a un crecimiento exponencial. Según estudios del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)¹⁷, la energía solar es una de las pocas tecnologías limpias de baja emisión de carbono. Actualmente, se estima que la constante solar, es decir, la cantidad de energía solar que llega al borde de la atmósfera terrestre,

¹⁵ ACCIONA. La importancia de las energías renovables. Acciona: Energías renovables. [Consultado: 2 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.acciona.com/es/energias-renovables/?_adin=1385087718

¹⁶ ACCIÓN SOLAR. Conversión De Energía Solar A Energía Eléctrica: Proceso Detallado. Acción solar. [Consultado: 2 de junio de 2024]. Disponible en: <https://accion-solar.org/conversion-de-energia-solar-a-energia-electrica-proceso-detallado/>.

¹⁷ INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS. Energías Limpias: Tecnologías para Alcanzar las Metas de Reducción de Emisiones. MIT. [Consultado: 2 de junio de 2024]. Disponible en: <https://professionalprograms.mit.edu/es/programa-online-energias-limpias/>.

es aproximadamente 1,367 W/m². El aprovechamiento de la energía solar se da principalmente a través de dos formas: la energía solar fotovoltaica y la energía solar térmica

3.1.2.1 Energía solar fotovoltaica La energía solar fotovoltaica transforma de forma directa la radiación solar en energía eléctrica, utilizando el efecto fotovoltaico aplicado a un panel solar. Los paneles fotovoltaicos utilizan la luz solar para generar corriente continua. La energía generada pasa por un contador para ser cuantificada y posteriormente se convierte en alterna y de esta forma realizar el suministro de esta energía en la red local. Para que la energía solar fotovoltaica funcione debe cumplir con los siguientes requisitos¹⁸.

Al tener en cuenta la información de CELSIA¹⁹ (2018) para que la energía Solar se convierta en energía aprovechable y se pueda utilizar en un hogar, empresa o local, se necesita pasar por 4 etapas

En la primera etapa la energía solar entra a los paneles solares, en las cuales se emplea un dispositivo semiconductor denominado celda o célula fotovoltaica, que puede ser de silicio monocristalino, policristalino o amorfo, o bien otros materiales semiconductores de capa fina, que convierten esta energía solar en electricidad de corriente continua.

Posteriormente esta electricidad pasa a un inversor, dispositivo que convierte la electricidad que generaron los paneles solares, en electricidad de corriente alterna.

Luego esta electricidad de corriente alterna se inyecta al sistema eléctrico para suministrar la energía a las cargas eléctricas que están conectadas.

¹⁸ ACCIONA, Op. Cit.

¹⁹ CELSIA. Proyectos de energía solar que debes conocer en Colombia. CELSIA. 21 de junio de 2018. [Consultado: 2 de junio de 2024]. Disponible en: <https://www.celsia.com/es/blog-celsia/proyectos-de-energia-solar-que-debes-conocer-en-colombia/>.

El sistema debe contar con medidores de energía eléctrica bidireccionales que permitan saber la dirección del flujo de la energía para efectos de realizar las transacciones económicas requeridas.

3.1.2.2 Tipos de Plantas Solares A partir del trabajo de Awasthi & Shukla²⁰ (2020) se identificó que los tipos de plantas fotovoltaicas se pueden dividir en 2 tipos, conectadas a la red eléctrica y aisladas de la red eléctrica.

- **Conectadas a la Red Eléctrica**

Las instalaciones de autoconsumo con conexión con la red eléctrica son viviendas, empresas o huertas solares, que tienen conexión a la red eléctrica del lugar donde se encuentran, con la función de disminuir el costo de su consumo de energía; algunas de ellas incluso con el objetivo de generar más de lo que consumen para poder “vender” esta energía²¹.

- **Aisladas de la Red Eléctrica**

Las plantas fotovoltaicas aisladas a la red eléctrica son aquellas que se encuentran alejadas de los centros urbanos o sin acceso a la red de distribución eléctrica del sitio. Generalmente son instalaciones de baja potencia, que requieren el uso de baterías para almacenar la energía a utilizar cuando no hay radiación solar por baterías²².

3.1.3 Medición del Potencial de la Radiación Solar

²⁰ AWASTHI, Anshul; SHUKLA, Akash Kumar; MURALI, Manohar S.R.

²¹ NWAIGWE, K., MUTABILWA, P.; DINTWA, E. An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids. Materials Science for Energy Technologies, 2019, vol. 2, nro. 3, p. 629-633

²² ASUAMAH, Emmanuel Yeboah; GYAMFI, Samuel; DAGOUMAS, Athanasios. Potential of meeting electricity needs of off-grid community with mini-grid solar systems. Scientific African, 2021, vol. 11, p. 1-12

A la hora de empezar un proyecto basado en la generación de energía solar, es importante realizar los estudios geográficos, meteorológicos y ambientales en la zona que se va a llevar a cabo el proyecto, para poder determinar si es viable llevar a cabo el proyecto. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo estos estudios de medición.

3.1.3.1 Instrumentos Básicos Para Grossi (2001)²³ a la hora de realizar la medición del potencial de energía solar de una región es importante saber cuáles son los instrumentos básicos que se utilizan para la realización de esta tarea y de esta forma poder llevar a cabo un buen trabajo. De manera que a continuación se presenta y describen los principales instrumentos.

- **Medidor con sensor integrado**

Este medidor de radiación determina la potencia solar y facilita la medida de la intensidad luminosa que se realiza a través de las células solares de silicio monocristalino que posee. El procesador integrado de este medidor de radiación de energía solar admite la corrección automática para mantener la precisión básica de la medición en función de su ubicación, también permite la medición in situ de la generación de energía solar y la insolación, y una medición a largo plazo gracias a la memoria interna de los valores que incluye en el envío un programa de transmisión y análisis que además permite la medida solar comparativa de mínimas y máximas con baterías de litio que duran unos quince días continuos.

²³ GROSSI GALLEGOS, Hugo. Medición de la radiación solar en la superficie de la Tierra: instrumental y errores asociados. III Jornadas Iberoamericanas sobre Energías Renovables: Solarimetría. Universidad Nacional de Luján. Argentina. 2001. p.16

- Heliógrafo

El heliógrafo es un aparato que mide las horas de sol brillante. Sirve para medir la intensidad lumínica solar y la duración diaria de la insolación en un lugar, no la magnitud de la irradiancia, también conocido como telégrafo inalámbrico solar. Esta herramienta también indica la posición del sol en cada momento, lo que hace que pueda proporcionar información útil en meteorología, ciencia, agricultura, etc. Un heliógrafo es un heliómetro que lleva acoplado un dispositivo capaz de registrar, graficar o digitalizar, la duración del brillo solar.

- Pirheliómetro

El pirheliómetro es un dispositivo que mide la radiación directa de incidencia normal que va montado en un dispositivo electromecánico seguidor de Sol. Es decir, mide la radiación solar directa incidente sobre la superficie.

3.1.3.2 Estaciones Meteorológicas Al tomar como base los trabajos realizados por Garzón & Rincón (2017)²⁴ las estaciones meteorológicas son instalaciones que miden y registran regularmente las diversas variables meteorológicas de una zona, lo cual es un factor importante para el desarrollo de este trabajo, por lo tanto, a continuación, se muestran algunas de las utilizadas para la medición de energía renovable.

²⁴ GARZÓN GUZMÁN, Brian Yesid; RINCÓN CERÓN, María Fernanda. Diseño e implementación de un prototipo de estación meteorológica para la medición de variables ambientales. Trabajo de investigación Ingeniero Eléctrico. Bogotá. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ingeniería. Proyecto curricular de Ingeniería Eléctrica, 2017. 1-96 p.

- IDEAM

El IDEAM²⁵ proporciona una base de datos llamada Los Atlas que contienen información de las variables meteorológicas y productos agregados. Los resultados del Atlas Climatológico de Colombia muestran una descripción espaciotemporal de las variables meteorológicas a nivel nacional, departamental e incluso local.

El documento que entrega el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, es una herramienta para el desarrollo de las energías renovables en el país, la gestión del riesgo y la toma de decisiones climáticamente inteligentes. La versión 2018 del Atlas de Clima, Radiación y Viento de Colombia, contiene amplios aportes y avances con respecto a la última edición del 2005.

- Power Data Access Wiewer

Según información de Ryse Energy Power²⁶ el Data Access Viewer contiene parámetros relacionados con la meteorología y la energía solar formulados para evaluar y diseñar sistemas de energía renovable. Proporcionan acceso a conjuntos de datos casi en tiempo real por punto único, en tiempo real por región, parámetros climatológicos globales en un mapa cuadrículado y datos climatológicos personalizados por punto único.

²⁵ IDEAM. El IDEAM presenta los nuevos Atlas de clima, radiación y Viento de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM. 04 de junio de 2018. [Consultado: 2 de junio de 2024]. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/LdWW0ECY1uxz/content/el-ideam-presenta-los-nuevos-atlas-de-clima-radiacion-viento-de-colombia.

²⁶ RYSE ENERGY. Estimación de Producción Eólica y Solar. RYSE ENERGY. [Consultado: de junio de 2024]. Disponible en: <https://www.enair.es/es/app>

- **Meteostat**

Es una base de datos meteorológicos y climáticos que proporciona datos detallados de miles de estaciones meteorológicas y lugares de todo el mundo. Los datos son recopilados por diferentes miembros de la organización meteorológica mundial (OMM) y se comparten según los términos de la resolución 40 de la OMM²⁷.

- **Meteoblue**

Meteoblue produce datos meteorológicos de alta calidad en cualquier punto terrestre o marítimo a nivel mundial, la simulación del archivo de historia proporciona acceso a simulaciones climáticas, proporcionando información desde los últimos años. Dentro de esta información se puede encontrar la temperatura, las nubes y la velocidad y dirección del viento²⁸.

²⁷ METEOSAT. The Weather's Record Keeper. Meteosat. [Consultado: 3 de junio de 2024]. Disponible en: <https://meteostat.net/en/>

²⁸ METEOBLUE. The Weather Time. Meteoblue. [Consultado: 3 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/bogot%c3%a1_colombia_3688689#

4. METODOLOGÍA

Para establecer un proceso de desarrollo del trabajo de grado que se ajustara a los objetivos propuestos, en esta sección del trabajo se describe la metodología empleada para el proceso de investigación, esto al tomar como referente lo expuesto por Hernández Sampieri *et al.* (2016)²⁹ en su trabajo su metodología de la investigación y otros referentes teóricos y conceptuales.

4.1 Tipo de Investigación

Según Hernández *et al.* (2016)³⁰, la investigación descriptiva tiene como propósito principal especificar propiedades, características y perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier fenómeno que se someta a un análisis. Este tipo de investigación se enfoca en describir situaciones y eventos de manera detallada y sistemática. No se limita a la mera recolección de datos, sino que también implica la interpretación de estos datos para identificar patrones, tendencias y relaciones.

La investigación descriptiva aporta al trabajo de grado al permitir, a través de trabajos en investigaciones previas presentar una caracterización detallada de los factores geográficos, meteorológicos y ambientales de la región. Esto permitió establecer y describir las condiciones específicas que influyen en la viabilidad y eficiencia de la energía solar, lo que facilitó una comprensión precisa del contexto local y estableció una base documental para evaluar el potencial energético y desarrollar estrategias adecuadas para su aprovechamiento.

²⁹ HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto., FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos., & BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. Metodología de la Investigación. 6ta Edición. México. McGraw-Hill Interamericana. 2016, 624 p. [Consultado el 6 de junio de 2024]. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/0B7fKI4RAT39QeHNzTGh0N19SME0/view?resourcekey=0-Tg3V3qROROH0Aw4maw5dDQ>

³⁰ Ibid., p. 203.

4.2 Enfoque

El enfoque mixto en una investigación, según Hernández & Torres³¹ (2020), se refiere a la integración sistemática de los métodos cuantitativos y cualitativos en un solo estudio o en una serie de estudios relacionados. Esta combinación permite a los investigadores capitalizar las fortalezas de ambos enfoques y mitigar sus respectivas limitaciones, al proporcionar una comprensión más completa y profunda del fenómeno estudiado.

De manera específica, el enfoque mixto permitió la recolección y análisis de datos numéricos sobre factores como la irradiación solar, temperaturas promedio, patrones climáticos, y otros indicadores ambientales relevantes. Estos datos proporcionaron una base objetiva y medible para evaluar el potencial solar. Por otra parte, mediante este mismo enfoque, se logró el análisis de documentos, muestran la exploración percepción, experiencias y conocimientos de distintas investigaciones e información de entes del orden nacional. Esta información cualitativa ofreció una comprensión contextual y profunda de cómo se podría implementar la energía solar en la región.

4.3 Método

A partir de la definición dada por Hernández & Torres³² (2020) El método deductivo es un enfoque de razonamiento lógico que parte de premisas generales para llegar a conclusiones específicas. Este método es fundamental en el pensamiento científico y filosófico y se caracteriza por la aplicación de principios o teorías generales a casos particulares para derivar conclusiones que necesariamente se siguen de las premisas dadas.

³¹ GUAJARDO CANTÚ, Gerardo y ANDRADE DE GUAJARDO, Nora E. Contabilidad para no contadores [en línea]. 2 ed. México: McGraw-Hill Interamericana. 2012, 425 p. [Consultado el 6 de diciembre de 2016]. Disponible en: Base de datos McGraw Hill. <http://ezproxy.uao.edu.co:2061/book.aspx?i=372>

³² Ibid., p.248.

El método deductivo contribuyó significativamente a la investigación documental sobre el potencial de generación de energía solar fotovoltaica en Soto Norte, proporcionó una estructura lógica y permitió la aplicación de conocimientos previos, esto con el fin de evaluar la viabilidad y sostenibilidad, validar resultados y orientar futuras investigaciones. Esta metodología asegura que las conclusiones sean sólidas y basadas en principios bien establecidos, lo que asegura la calidad y la relevancia de la investigación. Además, el método deductivo permitió aplicar conocimientos y teorías previamente establecidas sobre la energía solar a la región específica de Soto Norte. Esto incluyó el uso de datos globales y regionales sobre irradiación solar, tecnologías fotovoltaicas, y modelos económicos para evaluar el potencial energético de la zona.

4.4 Paso Metodológicos de Desarrollo

De acuerdo con los objetivos planteados el trabajo de grado está dividido en tres etapas que se describen a continuación.

Etapas 1. Identificar las metodologías disponibles para la determinación del potencial de energía solar fotovoltaica.

Actividad 1. Mediante una revisión bibliográfica en diferentes fuentes se recopiló información sobre las metodologías disponibles para la obtención del potencial energético de la energía solar fotovoltaica.

Actividad 2. Analizar la información de cada una de las metodologías que se reunieron, al tener en cuenta las ventajas y desventajas

Actividad 3. Escoger la metodología para la determinación del potencial de energía solar fotovoltaica más adecuado según la información analizada.

Etapla 2. Recopilar datos geográficos, meteorológicos y ambientales que permitan calcular el potencial de energía solar fotovoltaica en la Provincia Soto Norte del Departamento de Santander

Actividad 1. Identificar posibles lugares de implementación de parques solares en los municipios del área de estudio.

Actividad 2. Recopilar la información necesaria para el cálculo de los potenciales de energía solar en los municipios de la Provincia Soto Norte del Departamento de Santander a partir de bases de datos especializadas.

Etapla 3. Cuantificación teórica del potencial de recursos disponibles para la generación de energía solar en la Provincia Soto Norte del Departamento de Santander.

Actividad 1. Verificar la calidad y confiabilidad de los datos contrastando valores de diferentes fuentes

Actividad 2. Calcular el potencial de energía solar usando las metodologías seleccionadas en la primera etapa del proyecto.

5. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

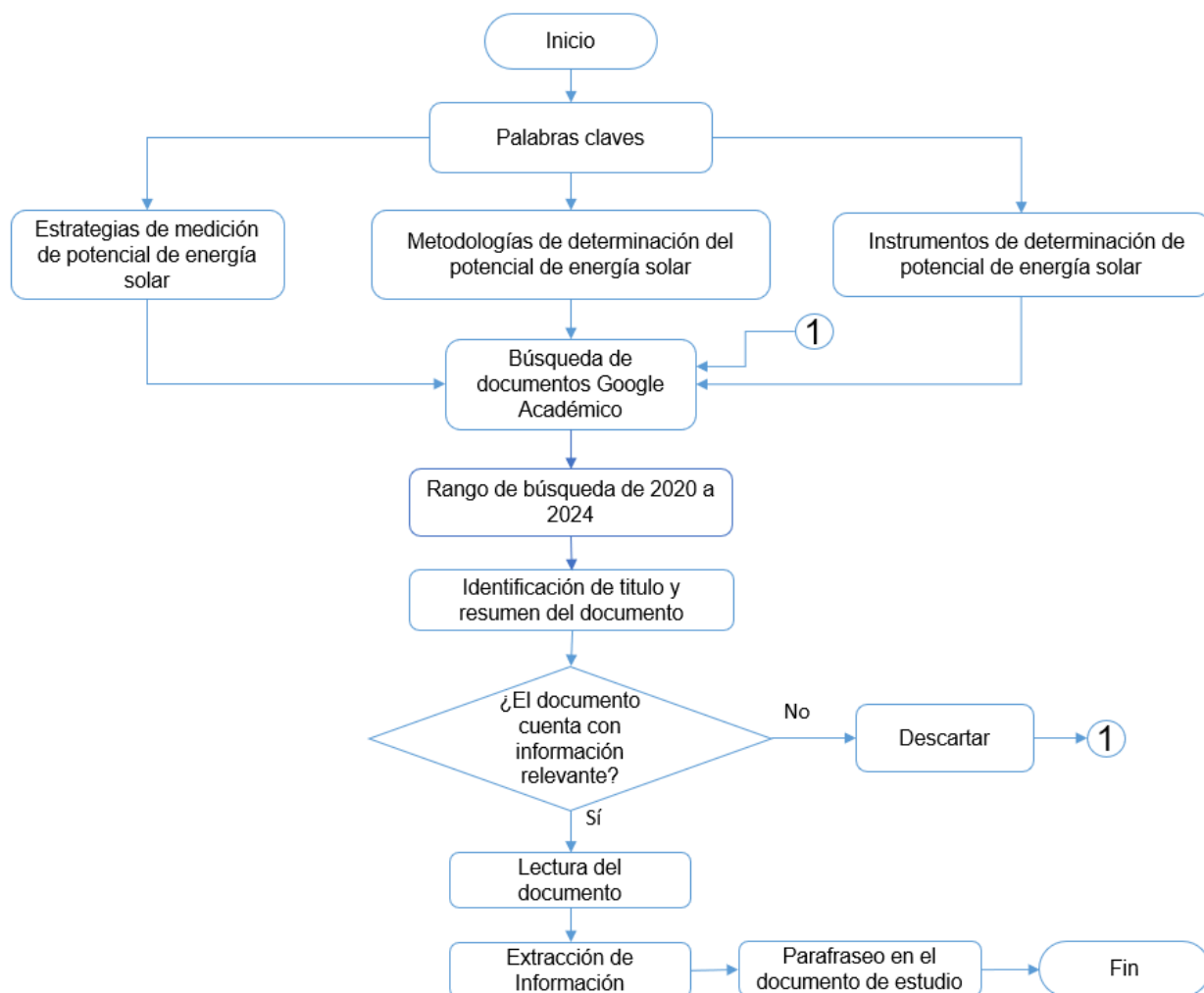
Al tener en cuenta que la investigación tuvo como objetivo principal realizar un análisis conceptual del potencial de generación de energía solar fotovoltaica en la Provincia de Soto Norte, Departamento de Santander.

En esta primera fase, se identificaron y evaluaron las diferentes metodologías disponibles para determinar el potencial de energía solar fotovoltaica. Esto incluyó la revisión de técnicas y enfoques utilizados en estudios previos y la evaluación de sus ventajas y desventajas. La segunda etapa se centró en la recopilación de datos geográficos, meteorológicos y ambientales necesarios para calcular el potencial de energía solar en la región. Estos datos incluyeron niveles de irradiación solar, patrones climáticos, características del terreno y otros factores que se describen en esta sección. Finalmente, se procedió a la cuantificación teórica del potencial de los recursos disponibles para la generación de energía solar en Soto Norte. Esto al tomar como base los datos recopilados y las metodologías identificadas, se estimó la capacidad de generación energética de la región, con el fin de una base documental para futuros proyectos de energía renovable en la zona de estudio.

5.1 Identificación de Metodologías para Determinación de Potencial de Energía Solar Fotovoltaica

Para identificar las metodologías que se aplican para la determinación del potencial energético relacionado a la energía solar fotovoltaica se realizó una revisión documental a partir de la identificación de material con búsqueda con la herramienta Google Académico, y el uso de palabras clave en este buscador de documentos y publicaciones científicas.

Figura 1. Metodologías para Determinación del Potencial de Energía Solar



Nota. La figura presenta los pasos metodológicos empleados para la búsqueda de las estrategias para la determinación de potencial de energía solar

El proceso llevado a cabo se presenta en la

Figura 1, el cual inició con la selección de las palabras clave para realizar la búsqueda, de manera que las palabras empleadas principalmente fueron estrategias de medición del potencial de energía solar, metodologías para determinación de potencial de energía solar e instrumentos de determinación del potencial de energía solar.

Con las palabras establecidas se ingresó al buscador Google Académico y se emplearon las palabras, esto dentro de un rango de búsqueda desde 2020 a 2024, esto con el fin de

identificar y seleccionar los documentos e información de mayor actualidad. Dentro del proceso, el buscador de documentos científico arrojó diversos resultados, a partir de las palabras empleadas, de modo que se procedió a leer el título de cada enlace, si el título contenía información potencial, se accedía a la página para leer el resumen, esto para identificar el objetivo del proyecto, los materiales y métodos empleados y los resultados, esto con el fin de establecer si la información era o no relevante para el proyecto. Si el documento estaba disponible para descarga se procedió a obtenerlos para realizar una lectura de la información del documento. La información relevante se extrajo y se parafraseo para ser agregada al documento del proyecto con su respectiva referencia en norma ICONTEC.

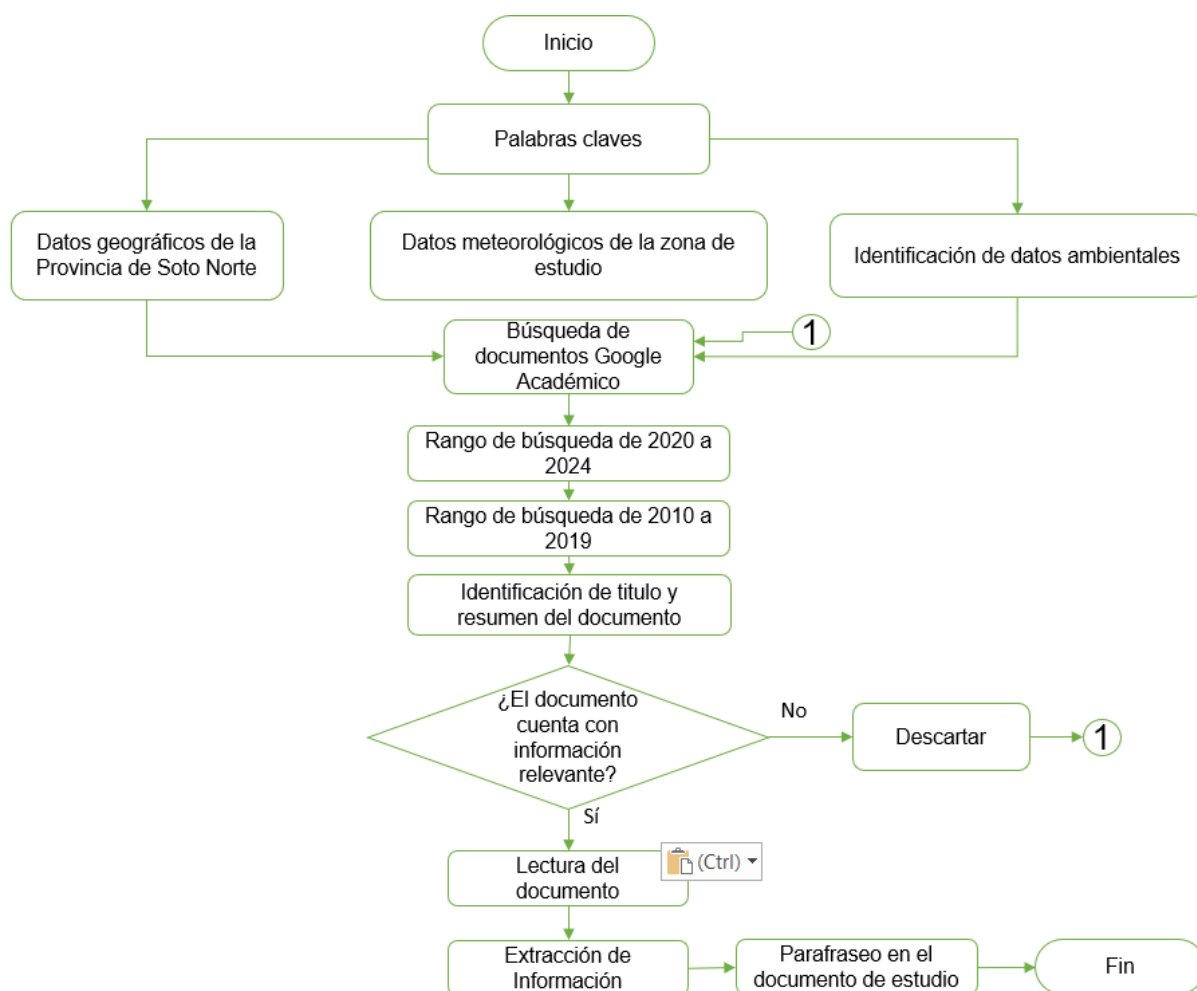
Con la información obtenida se desarrolló una identificación de las ventajas y desventajas de manera que se desarrolló una tabla comparativa para seleccionar la opción que conviene y se generaron conclusiones importantes para el trabajo de grado.

5.2 Recopilación de datos geográficos, meteorológicos y ambientales que permitan calcular el potencial de energía solar fotovoltaica

De forma similar a la identificación de las metodologías para la determinación del potencial de energía solar fotovoltaica, para establecer datos geográficos, meteorológicos y ambientales se realizó una búsqueda de información disponible desde entidades nacionales como el IDEAM, esto acompañado de trabajo y proyectos, que buscaron identificar los parámetros que influyen en la implementación de sistemas fotovoltaicos a nivel nacional e inclusive investigaciones sobre potencial de energía solar en la provincia de Soto Norte en Santander. Adicionalmente En la

Figura 2 se muestran los pasos metodológicos empleados para la recolección de los datos relevantes.

Figura 2 Metodología para la Identificación de los Datos Geográficos, Meteorológicos y ambientales para determinar el Potencial de Energía Solar Fotovoltaica



Nota. La figura presenta la forma en la que se realizó la búsqueda de datos geográficos, meteorológicos y ambientales

Como parte del proceso de búsqueda se emplearon palabras como datos geográficos de la provincia de Soto Norte, datos meteorológicos de Soto Norte e identificación de datos ambientales para la provincia de Soto Norte. Para esto recopilar la información se hizo uso de la herramienta Google Académico para búsqueda de investigaciones, artículos,

publicaciones y datos de entidades del orden nacional para establecer una base documental relevantes para el trabajo.

Adicionalmente para lograr la recolección de datos que permitan la identificación de información geográfica, meteorológica y ambiental para determinar el potencial de energía solar fotovoltaica en Soto Norte se llevaron a cabo los siguientes pasos metodológicos.

5.2.1 Definición del Área de Estudio

Se llevó a cabo una delimitación la Provincia Soto Norte, esto al utilizando datos geográficos y mapas cartográficos actualizados. De manera que se identificaron las coordenadas geográficas de interés dentro de esta área.

5.2.2 Recopilación de Datos Geográficos

Se buscó recolectar información topográfica, uso del suelo, presencia de áreas protegidas, y proximidad a la red eléctrica.

5.2.3 Identificación de Parámetros Clave

Radiación Solar: Se buscó determinar la irradiancia solar promedio anual y estacional en la región.

Temperatura Ambiental: se realizó una revisión documental que permitió establecer de qué forma las variaciones de temperatura que pueden afectar la eficiencia de los paneles solares.

Sombras y Obstáculos: Se buscó establecer en las áreas potenciales la presencia de sombras proyectadas por edificaciones, vegetación o accidentes geográficos que podrían reducir la captación solar.

Inclinación: se evaluó la inclinación natural del terreno y se buscó determinar la inclinación óptima de los paneles solares para maximizar la captación de radiación solar.

Disponibilidad de Espacio: se buscó verificar la existencia y la disponibilidad de áreas planas o con inclinación adecuada para la instalación de los paneles.

Conectividad a la Red Eléctrica: Se evaluó la proximidad y capacidad de la red eléctrica para integrar la energía generada.

Carreteras y Acceso: se analizó la accesibilidad de las áreas seleccionadas y la infraestructura vial para los procesos de instalación de los paneles solares en distintas áreas.

5.2.4 Recopilación de Datos Meteorológicos

Se realizó una recolección de datos históricos de radiación solar y temperatura y precipitaciones a partir de la información con la que cuenta Geomática sobre la provincial de Soto Norte.

Se analizó la variabilidad de estos parámetros para identificar los periodos más adecuados para la generación solar.

5.2.5 Recopilación de Datos Ambientales

Se evaluó la presencia de áreas protegidas, cuerpos de agua, y vegetación que podrían influir en la disponibilidad y accesibilidad para proyectos solares.

Se consideraron las regulaciones ambientales locales que puedan afectar la implementación de sistemas fotovoltaicos.

5.2.6 Procesamiento y Análisis de Datos

Simulación con SAM: Utilizar el software de modelado y simulación SAM para calcular el potencial de energía solar fotovoltaica en las áreas identificadas. Integrar los datos geográficos, meteorológicos y ambientales recopilados.

Análisis de Sensibilidad con SAM: Realizar un análisis de sensibilidad utilizando SAM para evaluar cómo diferentes variables cómo:

Zonas Óptimas: Evaluar cómo la selección de diferentes zonas impacta la producción y costos.

Costo de Instalación: Analizar variaciones en los costos debido a la dificultad del terreno y accesibilidad.

Dificultades de Acceso y Carreteras: Examinar cómo la infraestructura vial afecta los costos y viabilidad del proyecto.

Red Eléctrica: Considerar la proximidad y capacidad de la red para integrar la energía generada.

Análisis Económico: Realizar simulaciones financieras para evaluar el impacto de estas variables en el retorno de inversión y costos nivelados de energía.

5.2.7 Validación y Generación de Informes:

Comparar los resultados obtenidos con estudios previos o proyectos similares en regiones cercanas para validar la precisión del cálculo.

Elaborar un informe detallado que presente los hallazgos, recomendaciones y los parámetros clave que influyen en la implementación de sistemas fotovoltaicos en la Provincia Soto Norte.

6. RESULTADOS DEL TRABAJO DE GRADO

6.1 Metodologías para determinación del potencial de energía solar

Dentro del procesos de búsqueda se logró identificar diferentes medios que se emplean para establecer la potencia de energía solar fotovoltaica. La información recopilada se dividió en tres grupos, los cuales se describen a continuación:

6.1.1 Medios de Recolección de Datos

6.1.1.1 Instrumentos y Dispositivos Al tener en cuenta que para realizar el proceso de medición es necesario establecer elementos que permitan recolectar los datos, almacenarlos o enviarlos para su registro, se identificaron los instrumentos y dispositivos que se emplean para obtener estos datos.

- Radiómetro

Para Tamasi *et al.*³³(2021) un radiómetro es un dispositivo que se utiliza para medir la potencia de la radiación electromagnética, que incluye la luz visible, los rayos ultravioletas, los rayos infrarrojos. Existen diferentes tipos de radiómetros diseñados para medir distintos rangos de longitudes de onda y utilizar en diversas aplicaciones, desde la investigación científica hasta la tecnología de satélites meteorológicos.

Los radiómetros que fueron construidos con celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino que fue desarrollado y fabricado por el Departamento de Energía Solar (DES), que contó con 25 mm de lado. De ahí hacia adelante, se han desarrollado gran cantidad de modelos,

³³ TAMASI, Mariana; MARTÍNEZ, Mónica; Bolzi, Claudio; DÍAZ SALAZAR, Martha; FERNÁNDEZ VASQUEZ, Javier. Desarrollo de sensores fotovoltaicos de radiación solar para aplicaciones terrestres y especiales

pero acorde a necesidades específicas, de modo que se han desarrollado equipos para la medición de radiación solar PAR, la radiación UV, e inclusive prototipos que midan el Índice de Vegetación NVDI³⁴.

Figura 3 *Radiómetro desarrollado por DES*



Dentro de estos dispositivos se han desarrollado diferentes tipos como los que se tienen mayor utilización, los cuales se presentan a continuación:

Radiómetro de Crookes: También conocido como molino de luz, es un tipo simple de radiómetro que consiste en un bulbo de vidrio parcialmente vacío con un rotor de paletas en su interior. Las paletas tienen una cara negra y otra blanca. Cuando se expone a la luz, las paletas giran debido a la diferencia en la presión de radiación sobre las superficies de diferente color. Este efecto se debe al calentamiento diferencial del gas residual dentro del bulbo, y no al impulso directo de los fotones³⁵.

Radiómetro Bolométrico: Utiliza un bolómetro, que es un dispositivo que mide la energía de la radiación mediante la absorción de esta y la consiguiente subida de

³⁴ *Ibíd.*, p. 8.

³⁵ TORNICH, Vinicius. Guía Básico de Instrumentos Meteorológicos. Trabajo de investigación. Universidad de Sao Pablo. Facultad de Filosofía, Letras de Ciencias Humanas. Departamento de Geografía. 2020. p. 1-49

temperatura del material absorbente. Los cambios en la temperatura se convierten en una señal eléctrica proporcional a la cantidad de radiación recibida³⁶.

Radiómetro de Microondas: Mide la radiación de microondas, comúnmente utilizado en satélites para estudiar la atmósfera y el clima de la Tierra. Estos radiómetros pueden detectar la radiación térmica emitida por el agua, el hielo y la superficie terrestre.

Radiómetro Fotovoltaico: Emplea células solares para convertir la radiación solar en energía eléctrica. La corriente generada es proporcional a la intensidad de la radiación recibida³⁷.

- **Piranómetros**

Un piranómetro es un instrumento utilizado para medir la radiación solar global, es decir, la cantidad de energía solar recibida por una superficie horizontal. Este dispositivo es esencial en meteorología, climatología, y estudios de energía solar, ya que proporciona datos precisos sobre la radiación solar, lo que es crucial para diversos análisis y aplicaciones³⁸. Como parte de sus componentes, un piranómetro constas de las siguientes partes:

³⁶ GAMBOA LERENA, Martín Miguel. Polarización del Fondo Cósmico de Radiación: Buscando los modos B utilizando el experimento QUBIC de interferometría bolométrica. Tesis de Doctorado en Astronomía Universidad Nacional de la Plata. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. 2022. p. 1-139

³⁷ VIDELA, María E.; MARTÍNEZ BOGADO, Manuel y TAMASI, Mario E. Comparación entre un piranómetro clase B comercial y un radiómetro fotovoltaico desarrollado en el departamento de energía solar. En: Revista Energías Renovables y Medio Ambiente. San Martín, Departamento Energía Solar. Centro Atómico Constituyentes, enero-junio, 2020, vol. 46. p. 43 - 48. ISSN 2684-0073.

³⁸ RODRÍGUEZ ORDOLEZ, Freddi Roland, FEBRE MARTÍNEZ, Christian Raúl y CHANTA SANTOS, Eden. (2022). "Desarrollo de un Prototipo de Piranómetro para Medir la Radiación Solar". Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén, Carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. 2022. p. 1-82.

Cúpula de Vidrio o Cuarzo: Protege el sensor y filtra ciertas longitudes de onda no deseadas.

Sensor de Radiación: Generalmente compuesto por una termopila, que convierte la radiación solar en una señal eléctrica.

Cuerpo del Instrumento: Contiene los componentes electrónicos y mecánicos necesarios para el funcionamiento del sensor.

Ventilación: En algunos modelos se emplea para evitar la acumulación de polvo y humedad en la cúpula, manteniendo la precisión del instrumento.

6.1.1.2 Satélites

- Satélites Meteorológicos

Los satélites meteorológicos desempeñan un papel crucial en la medición y recolección de datos sobre la radiación solar, proporcionando una visión global y continua que complementa las mediciones locales realizadas por instrumentos como los piranómetros. Estos satélites están equipados con una variedad de sensores y instrumentos diseñados para monitorear diferentes aspectos de la atmósfera y la superficie terrestre³⁹.

La capacidad de estos satélites para recolectar datos precisos y continuos sobre la radiación solar es esencial para una amplia gama de aplicaciones, desde la predicción meteorológica hasta la planificación de proyectos de energía renovable. La integración de datos satelitales con mediciones terrestres permite un análisis más completo y preciso del balance energético de la Tierra y de los recursos solares disponibles⁴⁰.

³⁹ CALBET, Op. cit., p. 8.

⁴⁰ ROMERO JURE, Op. cit., p. 26.

- **Satélites Geoestacionarios**

Orbitan a una altitud de aproximadamente 36,000 kilómetros sobre el ecuador.

Permanecen fijos sobre un punto específico de la Tierra, proporcionando una cobertura continua de esa área. Algunos de los más reconocidos son el GOES (Estados Unidos), Meteosat (Europa), Himawari (Japón)⁴¹.

- **Satélites Polares**

Orbitan a altitudes entre 700 y 800 kilómetros, pasando cerca de los polos norte y sur.

Proporcionan una cobertura global al pasar sobre diferentes partes de la Tierra en cada órbita. Dentro de estos grupos se encuentran el NOAA (Estados Unidos), MetOp (Europa), Suomi NPP (Estados Unidos).

- **Satélites de observación en tierra**

Los satélites de observación terrestre son fundamentales para medir y recolectar datos sobre el potencial de radiación solar en la superficie de la Tierra. Estos satélites están equipados con una variedad de instrumentos avanzados que permiten monitorear la radiación solar con alta precisión y desde una perspectiva global. A continuación, se detallan algunos de los principales satélites y las tecnologías que utilizan para estas mediciones⁴².

⁴¹ MELENDEZ SERVAN, Gerson Gil. Optimización de redes satelitales de datos mediante el uso de satélites de órbita baja. Tesis de posgrado, Universidad Católica del Perú, Ingeniería de las telecomunicaciones. 2021. p. 1-24.

⁴² CARLOTTO, Jorge Adrián y JUÁREZ, José María. Sistema Satelital de Colecta de Datos Ambientales (DcS). En: Nombre de la revista: In-Genium [tipo de medio electrónico]. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de la Plata, diciembre, 2023, vol1, nro.6, p. 160-167. [Consultado: 1 de agosto de 2024]. Disponible en ISSN. 2796-7042

Los satélites de observación terrestre son esenciales para obtener una visión completa y precisa del potencial de radiación solar en la superficie de la Tierra. Proporcionan datos continuos y de alta resolución que son cruciales para la predicción meteorológica, la planificación de proyectos de energía solar, y la investigación climática. La combinación de datos satelitales con mediciones terrestres permite una comprensión más detallada y precisa de la distribución y variabilidad de la radiación solar en todo el mundo⁴³.

6.1.1.3 Bases de Datos Climáticas y Meteorológicas

6.1.1.3.1 NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) Data Base

La base de datos de Meteorología de Superficie y Energía Solar (SSE) de la NASA proporciona datos climáticos y de recursos solares globales que son utilizados en el diseño y evaluación de sistemas de energía solar y aplicaciones relacionadas con el clima. Esta base de datos es accesible públicamente y ofrece información valiosa para científicos, ingenieros y planificadores energéticos en todo el mundo⁴⁴.

⁴³ GARCÍA RUIZ, Pedro Jesús. Satélites de observación de la Tierra. Evolución de la erupción volcánica en la isla de La Palma. Trabajo de grado, Universitat Politècnica de València, Ingeniería de las telecomunicaciones. 2023. p. 1-88.

⁴⁴ EARTHDATA ATMOSPHERIC SCIENCE DATA CENTER. Surface meteorology and Solar Energy [sitio web]. NASA. [Consultado: 01 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://asdc.larc.nasa.gov/project/SSE>.

- **Características Principales de la Base de Datos SSE**

En la Tabla 1 se presenta de forma breve las características con las que cuenta la base de datos de SSE de la NASA.

Tabla 1 *Características de la Base de Datos Surface Meteorology and Solar Energy*

Característica	Descripción
Cobertura Geográfica	Datos globales con una resolución espacial de aproximadamente 1° x 1° (aproximadamente 100 km x 100 km).
Período de Datos	Datos climáticos históricos y promedios mensuales que abarcan más de 20 años.
Variables Meteorológicas	Información sobre temperatura, humedad, presión, velocidad y dirección del viento, precipitaciones, entre otros.
Datos de Radiación Solar	Datos de radiación solar global horizontal, radiación solar directa normal y radiación solar difusa.
Formato de Datos	Disponible en formatos accesibles para su integración en modelos y herramientas de análisis, como CSV, TXT y formatos compatibles con GIS.
Accesibilidad	Disponible públicamente a través de un portal web y API.
Aplicaciones	Utilizado para el diseño de sistemas de energía solar, análisis de recursos energéticos, estudios climáticos y modelado ambiental.

Fuente: Elaboración propia, con base Surface Meteorology and Solar Energy (2024)

- **Variables y Datos Proporcionados por Surface Meteorology and Solar Energy**

Al tener en cuenta el trabajo desarrollado por Verduci *et al.* (2022)⁴⁵ se logró la identificación de los datos que se logran obtener a partir de la base de datos Surface Meteorology and Solar Energy de la NASA, como se observa en la Tabla 2.

⁴⁵ VERDUCI, Rosalia *et al.* Solar Energy in Space Applications: Review and Technology Perspectives. En: *Advanced Energy Materials*. Revista: Wiley. 22 de junio. 2022. Vol. 12 nro. 29. p. 1 - 8.

Tabla 2 Variables y Datos Proporcionados por DDS de la NASA

Variable	Descripción
Temperatura del Aire	Promedios mensuales y diarios de temperatura mínima, máxima y media del aire.
Humedad Relativa	Datos sobre la humedad relativa promedio.
Presión Atmosférica	Información sobre la presión atmosférica a nivel del mar y en la superficie.
Velocidad del Viento	Datos de velocidad del viento a diferentes alturas, típicamente a 10 metros.
Dirección del Viento	Dirección promedio del viento.
Precipitación	Datos de precipitación mensual y anual.
Radiación Solar Global	Radiación solar total recibida en una superficie horizontal.
Radiación Solar Directa Normal	Radiación solar recibida directamente del sol en una superficie perpendicular a los rayos solares.
Radiación Solar Difusa	Radiación solar recibida en una superficie horizontal que ha sido dispersada por la atmósfera.

Fuente: elaboración propia, con base en Verduci *et al* (2022)

- Aplicaciones de Desarrollo de Surface Meteorology and Solar Energy

Desde la literatura, en la investigación de Meenal *et al.* (2022)⁴⁶ se pudo establecer que dentro de las principales aplicaciones en las que se hace uso de esta plataforma de la NASA, como se muestra en la Tabla 3 se encuentran el diseño de sistemas fotovoltaicos, sistemas de energía solar térmica, estudios de tipo climático, modelado de ambiental, proyectos de energía eólica y planes de mitigación ambiental climática.

⁴⁶ SPRINGER LINK. Weather Forecasting for Renewable Energy System: A Review. En: Archives of Computational Methods in Engineering. Universidad de Sanbuenaventura. 26 de junio. 2022. Vol. 29. p. 2875-2891. url: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-021-09695-3>

Tabla 3. Aplicaciones de Desarrollo de Surface Meteorology and Solar Energy

Aplicación	Descripción
Diseño de Sistemas Fotovoltaicos	Evaluación del potencial solar y diseño de sistemas de energía solar fotovoltaica utilizando datos de radiación solar.
Sistemas de Energía Solar Térmica	Análisis de recursos solares para el diseño de sistemas solares térmicos, como colectores solares para agua caliente.
Estudios Climáticos	Investigaciones sobre patrones climáticos y su impacto en diferentes regiones.
Modelado Ambiental	Utilización de datos meteorológicos para el modelado de procesos ambientales, como el crecimiento de cultivos y la gestión del agua.
Proyectos de Energía Eólica	Evaluación del potencial eólico utilizando datos de velocidad y dirección del viento.
Planes de Mitigación Climática	Desarrollo de estrategias para mitigar el cambio climático basado en datos históricos y proyecciones climáticas.

Fuente: elaboración propia, con base en Meenal *et al.* (2022)

Como parte de los desarrollos que se llevan a cabo con Surface Meteorology and Solar Energy se destacan, la evaluación del potencial solar en una región, utilizando datos de radiación solar global para determinar la viabilidad de paneles solares y analizando los meses con mayor y menor radiación; el diseño de sistemas de energía eólica, mediante el análisis de velocidad y dirección del viento para ubicar turbinas óptimamente y modelar la producción energética; y estudios de impacto climático, enfocándose en cómo las variaciones de temperatura y precipitación afectan la agricultura y su correlación con eventos meteorológicos extremos.

6.1.1.3.2 National Renewable Energy Laboratory (NREL) Solar Resource Data

El National Renewable Energy Laboratory (NREL)⁴⁷ ofrece una base de datos de recursos solares que proporciona información precisa y detallada sobre la radiación solar y otros datos meteorológicos. Estos datos son esenciales para el diseño y la evaluación de sistemas de energía solar y otras aplicaciones relacionadas con el clima.

⁴⁷ NREL. Energy Analysis. [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 01 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/analysis/future-system-scenarios.html>.

- Características Principales de los Datos de Recursos Solares de NR

Como parte esencial de la herramienta de la base de datos de National Renewable Energy Laboratory cuenta con características como cobertura geográfica de regiones a nivel mundial, cuenta con el desarrollo de datos históricos y datos recientes. Como parte de sus variables meteorológicas se destacan la radiación solar, temperatura, humedad y velocidad de vientos, lo cuales se manejan en formatos como cvs y gis. Las características principales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Características de la Base de Datos National Renewable Energy Laboratory (NREL)

Característica	Descripción
Cobertura Geográfica	Datos globales con alta resolución espacial. Cobertura detallada para Estados Unidos y otras regiones específicas.
Período de Datos	Datos históricos y actuales con períodos que pueden abarcar varias décadas.
Variables Meteorológicas	Radiación solar, temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, entre otros.
Datos de Radiación Solar	Radiación solar global horizontal, radiación solar directa normal, radiación solar difusa, radiación solar reflejada.
Formatos de Datos	Disponible en formatos accesibles como CSV, JSON y archivos compatibles con GIS.
Accesibilidad	Accesible a través del portal web de NREL, APIs y herramientas específicas como el PVWatts Calculator.
Aplicaciones	Diseño de sistemas de energía solar, análisis de recursos energéticos, estudios climáticos, planificación urbana y modelado ambiental.

Fuente: elaboración propia, con base en National Renewable Energy Laboratory NREL (2024)

- **Variables y Datos Proporcionados por National Renewable Energy Laboratory (NREL)**

Tabla 5 Variables y Datos Proporcionados por National Renewable Energy Laboratory (NREL)

Variable	Descripción
Radiación Solar Global	Total de radiación solar recibida en una superficie horizontal.
Radiación Solar Directa Normal	Radiación solar recibida directamente del sol en una superficie perpendicular a los rayos solares.
Radiación Solar Difusa	Radiación solar dispersada por la atmósfera y recibida en una superficie horizontal.
Radiación Solar Reflejada	Radiación solar reflejada desde el suelo u otras superficies.
Temperatura del Aire	Datos de temperatura mínima, máxima y media.
Humedad Relativa	Promedio de humedad relativa.
Velocidad y Dirección del Viento	Velocidad y dirección del viento a varias alturas, típicamente a 10 metros.
Presión Atmosférica	Presión atmosférica a nivel del mar y a otras altitudes.
Precipitación	Cantidad de precipitación mensual y anual.

Fuente: elaboración propia, con base en National Renewable Energy Laboratory (2024)

Como se muestra en la Tabla 5, NREL permite obtener datos de radiación solar global, radiación solar directa normal, radiación difusa, reflejada, temperatura del aire, humedad relativa, precipitaciones, presión atmosférica y velocidad y dirección del viento.

- **Aplicaciones por National Renewable Energy Laboratory (NREL)**

Tabla 6 Aplicaciones por National Renewable Energy Laboratory (NREL)

Aplicación	Descripción
Diseño de Sistemas Fotovoltaicos	Evaluación del potencial solar para el diseño de sistemas de energía solar fotovoltaica.
Sistemas de Energía Solar Térmica	Análisis de recursos solares para sistemas solares térmicos como colectores solares de agua caliente.
Estudios Climáticos y Ambientales	Investigaciones sobre patrones climáticos y su impacto en diferentes regiones.
Planificación Urbana y Regional	Uso de datos meteorológicos y solares para la planificación de infraestructuras y desarrollo urbano.
Proyectos de Energía Eólica	Evaluación del potencial eólico utilizando datos de velocidad y dirección del viento.
Planes de Mitigación Climática	Desarrollo de estrategias de mitigación del cambio climático basadas en datos históricos y proyecciones climáticas.

Fuente: elaboración propia, con base en National Renewable Energy Laboratory (2024)

En la Tabla 6 se presentan las principales aplicaciones de esta herramienta se, de manera que permite el desarrollo de planes de mitigación climática, proyectos de energía eólica, planificación urbana y regional, estudios climáticos y ambientales, y diseños de sistemas fotovoltaicos.

6.1.1.4 Software

6.1.1.4.1 ArcGIS

ArcGIS es una plataforma de sistemas de información geográfica (SIG) desarrollada por Esri, que permite a los usuarios crear, gestionar, analizar y visualizar datos geoespaciales. Es una herramienta poderosa utilizada en una variedad de sectores como la planificación urbana, gestión de recursos naturales, análisis ambiental⁴⁸. En la Tabla 7 se presentan las características con las que cuenta ArcGIS.

Tabla 7 Características de ArcGIS

Característica	Descripción
Análisis Espacial	Herramientas avanzadas para realizar análisis espacial y modelado geográfico.
Visualización de Datos	Capacidad para crear mapas interactivos y visualizaciones 3D.
Gestión de Datos	Administración de grandes volúmenes de datos geoespaciales con opciones de edición y actualización en tiempo real.
Integración de Datos	Soporte para múltiples formatos de datos y la capacidad de integrar datos de diversas fuentes.
Compartir y Colaborar	Facilita el intercambio de mapas y datos con otros usuarios y equipos a través de la nube.
Aplicaciones y Extensiones	Disponibilidad de aplicaciones específicas y extensiones que amplían las capacidades de ArcGIS.
Soporte y Comunidad	Amplio soporte técnico y una comunidad activa de usuarios y desarrolladores.

Fuente: elaboración propia, con base en Giannelli, León y Agugiaro (2022)

⁴⁸ GIANNELLI, Charles, LEÓN SÁNCHEZ, Diego y AGUGIARO, Guillermo. Comparison and evaluation of different gis software tools to estimate solar irradiation. Revista: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.2022. Vol. 4. p. 275-282.

Como parte de los principales componentes que se han identificado por ArcGIS dentro de los que se destacan los análisis geoespaciales para visualización 3D, capacidad de almacenamiento en la nube, creación, organización y visualizaciones interactivas con mapas, multimedia y texto.

Tabla 8 Componentes de ArcGIS

Componente	Descripción
ArcGIS Pro	Herramienta de escritorio para crear, editar y analizar datos geoespaciales con capacidades avanzadas de visualización 3D y análisis.
ArcGIS Online	Plataforma en la nube que permite crear, compartir y colaborar en mapas interactivos y aplicaciones.
ArcGIS Enterprise	Solución de SIG empresarial que incluye herramientas para la administración de datos, análisis avanzado y servicios de mapas en la nube.
ArcGIS Maps for Office	Integración de capacidades SIG en aplicaciones de Microsoft Office como Excel y PowerPoint.
ArcGIS Field Maps	Aplicación móvil para la recopilación y edición de datos en campo.
ArcGIS StoryMaps	Herramienta para crear narrativas visuales interactivas combinando mapas, texto y multimedia.
ArcGIS Hub	Plataforma que permite a organizaciones compartir datos y colaborar con la comunidad.

Fuente: elaboración propia, con base en Giannelli, León y Agugiaro (2022)

Tabla 9 Aplicaciones de ArcGIS

Aplicación	Descripción
Planificación Urbana	Análisis de uso del suelo, planificación de infraestructuras, y gestión de servicios públicos.
Gestión de Recursos Naturales	Monitoreo y análisis de recursos hídricos, forestales, y de biodiversidad.
Análisis Ambiental	Evaluación de impacto ambiental, modelado de riesgos naturales y gestión de desastres.
Transporte y Logística	Optimización de rutas, análisis de tráfico y planificación de redes de transporte.
Salud Pública	Análisis de datos epidemiológicos, planificación de servicios de salud y respuesta a emergencias.
Agricultura	Gestión de cultivos, monitoreo de salud del suelo y análisis de rendimiento agrícola.
Seguridad y Defensa	Análisis geoespacial para la seguridad nacional, gestión de emergencias y operaciones militares.

Fuente: elaboración propia, con base en Giannelli, León y Agugiaro (2022)

Como se muestra en la Tabla 9 se presentan las aplicaciones las que se emplea la plataforma ArcGIS como en la agricultura, salud pública, seguridad y defensa, planeación urbana, gestión de recursos naturales, análisis ambiental.

6.1.1.4.2 QGIS

QGIS (anteriormente conocido como Quantum GIS) es un sistema de información geográfica (SIG) de código abierto y gratuito que permite a los usuarios visualizar, editar y analizar datos geoespaciales. QGIS es utilizado en una amplia variedad de campos como la planificación urbana, la gestión ambiental, la cartografía y la investigación científica⁴⁹.

Tabla 10 Características de QGIS

Característica	Descripción
Multiplataforma	Disponible en Windows, macOS, Linux, y Android.
Edición de Datos	Herramientas avanzadas para la creación y edición de datos vectoriales y ráster.
Soporte para Múltiples Formatos	Compatible con una amplia gama de formatos de datos geoespaciales (Shapefile, GeoJSON, KML, GPKG, entre otros).
Extensibilidad	Capacidad para añadir funcionalidades mediante plugins desarrollados en Python y C++.
Análisis Espacial	Herramientas integradas para realizar análisis espacial complejos.
Visualización de Datos	Creación de mapas detallados y visualizaciones 3D.
Integración de Datos	Integración con bases de datos espaciales como PostGIS, SpatiaLite, y otros.
Cartografía	Amplias opciones de simbología y etiquetado para crear mapas de alta calidad.
Geoprocesamiento	Acceso a herramientas de geoprocesamiento a través de la integración con GRASS GIS y SAGA GIS.
Accesibilidad	Interfaz intuitiva y soporte en múltiples idiomas.

Fuente: elaboración propia, con base en Usta, Carioni y Mutani (2022).

Como se muestra en la Tabla 10, al tomar como base a Usta, Corioni y Mutani (2022) se logró identificar que QGIS cuenta con capacidades multiplataforma como Android,

⁴⁹ USTA, Yasemin, CARIONI, Giovanni & MUTANI. Guglielmina. Modeling and mapping solar energy production with photovoltaic panels on Politecnico di Torino university campus. Revista: Springer Link. Vol. 17, 16 de febrero. 2022. Vol. 17 nro. 53. p. 23-34.

Windows, MacOS y Linux. Permite la creación y edición de datos vectoriales y ráster. Permite la compatibilidad en formatos de datos geoespaciales como KML, GeoJSON, GPKG y Shapefile.

Tabla 11 Componentes de QGIS

Componente	Descripción
Interfaz de Usuario	Interfaz gráfica que permite a los usuarios interactuar con los datos geoespaciales y herramientas de análisis.
Administrador de Datos	Herramienta para gestionar y visualizar capas de datos geoespaciales.
Herramientas de Edición	Conjunto de herramientas para la creación y edición de datos vectoriales y ráster.
Procesador de Modelos	Entorno para crear y ejecutar modelos de geoprocetamiento.
Gestor de Plugins	Permite la instalación y gestión de plugins que amplían las funcionalidades de QGIS.
Atlas	Herramienta para la creación de atlas interactivos y mapas en serie.
Complementos de Análisis	Integración con herramientas de análisis espacial como GRASS GIS, SAGA GIS, y GDAL.

Fuente: elaboración propia, con base en Usta, Carioni y Mutani (2022).

A su vez, como se muestra en la

Como se muestra en la Tabla 10, al tomar como base a Usta, Corioni y Mutani (2022) se logró identificar que QGIS cuenta con capacidades multiplataforma como Android, Windows, MacOS y Linux. Permite la creación y edición de datos vectoriales y ráster. Permite la compatibilidad en formatos de datos geoespaciales como KML, GeoJSON, GPKG y Shapefile.

Tabla 11 el autor permitió establecer que la aplicación cuenta con componentes como interfaz de usuario, administrador de datos, herramienta para edición, procesador de modelos, posibilidad de gestionar la instalación de plugins, creación atlas interactivos.

Tabla 12 Aplicaciones de QGIS

Aplicación	Descripción
Planificación Urbana	Análisis de uso del suelo, zonificación, y planificación de infraestructuras.
Gestión Ambiental	Monitoreo de recursos naturales, gestión de áreas protegidas y análisis de impacto ambiental.
Cartografía y Topografía	Creación de mapas temáticos, topográficos y geológicos.

Investigación Científica	Análisis de datos espaciales en campos como la ecología, la geología, y la arqueología.
Agricultura	Gestión de cultivos, análisis de suelos y planificación agrícola.
Salud Pública	Análisis de distribución de enfermedades, planificación de servicios de salud y respuesta a emergencias sanitarias.
Transporte y Logística	Optimización de rutas, análisis de movilidad y planificación de redes de transporte.
Seguridad y Defensa	Análisis geoespacial para la gestión de emergencias, operaciones militares y seguridad pública.

Fuente: elaboración propia, con base en Usta, Carioni y Mutani (2022).

Como se observa en la

Tabla **12** QGIS es una herramienta versátil que se aplica en múltiples sectores, permitiendo el análisis y la visualización de datos espaciales. En la planificación urbana, se utiliza para el análisis del uso del suelo, zonificación y planificación de infraestructuras. En gestión ambiental, facilita el monitoreo de recursos naturales, la gestión de áreas protegidas y el análisis de impactos ambientales. En cartografía y topografía, es esencial para la creación de mapas temáticos, topográficos y geológicos. La investigación científica se beneficia de QGIS en el análisis de datos espaciales en campos como la ecología, la geología y la arqueología. En agricultura, apoya la gestión de cultivos, análisis de suelos y planificación agrícola. En salud pública, es crucial para el análisis de la distribución de enfermedades, la planificación de servicios de salud y la respuesta a emergencias sanitarias. Además, en transporte y logística, QGIS optimiza rutas, analiza la movilidad y planifica redes de transporte. Por último, en seguridad y defensa, permite el análisis geoespacial para la gestión de emergencias, operaciones militares y seguridad pública.

6.1.1.5 Software Herramientas de Modelado y Simulación

6.1.1.5.1 PVGIS

PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) es una herramienta desarrollada por el Joint Research Centre (JRC) de la Comisión Europea. Esta herramienta

proporciona datos de radiación solar y realiza cálculos de rendimiento de sistemas fotovoltaicos en todo el mundo⁵⁰.

Tabla 13 Características de PVGIS

Característica	Descripción
Base de Datos Global	Datos meteorológicos y de radiación solar para ubicaciones de todo el mundo.
Cálculos de Rendimiento Fotovoltaico	Estimaciones del rendimiento energético de sistemas fotovoltaicos para diferentes configuraciones y ubicaciones.
Mapas Interactivos	Mapas globales y regionales de radiación solar y potencial fotovoltaico.
Modelos de Radiación Solar	Diversos modelos de radiación solar, incluyendo CMSAF, SARA y otros.
Análisis de Sombras	Evaluación del impacto de las sombras en el rendimiento del sistema fotovoltaico.
Cálculos Horarios y Diarios	Estimaciones detalladas de producción energética a nivel horario y diario.
Estimación de Pérdidas	Consideración de pérdidas debido a temperatura, inversores, cables, entre otros.
Comparación de Tecnologías	Evaluación del rendimiento de diferentes tecnologías fotovoltaicas (cristalina, película delgada, etc.).

Fuente: elaboración propia, con base en Dost Mohammadi (2022)

Con base en la investigación del autor, VGIS es una herramienta integral para la evaluación de sistemas fotovoltaicos, ofreciendo una base de datos global con información meteorológica y de radiación solar para cualquier ubicación. Permite realizar cálculos precisos del rendimiento energético de sistemas fotovoltaicos, adaptados a diferentes configuraciones y ubicaciones, y proporciona mapas interactivos que muestran radiación solar y potencial fotovoltaico. Además, incluye modelos de radiación solar variados, análisis de sombras, estimaciones detalladas de producción energética a nivel horario y diario, y consideraciones de pérdidas por factores como temperatura e

⁵⁰ DOST MOHAMMADI, Shir Ahmad. Design and Simulation of Grid-Connected Solar PV System Using PVSYS, PVGIS and HOMER Software. En: International Journal of Pioneering Technology and Engineering: Revista de administración y negocios [en línea] Samsun, Turquía, Ondokuz Mayıs University junio. 2022. vol. 1, nro. 1. p. 36-41. [Consultado: 02 de agosto de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.56158/jpte.2022.24.1.01>

inversores. También facilita la comparación del rendimiento entre diferentes tecnologías fotovoltaicas.

Como se muestra en la Tabla 14 la herramienta PVGIS incluye componentes clave como una base de datos meteorológicos con información histórica sobre radiación solar y temperatura, una herramienta de cálculo online para evaluar el rendimiento de sistemas fotovoltaicos, y mapas interactivos de radiación solar. Además, permite generar informes personalizados sobre el potencial fotovoltaico y ofrece APIs y herramientas de desarrollo para integrar sus datos y funcionalidades en otras aplicaciones.

Tabla 14 Componentes de PVGIS

Componente	Descripción
Base de Datos Meteorológicos	Datos históricos de radiación solar, temperatura y otros parámetros meteorológicos esenciales.
Herramienta de Cálculo Online	Plataforma en línea para realizar cálculos de rendimiento de sistemas fotovoltaicos.
Mapas de Radiación Solar	Mapas interactivos que muestran la radiación solar global y regional.
Informes Personalizados	Generación de informes detallados sobre el potencial fotovoltaico y el rendimiento estimado.
APIs y Herramientas de Desarrollo	Acceso programático a los datos y funcionalidades de PVGIS para su integración en otras aplicaciones.

Fuente: elaboración propia, con base en Dost Mohammadi (2022)

Tabla 15 Cálculo de Radiación Solar

Proceso	Descripción
Obtención de Coordenadas	Selección de la ubicación geográfica mediante coordenadas (latitud y longitud) o mediante un mapa interactivo.
Modelos de Radiación	Elección del modelo de radiación solar (p.ej., CMSAF, SARAH) para obtener datos precisos de radiación solar.
Datos Meteorológicos	Uso de datos históricos para obtener información sobre temperatura, radiación y condiciones climáticas.
Estimación de Radiación	Cálculo de la radiación solar promedio diaria, mensual y anual para la ubicación seleccionada.

Fuente: elaboración propia, con base en Dost Mohammadi (2022)

La Tabla 15 describe el proceso de cálculo de radiación solar, que incluye la selección de la ubicación geográfica mediante coordenadas o un mapa interactivo, la elección de

un modelo de radiación solar, el uso de datos meteorológicos históricos, y la estimación de la radiación solar promedio diaria, mensual y anual para la ubicación seleccionada.

Tabla 16 Cálculo de Rendimiento Fotovoltaico

Paso	Descripción
Configuración del Sistema	Definición de los parámetros del sistema fotovoltaico (tipo de panel, inclinación, orientación, pérdidas, etc.).
Modelo de Producción Energética	Cálculo de la producción energética del sistema fotovoltaico basado en la radiación solar disponible y las condiciones locales.
Análisis de Sombra	Evaluación del impacto de sombras en el rendimiento del sistema, considerando obstáculos cercanos y lejanos.
Estimación de Pérdidas	Consideración de diversas pérdidas (p.ej., temperatura, inversor, cableado) en el cálculo del rendimiento final.
Producción Estimada	Cálculo de la producción energética estimada en kWh a nivel diario, mensual y anual.

Fuente: elaboración propia, con base en Dost Mohammadi (2022)

La Tabla 16 describe el cálculo del rendimiento fotovoltaico, que incluye la configuración del sistema (tipo de panel, inclinación, orientación, y pérdidas), el uso de un modelo de producción energética basado en la radiación solar y condiciones locales, y un análisis de sombras para evaluar su impacto. Además, se consideran diversas pérdidas, como las debidas a la temperatura y el cableado, para finalmente estimar la producción energética en kWh a nivel diario, mensual y anual.

6.1.1.5.2 HOMER PRO

HOMER Pro es un software avanzado de modelado y simulación desarrollado por HOMER Energy, ahora parte de UL (Underwriters Laboratories). Está diseñado para ayudar a los profesionales a diseñar y optimizar sistemas de energía híbrida que combinan múltiples fuentes de energía, incluyendo renovables como solar y eólica, así como generadores diésel y almacenamiento de energía⁵¹.

La Tabla 17 describe las principales características de HOMER Pro, que incluyen la capacidad de simular y modelar sistemas de energía híbrida para evaluar su viabilidad técnica y económica. Además, HOMER Pro optimiza la configuración del sistema para minimizar costos y maximizar la eficiencia energética, realiza análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de cambios en las condiciones del sistema, y permite la integración de múltiples fuentes de energía como solar, eólica y generadores diésel. También cuenta con una extensa base de datos de componentes, incluyendo paneles solares, turbinas eólicas, baterías y generadores.⁵²

Tabla 17 Características Principales de HOMER Pro

Característica	Descripción
Simulación y Modelado	Permite la simulación y el modelado detallado de sistemas de energía híbrida para evaluar su viabilidad técnica y económica.
Optimización del Sistema	Optimiza la configuración del sistema para minimizar costos y maximizar la eficiencia energética.
Análisis de Sensibilidad	Realiza análisis de sensibilidad para entender cómo los cambios en las condiciones del sistema afectan el rendimiento y los costos.
Integración de Múltiples Fuentes de Energía	Soporta la integración de diversas fuentes de energía (solar, eólica, generadores diésel, almacenamiento en baterías, etc.).
Base de Datos de Componentes	Incluye una extensa base de datos de componentes, incluyendo paneles solares, turbinas eólicas, baterías y generadores.

Fuente: elaboración propia, con base en Alhousni et al. (2023)

⁵¹ Ibid., p. 3.

⁵² ALHOUSNI, Fadhil Khadoun et al. Photovoltaic Power Prediction Using Analytical Models and Homer-Pro: Investigation of Results Reliability. En: Sustainability [en línea]. Selangor, Malasia: Institute of Sustainable Energy, Universiti Tenaga Nasional, mayo de 2023, vol. 15. nro. 1. 1-12 p. [Consultado: 3 de agosto de 2023]. Disponible en <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/11/8904>

Como se muestra Tabla 17 HOMER Pro es una herramienta que permite la simulación y modelado detallado de sistemas de energía híbrida para evaluar su viabilidad técnica y económica. Optimiza la configuración del sistema para reducir costos y aumentar la eficiencia energética, y realiza análisis de sensibilidad para comprender cómo los cambios en las condiciones afectan el rendimiento y los costos. Además, admite la integración de múltiples fuentes de energía, como solar, eólica y generadores diésel, y cuenta con una amplia base de datos de componentes, incluyendo paneles solares, turbinas eólicas, baterías y generadores.

Tabla 18 Componentes Principales de HOMER Pro

Componente	Descripción
Simulador	Realiza simulaciones detalladas del rendimiento del sistema bajo diversas condiciones operativas y climáticas.
Optimizador	Busca la configuración óptima del sistema que minimiza costos o maximiza la fiabilidad según los criterios definidos.
Analizador de Sensibilidad	Evalúa el impacto de diferentes variables en el desempeño del sistema para identificar riesgos y oportunidades.
Interfaz de Usuario Intuitiva	Proporciona una interfaz gráfica de usuario intuitiva para la entrada de datos y la visualización de resultados.
Base de Datos de Recursos	Ofrece datos de recursos solares, eólicos y de carga para diferentes ubicaciones geográficas.

Fuente: elaboración propia, con base en Alhousni et al. (2023)

La Tabla 18 detalla los componentes principales de HOMER Pro, que incluyen un simulador para realizar simulaciones detalladas del rendimiento del sistema bajo diversas condiciones, un optimizador que busca la configuración más eficiente en términos de costos y fiabilidad, y un analizador de sensibilidad para evaluar el impacto de diferentes variables en el desempeño del sistema. Además, HOMER Pro cuenta con una interfaz de usuario intuitiva para facilitar la entrada de datos y la visualización de resultados, y una base de datos de recursos que proporciona información sobre recursos solares, eólicos y de carga en distintas ubicaciones geográficas.

Tabla 19 Simulación de Sistemas de Energía Híbrida

Proceso	Descripción
Definición del Sistema	Configuración de los componentes del sistema, incluyendo fuentes de energía, almacenamiento y carga.

Entrada de Datos	Entrada de datos de recursos, perfiles de carga y características de los componentes.
Ejecutar Simulación	Simulación del desempeño del sistema a lo largo del tiempo bajo diversas condiciones.
Revisión de Resultados	Análisis de los resultados de la simulación para evaluar la viabilidad técnica y económica del sistema.

Fuente: elaboración propia, con base en Alhousni et al. (2023)

La Tabla 19 describe el proceso de simulación de sistemas de energía híbrida, que comienza con la definición y configuración de los componentes del sistema, como fuentes de energía, almacenamiento y carga. Luego, se ingresan datos sobre recursos, perfiles de carga y características de los componentes. A continuación, se ejecuta la simulación para evaluar el desempeño del sistema bajo diferentes condiciones a lo largo del tiempo. Finalmente, se revisan y analizan los resultados para determinar la viabilidad técnica y económica del sistema.

Tabla 20 Optimización de Sistemas

Paso	Descripción
Definición de Criterios	Establecimiento de criterios de optimización, como minimización de costos o maximización de fiabilidad.
Ejecutar Optimización	El optimizador de HOMER Pro encuentra la configuración del sistema que cumple mejor con los criterios definidos.
Evaluación de Alternativas	Comparación de diferentes configuraciones y tecnologías para seleccionar la mejor opción.
Análisis de Resultados	Análisis detallado de los resultados de la optimización para tomar decisiones informadas.

Fuente: elaboración propia, con base en Alhousni et al. (2023)

La Tabla 20 describe el proceso de optimización de sistemas en HOMER Pro, que comienza con la definición de criterios como la minimización de costos o la maximización de la fiabilidad. Luego, se ejecuta la optimización para encontrar la configuración del sistema que mejor cumpla con estos criterios. A continuación, se evalúan y comparan diferentes configuraciones y tecnologías para seleccionar la opción más adecuada. Finalmente, se realiza un análisis detallado de los resultados para tomar decisiones informadas.

Tabla 21 Análisis de Sensibilidad

Aspecto	Descripción
Variables de Sensibilidad	Selección de variables clave (como costos de componentes, precios de combustible, etc.) para el análisis.
Ejecución del Análisis	Simulación de múltiples escenarios para entender cómo las variaciones en las variables afectan el sistema.
Resultados del Análisis	Visualización y análisis de los resultados del análisis de sensibilidad para identificar riesgos y oportunidades.

Fuente: elaboración propia, con base en Alhousni et al. (2023)

6.1.1.5.3 SAM

El System Advisor Model (SAM) es una herramienta de modelado y simulación desarrollada por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) de Estados Unidos. Está diseñada para facilitar la toma de decisiones en proyectos de energía renovable mediante la simulación de la producción de energía y la evaluación del desempeño financiero de diversas tecnologías de generación de energía⁵³.

Tabla 22 Características de SAM

Característica	Descripción
Simulación de Producción de Energía	Permite simular la producción de energía de diferentes tecnologías renovables bajo diversas condiciones climáticas.
Análisis Financiero	Realiza evaluaciones detalladas del desempeño financiero de los proyectos, incluyendo cálculos de retorno de inversión y costos nivelados de energía.
Modelado de Tecnologías Diversas	Soporta el modelado de tecnologías como solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, biomasa, hidroeléctrica y más.
Evaluación de Escenarios	Permite realizar análisis de escenarios para entender cómo los cambios en las condiciones afectan el rendimiento y los costos del proyecto.
Actualizaciones y Comunidad	Se actualiza regularmente con nuevas características y datos, y cuenta con una comunidad activa de usuarios y desarrolladores.

Fuente: elaboración propia, con base en Nolasco y Solís (2021)

⁵³ NOLASCO, Daniela; SOLÍS CHAVES, José. Samuel. Shading simulation for two photovoltaics solar generation residential systems (SPV) using SAM (System Advisor Model). En: EBSCO. Revista: Tecciencia.

La Tabla 22 describe las características de SAM, una herramienta que permite simular la producción de energía de diversas tecnologías renovables bajo diferentes condiciones climáticas, y realizar análisis financieros detallados para evaluar el desempeño de los proyectos. SAM también soporta el modelado de múltiples tecnologías como solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, biomasa e hidroeléctrica, y permite realizar evaluaciones de escenarios para analizar el impacto de cambios en las condiciones. Además, SAM se actualiza regularmente y cuenta con una comunidad activa de usuarios y desarrolladores.

Tabla 23 Componentes de SAM

Componente	Descripción
Simulador de Energía	Realiza simulaciones detalladas del rendimiento de sistemas de energía renovable bajo diversas condiciones operativas y climáticas.
Analizador Financiero	Calcula indicadores financieros como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), y el Período de Recuperación.
Biblioteca de Componentes	Incluye una base de datos extensa de componentes y tecnologías para facilitar el modelado preciso de sistemas.
Herramienta de Escenarios	Permite comparar múltiples configuraciones y escenarios para optimizar el diseño del proyecto.

Fuente: elaboración propia, con base en Nolasco y Solís (2021)

La Tabla 23 describe los componentes de SAM, que incluyen un simulador de energía que realiza simulaciones detalladas del rendimiento de sistemas de energía renovable en diversas condiciones, y un analizador financiero que calcula indicadores clave como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación. SAM también cuenta con una biblioteca de componentes que ofrece una amplia base de datos para el modelado preciso de sistemas, y una herramienta de escenarios que permite comparar diferentes configuraciones para optimizar el diseño del proyecto.

Tabla 24 Simulación de Producción de Energía

Proceso	Descripción
Selección de Tecnología	Elección de la tecnología de energía renovable a modelar (fotovoltaica, eólica, biomasa, etc.).
Entrada de Datos	Entrada de datos de recursos, perfiles de carga y características de los componentes.

Ejecución de Simulación	Simulación del desempeño del sistema a lo largo del tiempo bajo diversas condiciones.
Revisión de Resultados	Análisis de los resultados de la simulación para evaluar la viabilidad técnica y económica del sistema.

Fuente: elaboración propia, con base en Nolasco y Solís (2021)

La Tabla 24 detalla el proceso de simulación de producción de energía, que comienza con la selección de la tecnología de energía renovable a modelar, como fotovoltaica, eólica o biomasa. Luego, se ingresan datos sobre recursos, perfiles de carga y características de los componentes. La simulación se ejecuta para evaluar el desempeño del sistema a lo largo del tiempo bajo diversas condiciones, y finalmente, se revisan los resultados para determinar la viabilidad técnica y económica del sistema.

Tabla 25 Análisis Financiero

Paso	Descripción
Definición de Parámetros Financieros	Establecimiento de parámetros financieros como costos de capital, costos operativos, tarifas de electricidad, y tasas de descuento.
Cálculo de Indicadores	El analizador financiero calcula indicadores clave como VPN, TIR, y costos nivelados de energía.
Evaluación de Resultados	Comparación de diferentes configuraciones y tecnologías para seleccionar la mejor opción.
Análisis de Sensibilidad	Evaluación del impacto de diferentes variables financieras en el desempeño del proyecto.

Fuente: elaboración propia, con base en Nolasco y Solís (2021)

La Tabla 25 describe el análisis financiero, que comienza con la definición de parámetros financieros como costos de capital, operativos, tarifas de electricidad y tasas de descuento. A continuación, se calculan indicadores clave como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y los costos nivelados de energía. Luego, se evalúan los resultados comparando diferentes configuraciones y tecnologías para elegir la mejor opción, y se realiza un análisis de sensibilidad para entender el impacto de variables financieras en el desempeño del proyecto.

Tabla 26 Modelado de Tecnologías Diversas

Tecnología	Descripción
-------------------	--------------------

Solar Fotovoltaica	Modelado de sistemas fotovoltaicos conectados a la red y fuera de la red, incluyendo sistemas de almacenamiento.
Solar Térmica	Simulación de plantas de energía solar térmica, incluyendo tecnologías de torre, colector cilindro-parabólico, y más.
Energía Eólica	Modelado de parques eólicos onshore y offshore, considerando factores como la velocidad del viento y la topografía.
Biomasa y Residuos	Simulación de sistemas de energía basados en biomasa, incluyendo la combustión directa y la gasificación.
Hidroeléctrica	Modelado de proyectos hidroeléctricos de pequeña y gran escala.

Fuente: elaboración propia, con base en Nolasco y Solís (2021)

La Tabla 26 describe el modelado de diversas tecnologías energéticas. Incluye el modelado de sistemas solar fotovoltaica tanto conectados a la red como autónomos, con o sin almacenamiento; solar térmica, abarcando tecnologías como torres y colectores cilindro-parabólicos; energía eólica, para parques onshore y offshore, considerando factores como la velocidad del viento y la topografía; biomasa y residuos, simulando sistemas de combustión directa y gasificación; y hidroeléctrica, para proyectos de pequeña y gran escala.

- Análisis Comparativo de Herramientas de Modelado y Simulación

Tabla 27 Análisis Comparativo de Herramientas de Modelado y Simulación

Característica	PVGIS	HOMER Pro	System Advisor Model (SAM)
Descripción General	Herramienta para la evaluación del rendimiento de sistemas fotovoltaicos utilizando datos solares y meteorológicos.	Plataforma de modelado de energía híbrida y renovable para la optimización de sistemas energéticos.	Herramienta de simulación y análisis financiero para proyectos de energía renovable.
Desarrollador	Comisión Europea	HOMER Energy	National Renewable Energy Laboratory (NREL)
Tecnologías Soportadas	Solar Fotovoltaica	Energía solar, eólica, hidroeléctrica, diésel, baterías, entre otras.	Solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, biomasa, hidroeléctrica.
Entrada de Datos	Datos meteorológicos históricos, perfiles de carga, características del sistema.	Datos meteorológicos, perfiles de carga, características del sistema, precios de combustible.	Datos meteorológicos, perfiles de carga, características del sistema, parámetros financieros.
Simulación de Producción	Sí	Sí	Sí

Análisis Financiero	No	Sí	Sí
Evaluación de Escenarios	No	Sí	Sí
Análisis de Sensibilidad	No	Sí	Sí
Optimización de Sistemas	No	Sí	Sí
Base de Datos de Recursos	Sí (Datos meteorológicos de la UE)	Sí (Base de datos integrada y posibilidad de añadir datos externos)	Sí (Base de datos integrada y posibilidad de añadir datos externos)
Interfaz de Usuario	Basada en web	Basada en escritorio	Basada en escritorio
Costo	Gratuito	Licencia comercial	Gratuito
Actualizaciones y Soporte	Actualizaciones periódicas, soporte a través de la Comisión Europea.	Actualizaciones periódicas, soporte a través de HOMER Energy.	Actualizaciones periódicas, soporte a través de NREL.
Aplicaciones Típicas	Evaluación del rendimiento de sistemas fotovoltaicos en ubicaciones específicas.	Diseño y optimización de microgrids y sistemas híbridos.	Evaluación técnica y económica de proyectos de energía renovable.
Facilidad de Uso	Alta, interfaz sencilla y directa.	Media, requiere conocimiento técnico y financiero.	Media, requiere conocimiento técnico y financiero.
Documentación y Recursos	Extensa documentación y tutoriales disponibles en línea.	Extensa documentación, tutoriales y soporte técnico disponible.	Extensa documentación, tutoriales y soporte técnico disponible.
Soporte de Idiomas	Múltiples idiomas, principalmente inglés y otros idiomas europeos.	Principalmente en inglés.	Principalmente en inglés.

Fuente: elaboración propia

PVGIS: Ideal para evaluaciones rápidas y precisas de sistemas fotovoltaicos en ubicaciones específicas utilizando datos meteorológicos históricos.

Interfaz basada en web, fácil de usar y gratuita, pero limitada en términos de análisis financiero y optimización de sistemas⁵⁴.

HOMER Pro: Excelente para el diseño y optimización de sistemas híbridos y microgrids, con un enfoque en el análisis financiero y la evaluación de escenarios.

⁵⁴ Mohammadi, Op. cit., p. #.

Interfaz basada en escritorio, requiere licencia comercial y conocimientos técnicos y financieros para su uso efectivo⁵⁵.

System Advisor Model (SAM): Versátil para la simulación y análisis financiero de diversos proyectos de energía renovable, con capacidades avanzadas de evaluación de escenarios y análisis de sensibilidad. Interfaz basada en escritorio, gratuita, pero requiere conocimientos técnicos y financieros para su uso efectivo⁵⁶.

Con el fin de determinar la plataforma apropiada para el desarrollo del proyecto, se tuvo en cuenta los siguientes aspectos en los que SAM representa la opción de mayor viabilidad desde un enfoque netamente técnico.

- Elección de SAM

Al comparar los softwares destacados para el cálculo del potencial fotovoltaico, se puede observar que SAM sobresale por sus capacidades de modelado detallado, incluyendo simulaciones avanzadas que consideran factores como temperatura, inclinación y sombras. SAM permite realizar análisis con datos horarios y puede importar información meteorológica de diversas fuentes. Es versátil, ya que soporta múltiples tecnologías renovables y configuraciones avanzadas de sistemas. Además, ofrece herramientas de análisis de sensibilidad para optimizar parámetros y evaluar distintos escenarios. Su

⁵⁵ ORDOÑEZ PALACIOS, Luis Eduardo; BUCHELI GERRERO, Víctor Andrés; CAICEDO BRAVO, Eduardo Francisco. Evaluation of solar radiation obtained from NASA and satellite imagery-based prediction models adjusted for microgrid sizing in Homer Pro. En: Revista INGE CUC. Valle del Cauca: Universidad del Valle, enero-junio, 2024, vol. 20 nro. 1. p. 1 - 13. ISSN-e 2382-4700.

⁵⁶ MILOSAVLJEVIĆ, DRAGANA D. Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/software based on case study. En: De Gruyter Open Access. [en línea]. enero-junio de 2022, nro. 12 p. [Consultado: 7 de septiembre de 2024]. Disponible en <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/phys-2022-0042/html>

interfaz gráfica intuitiva y su extensa documentación facilitan su uso. Finalmente, SAM permite realizar análisis técnicos sin necesidad de incluir aspectos financieros.

6.2. Recopilación de datos Geográficos, meteorológicos y Ambientales para el Cálculo de Potencial

6.2.1. Datos Geográficos de la Provincia de Soto Norte

La Provincia de Soto Norte, ubicada en el Departamento de Santander, Colombia, se caracteriza por su diversidad geográfica, compuesta por una topografía montañosa y compleja que forma parte de la Cordillera Oriental de los Andes. A continuación, se detallan los principales aspectos geográficos:

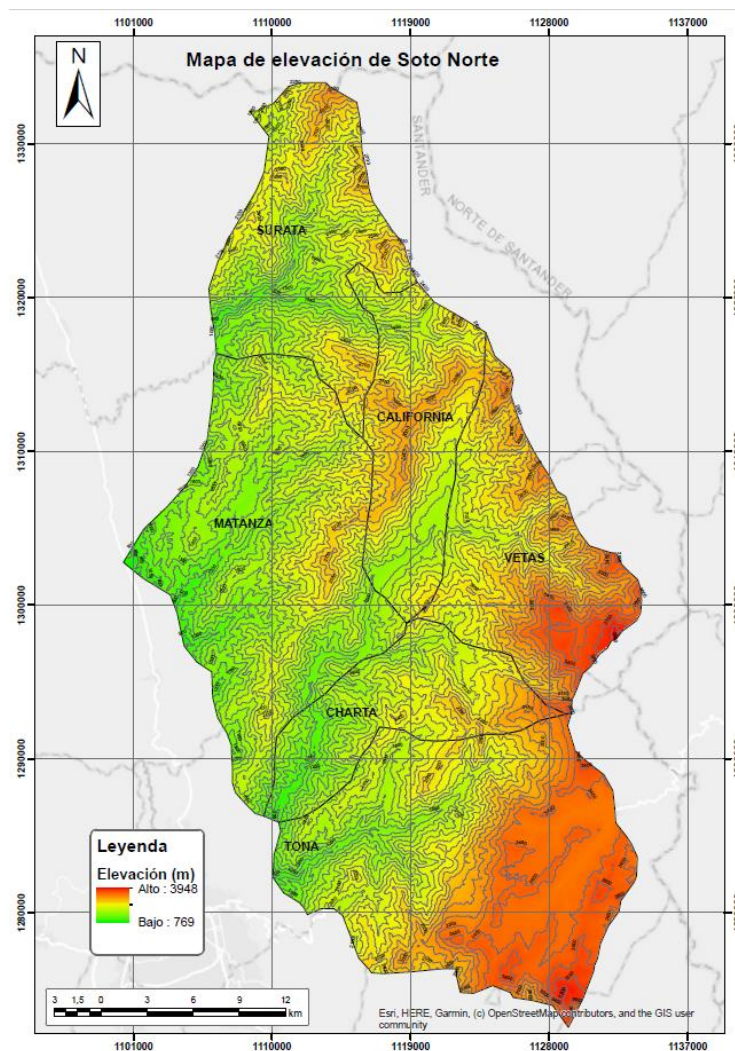
6.2.1.1 Topografía y Relieve

La región es predominantemente montañosa, con altitudes que varían considerablemente, lo que resulta en una serie de valles profundos y elevaciones abruptas. Las alturas en la provincia pueden superar los 3,000 metros sobre el nivel del mar, especialmente en áreas cercanas a la Sierra Nevada del Cocuy, lo que contribuye a un paisaje de alta montaña. Como se observa en la Figura 4 las zonas de mayor elevación son las que se encuentran en Tona con colores entre naranja hacia el rojo, con sección de montaña en Tona, parte de Charta, Vetas y California de manera significativa, con alturas de 3948 m. Las zonas verdes representan las elevaciones consideradas

bajas, como Suratá, Matanza, Charta y Tona con representaciones desde color amarillo hacia el verde con elevaciones mínimas 769 m⁵⁷.

Figura 4. *Topografía y Relieve de Soto Norte – Elevaciones*

⁵⁷ LORETA BALLESTEROS, Michael Biviana. Identificación de la calidad de agua para consumo humano de la provincia Soto Norte del departamento de Santander en el año 2019-2022 a través de revisión bibliográfica. Unidades Tecnológicas de Santander. Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías. 2023. 81 p.



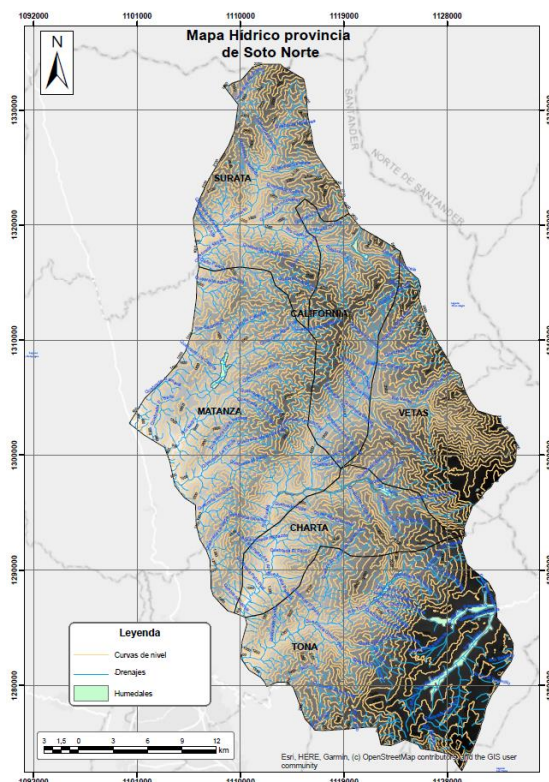
Fuente: Grupo de Investigación Galileo – UIS

6.2.1.2 Hidrografía

La Provincia de Soto Norte está atravesada por varios ríos y quebradas que nacen en sus montañas. El río Suratá es uno de los más importantes, sirviendo como una de las principales fuentes hídricas para la región. Estos cuerpos de agua son fundamentales tanto para el abastecimiento de agua potable como para la agricultura y la minería, actividades predominantes en la zona. Como se muestra en la Figura 5, la provincia de Soto Norte cuenta con gran cantidad de cuerpos de agua, los cuales se destacan como

humedales en color cian claro, en municipios como Matanza con la cuenca Matanza-Riachuelo⁵⁸.

Figura 5 Características Hidrográficas de Soto Norte



Fuente: Grupo de Investigación Galileo - UIS

6.2.1.3 Ecosistemas y Biodiversidad

La provincia alberga una rica biodiversidad debido a su variedad de altitudes y microclimas. Los ecosistemas van desde páramos en las zonas más altas, que son cruciales para la regulación hídrica, hasta bosques andinos y áreas de vegetación

⁵⁸ Ibíd., p. 45.

subtropical en las partes más bajas. Estos ecosistemas son hábitat de numerosas especies de flora y fauna, algunas de las cuales son endémicas⁵⁹.

6.2.1.4 Actividad Económica y Uso del Suelo

La geografía de la región ha influido en el desarrollo de actividades económicas como la minería (particularmente de oro), la agricultura (incluyendo cultivos de café, caña de azúcar y frutas), y el turismo ecológico. La minería, en particular, ha generado un impacto significativo tanto en la economía como en el medio ambiente de la provincia. En la Tabla 28 se presenta un resumen de las principales actividades económicas de Soto Norte

Tabla 28 Resumen de Actividades Económicas de Soto Norte – Santander

Actividad Económica	Descripción
Minería	Predominante en la región, especialmente la extracción de oro y otros metales preciosos, empleando técnicas tradicionales y modernas.
Agricultura	Producción agrícola centrada en cultivos como café, maíz, frijol y papa, favorecida por las condiciones climáticas y geográficas.
Ganadería	Cría de ganado bovino y caprino, con énfasis en la producción de carne y leche, importante en las zonas rurales.
Turismo	Desarrollo del turismo ecológico y cultural, con atractivos como parques naturales, rutas de senderismo y patrimonio histórico.
Comercio Local	Pequeñas y medianas empresas dedicadas al comercio de bienes de consumo, productos agrícolas y artesanías locales.
Artesanías	Producción artesanal, incluyendo tejidos, cerámicas y productos derivados de la fauna y flora local.
Silvicultura	Explotación y manejo de bosques para la producción de madera y productos derivados, así como para la conservación ambiental.

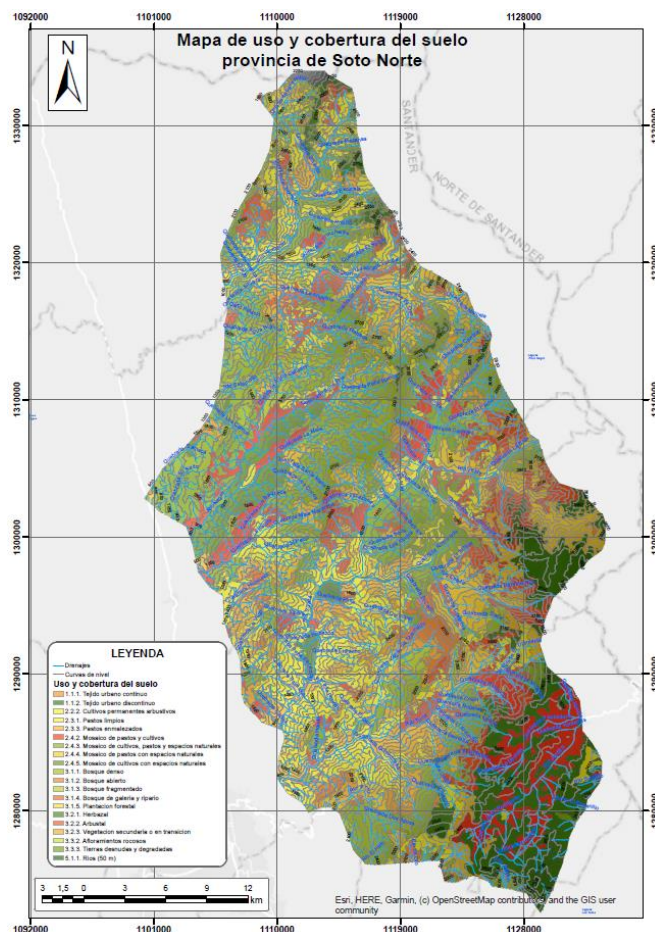
Fuente: Autoría propia con base en Loreta Ballesteros (2023)

En la Figura 6 se muestran el Mapa de uso y cobertura del suelo que permite observar una diversidad de usos del suelo, destacando áreas de vegetación natural, actividades agropecuarias, zonas urbanas y cuerpos de agua. Predominan zonas agrícolas y de pastizales en el centro y norte de la provincia, mientras que el sur está dominado por áreas de bosque y conservación. Las áreas urbanas están concentradas en ciertos

⁵⁹ Ibíd., p. 22.

puntos, posiblemente reflejando centros poblados o infraestructuras. Este mapa es útil para identificar las zonas más adecuadas para proyectos de energía solar fotovoltaica, considerando que áreas agrícolas y pastizales ofrecen mayor viabilidad para instalaciones, mientras que las áreas forestales requieren protección ambiental.

Figura 6 Actividad Económica y Uso de Suelo



Fuente: Grupo de Investigación Galileo – UIS (2024)

6.2.2 Recopilación de Datos Meteorológicos

La Provincia de Soto Norte en el Departamento de Santander, Colombia, presenta una variedad de condiciones meteorológicas debido a su diversa geografía y variada altitud. A continuación, se describen los principales datos meteorológicos de la región:

6.2.2.1 Temperatura

Zonas Altas: En las áreas montañosas, donde las elevaciones pueden superar los 3,000 metros sobre el nivel del mar, las temperaturas son frías, con valores que oscilan entre los 5°C y los 12°C. Estas zonas incluyen páramos y áreas cercanas a la Sierra Nevada del Cocuy.

Zonas Intermedias y Valles: A medida que se desciende hacia los valles interandinos, las temperaturas se moderan, generalmente variando entre 12°C y 18°C. Estas zonas son ideales para cultivos como el café, que requieren un clima templado.

Zonas Más Bajas: En las áreas más bajas de la provincia, las temperaturas pueden alcanzar los 20°C o más, con un clima cálido-templado. Estas áreas son menos comunes en la provincia, pero donde existen, favorecen cultivos de caña de azúcar y frutas tropicales⁶⁰.

6.2.2.3 Precipitación

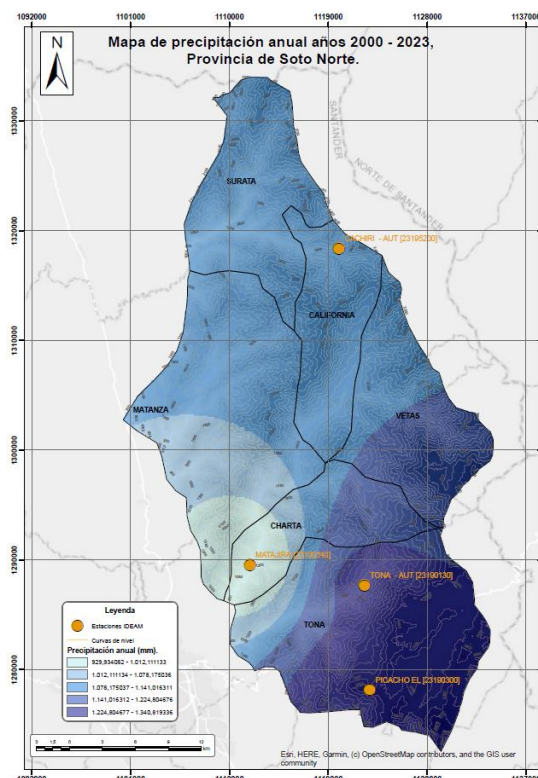
Régimen de Lluvias: La provincia de Soto Norte experimenta un régimen de lluvias bimodal, con dos temporadas lluviosas principales, una en abril-mayo y otra en octubre-noviembre. La precipitación anual promedio varía ampliamente dependiendo de la altitud y la exposición al viento.

Zonas Húmedas: Las áreas de mayor altitud y las laderas orientadas hacia el oriente tienden a recibir más precipitaciones, con valores que pueden superar los 2,000 mm anuales. Estas zonas son clave para la recarga de acuíferos y la regulación hídrica.

⁶⁰ *Ibíd.*, p. 66.

Zonas Secas: Las áreas que se encuentran en sombra orográfica (zonas protegidas del viento húmedo por las montañas) reciben menos precipitación, con valores que pueden estar por debajo de los 1,000 mm anuales⁶¹.

Figura 7 Nivel de Precipitación de la Provincia Soto Norte



Fuente: Grupo de Investigación Galileo – UIS (2024)

6.2.2.4 Humedad Relativa

La humedad relativa es generalmente alta en toda la provincia, especialmente en las zonas montañosas y durante las temporadas de lluvia. Los valores suelen estar por

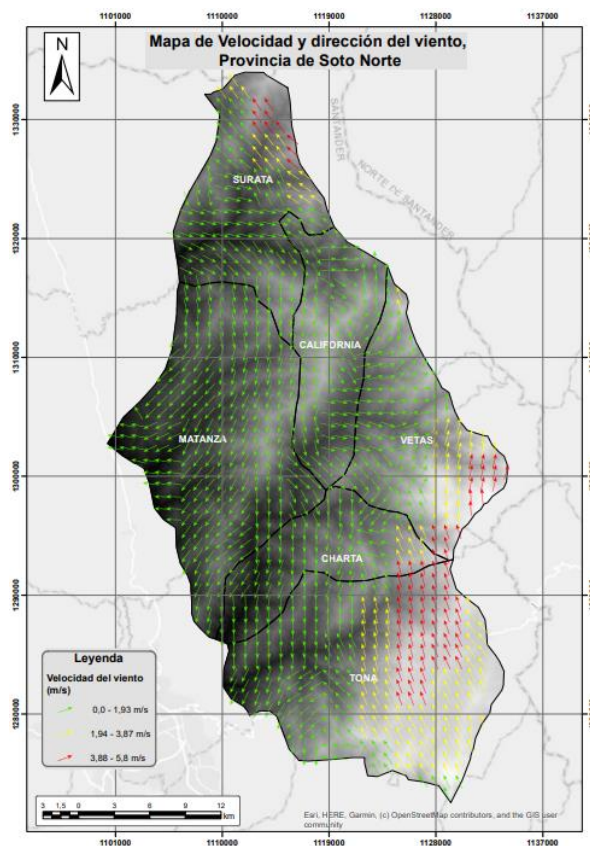
⁶¹ IDEAM. Atlas climatológico de Colombia / Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). En: <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=46264>

encima del 70%, contribuyendo a la formación de neblina en las zonas de alta montaña y promoviendo una vegetación densa⁶².

6.2.2.5 Vientos

La dirección y velocidad del viento varían según la topografía. Las zonas más altas pueden experimentar vientos fuertes, especialmente en los picos y crestas montañosas, lo que puede acentuar la sensación de frío. En los valles, los vientos tienden a ser más suaves y canalizados por la topografía⁶³.

Figura 8 Vientos de Soto Norte



Fuente: Grupo de Investigación Galileo – UIS (2024)

⁶² Ibíd., p. 88.

⁶³ UPME. Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia de 2006.

6.2.2.6 Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial también varía significativamente según la altitud. En las zonas altas y húmedas, la evapotranspiración es relativamente baja debido a las temperaturas frías y la alta humedad. En contraste, en las zonas más cálidas y secas, la evapotranspiración es más alta, lo que puede afectar la disponibilidad de agua para la agricultura y otras actividades económicas⁶⁴.

6.2.3 Datos Ambientales de la Provincia de Soto Norte

La Provincia de Soto Norte en el Departamento de Santander, Colombia, se caracteriza por su diversidad ambiental, derivada de su compleja topografía y variedad climática. A continuación, se describen los principales datos ambientales de la región:

6.2.3.1 Ecosistemas

Páramos: Soto Norte alberga importantes áreas de páramo, especialmente en las zonas más altas, que están entre los 3,000 y 4,000 metros sobre el nivel del mar. Estos ecosistemas son fundamentales para la regulación hídrica, actuando como esponjas naturales que capturan y liberan agua lentamente, lo que sostiene el caudal de ríos y quebradas. Los páramos también son ricos en biodiversidad, con especies endémicas de flora y fauna que dependen de estas condiciones ambientales únicas.

Bosques Andinos: A altitudes intermedias, la provincia cuenta con bosques andinos, que son importantes tanto por su biodiversidad como por su capacidad para almacenar

⁶⁴ ACEVEDO, Álvaro. Pensar el cambio socioambiental: un acercamiento a las acciones colectivas por el páramo de Santurbán (Santander, Colombia). En: Revista Colombiana de Sociología. vol. 3, nro. 15. 1-10 p. [Consultado: 25 de agosto de 2020]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-159X2019000100157&script=sci_arttext

carbono. Estos bosques son hogar de numerosas especies de aves, mamíferos y plantas, muchas de ellas en peligro de extinción. Además, los bosques andinos juegan un papel clave en la protección del suelo contra la erosión y en la estabilización del clima local.

Ecosistemas Subtropicales: En las partes más bajas de la provincia, se encuentran zonas con ecosistemas subtropicales que incluyen selvas y bosques húmedos, ricos en biodiversidad y con un alto valor ecológico. Estas áreas son importantes para la conservación de especies y para el mantenimiento de los ciclos ecológicos⁶⁵.

6.2.3.2 Calidad del Agua

La calidad del agua en Soto Norte es un aspecto crítico, especialmente debido a la influencia de la minería. Las fuentes hídricas, como el río Suratá y otras quebradas, son esenciales para el abastecimiento de agua potable y para las actividades agrícolas. Sin embargo, la minería, especialmente la extracción de oro, ha generado preocupación por la contaminación de las aguas con metales pesados y otros contaminantes. La calidad del agua es monitoreada, pero existen retos significativos para mantenerla dentro de los estándares aceptables para consumo humano y uso agrícola.

6.2.3.3 Contaminación Ambiental

Minera: La minería en Soto Norte, una de las principales actividades económicas, ha sido una fuente importante de contaminación, afectando la calidad del aire, agua y suelo. La contaminación por mercurio y cianuro, utilizados en la extracción de oro, es una preocupación ambiental seria. Además, la deforestación asociada a la minería ha contribuido a la pérdida de cobertura vegetal, aumentando el riesgo de erosión y deslizamientos de tierra.

⁶⁵ *Ibíd.*, p. 5

Agrícola: El uso de agroquímicos en la agricultura, aunque no tan extendido como la minería, también representa una fuente de contaminación, afectando tanto los suelos como los cuerpos de agua cercanos⁶⁶.

6.2.3.4 Biodiversidad

La provincia es un área de alta biodiversidad, debido a su variada altitud y diversidad de ecosistemas. En Soto Norte se encuentran especies endémicas de plantas y animales, algunas de las cuales están en peligro debido a la pérdida de hábitat y la degradación ambiental. Los esfuerzos de conservación se centran en proteger estas especies y en restaurar los ecosistemas afectados por actividades humanas⁶⁷.

6.2.3.5 Recursos Naturales

Soto Norte es rica en recursos naturales, incluyendo minerales (especialmente oro), agua y suelos fértiles en ciertas áreas. La explotación de estos recursos ha sido históricamente la base de la economía local, pero también ha llevado a conflictos por el uso de la tierra y la protección del medio ambiente. La gestión sostenible de estos recursos es un desafío clave para el desarrollo de la región⁶⁸.

6.2.3.6 Gestión Ambiental y Conservación

Existen varias iniciativas de conservación y manejo ambiental en la provincia, enfocadas en la protección de los páramos, la reforestación de áreas degradadas, y la promoción

⁶⁶ *Ibíd.*, p. 88

⁶⁷ SIB COLOMBIA. Estudio de Impacto Ambiental -EIA- para el proyecto "Explotación Subterránea de Minerales Auroargentíferos Soto Norte"_BENTOS. En: Proyecto de Explotación Subterránea de Minerales Auroargentíferos "Soto Norte". [Consultado: 25 de agosto de 2024]. Disponible en: https://ipt.biodiversidad.co/permisos/resource?r=01252_eia_minesa_bentos

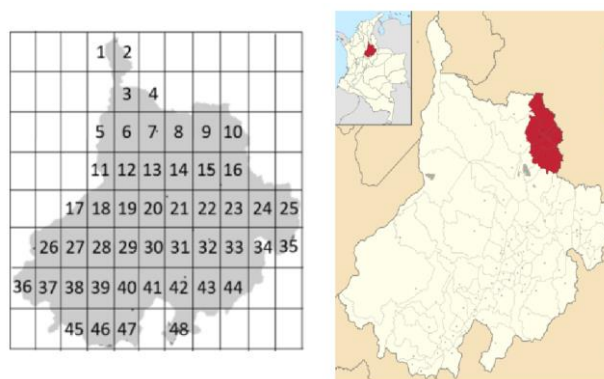
⁶⁸ *Ibíd.*, p. 6

de prácticas mineras y agrícolas sostenibles. Sin embargo, la implementación de estas iniciativas enfrenta retos significativos, como la presión económica para expandir la minería y la agricultura, y la falta de recursos para la vigilancia y control ambiental.

6.3 Cuantificación del potencial de Energía en Soto Norte

Al tomar como base el trabajo desarrollado por Muñoz *et al.* (2019)⁶⁹ en el que se realizó un estudio del potencia de energía solar en Santander se pudo establecer que para la Provincia de Soto Norte, ubicada aproximadamente, a partir de la Figura 9 se pudo establcer que la zona del proyecto corresponde al área aproximada del cuadrante 10 y parte del cuadrante 16.

Figura 9 Ubicación de Provincia de Soto Norte – Santander



Nota. Elaboración propia con base en Muñoz (2019)⁷⁰

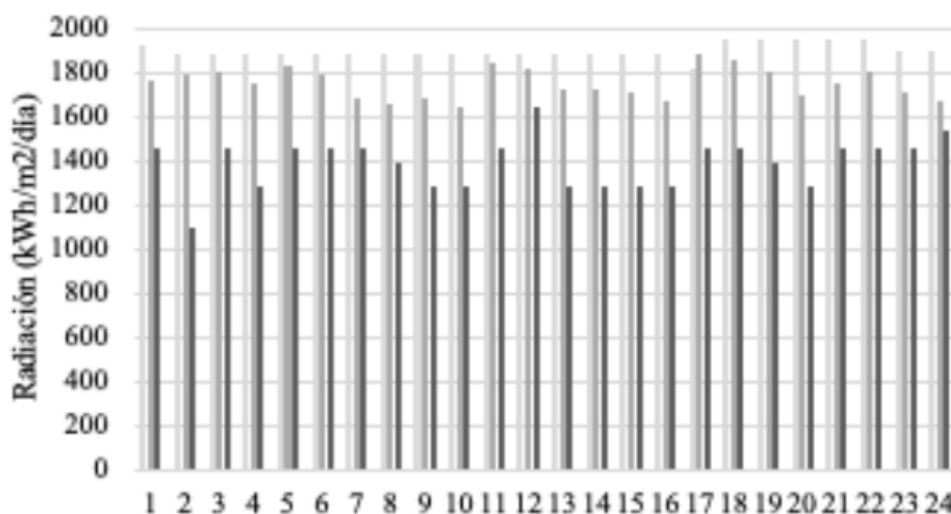
Al identificar los resultados obtenidos por la investigación, se tomó como base datos de radiación solar de la NASA desde el aplicativo NASA RETSCREEN, de METEONORN y

⁶⁹ MUÑOZ MALDONADO, Yecid Alfonso; ACEBEDO RONCANCIO, German David; SANTAMARÍA SAAVEDRA, Juan David. RINCÓN, Carlos Augusto. Evaluación del potencial de energía solar en Santander, Colombia. En: Prospectiva [en línea]. Bucaramanga: Universidad Autónoma de Bucaramanga, julio-diciembre de 2019. vol. 17, nro. 2. p. 7-12. [Consultado: 13 de agosto de 2024]. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7047512>.

⁷⁰ *Ibíd.*, p. 2.

del IDEAM, de manera que en la Figura 10 se muestra el nivel de radiación solar para la provincia de Soto Norte, con un nivel aproximado de $1900 \frac{kWh}{m^2}/día$ según información de la NASA; $1700 \frac{kWh}{m^2}/día$ a partir de la información de Meteonorm; y $1400 \frac{kWh}{m^2}/día$ desde la base de datos del IDEAM. Aunque los datos varían de forma apreciable entre cada fuente se puede concluir que, el modo o cuadrante 10 cuenta con un potencial aceptable para la implementación de sistemas de energía solar. Al tener en cuenta el cuadrante 16, se puede identificar que, según los datos obtenidos por la investigación, los valores comparados con el cuadrante 10 son los mismos, de modo que se pueden tomar como uno solo resultado.

Figura 10 Radiación Solar de Santander



Timado del trabajo de Muñoz *et al.* (2019)

De forma adicional, los autores establecieron un promedio de radiación solar anual, a partir de los datos obtenidos de cada plataforma empleada, de forma que en la Tabla 29 se presentan los resultados promediados.

Tabla 29 Niveles de Radiación Solar Promedio

Plataforma	Radiación promedio ($\frac{kWh}{m^2}$)/año
Nasa RetScreen	1891.08
Meteoform	1758.375
IDEAM	1452.396

Fuente: Muñoz (2019)⁷¹

El estudio analiza la Radiación Global Horizontal (GHI) como un factor espacial crucial. El nivel mínimo de esta radiación, esencial para garantizar la factibilidad del proyecto, será aquel que produzca indicadores positivos, esto en combinación con los costos y la capacidad de generación en cada ubicación.

- Nivel de Radiación Solar

La ubicación de Colombia cerca del Ecuador le proporciona una considerable radiación solar anual. Según información suministrada por el IDEAM⁷² y la UPME⁷³, esta constante es superior a 4,5 kWh/m² al día. En varias regiones, el país tiene una alta disponibilidad solar que se puede aprovechar.

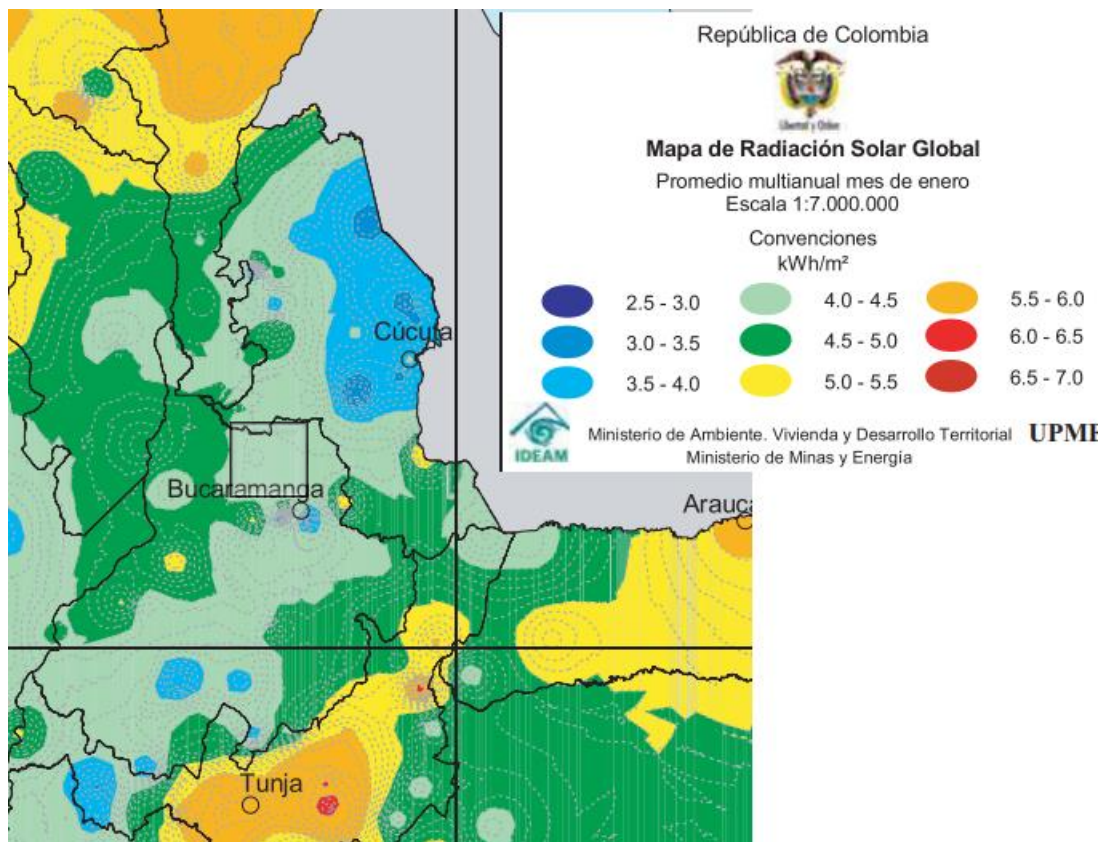
En zonas como La Guajira, Atlántico, Bolívar y Magdalena se observan niveles de radiación superiores a 5,5 kWh/m², lo que permite la adopción de distintas tecnologías energéticas para promover la sostenibilidad y combatir el cambio climático. A continuación, el IDEAM presenta el mapa de radiación elaborado.

Figura 11 Radiación Solar Promedio en Santander – Enero (IDEAM)

⁷¹ Ibíd., p. 3.

⁷² IDEAM, Op. cit., p.35

⁷³ UPME, Op. cit., p.10

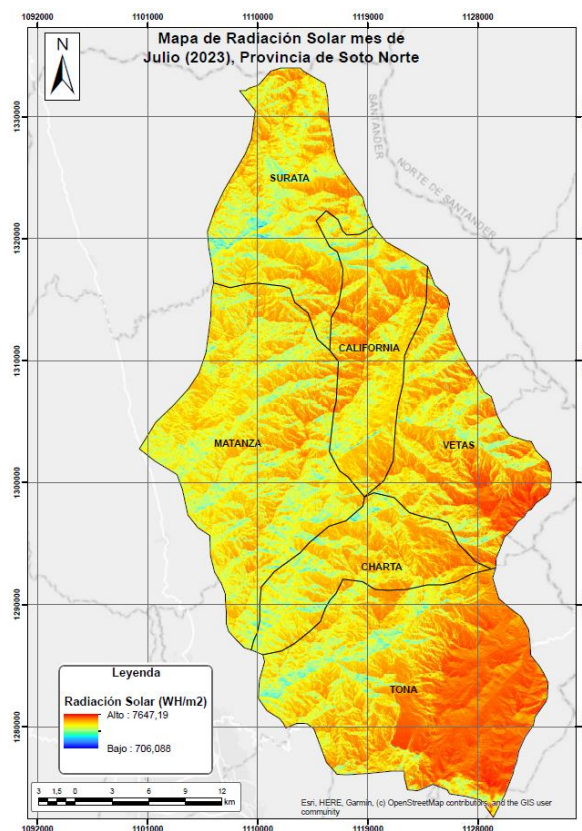


Fuente: UPME – IDEAM (2022)⁷⁴

Al tomar como base la delimitación de cuadrante de la Figura 10 la zona del rectángulo que se observa en la Figura 11, se observa una aproximación de la radiación solar de Soto Norte (California, Charta, Matanza, Surata y Tona) lo que permite identificar que el promedio para el mes de enero es de 4.0 a 4.5 KWh/m^2 .

⁷⁴ Ibid., p. 16.

Figura 12 Radiación Global y Difusa – Provincia de Soto Norte – Mes de Julio 2023



Fuente: Grupo de Investigación Galileo - UIS

6.3.1. Procesamiento y Análisis de Datos con SAM

6.3.1.1. Simulación con SAM

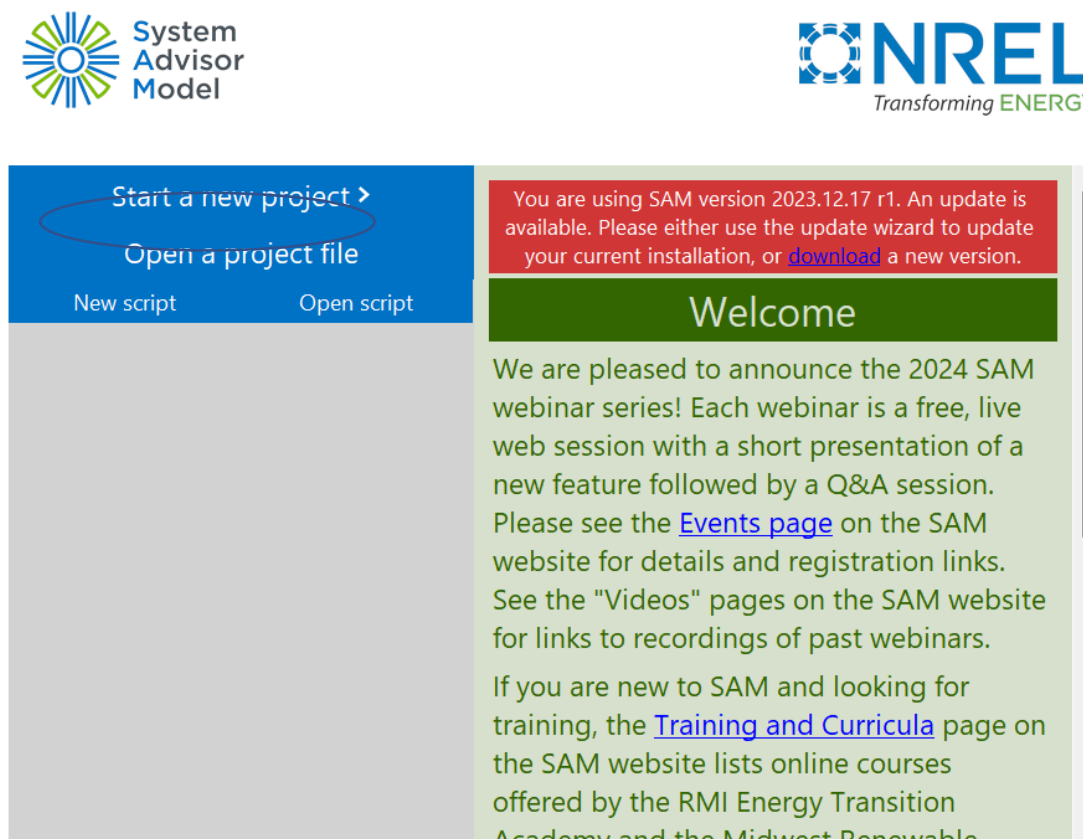
Para desarrollar el proceso de simulación se tuvo en cuenta que era necesarios tener en cuenta los diferentes parámetros correspondientes al dispositivo de recolección de la radiación solar, de la provincia de Soto Norte, en Santander, la cual está compuesta por los municipios de Matanza, California, Suratá, Vetás, Charta y Tona.

Para iniciar el proceso de determinación de las características adecuadas para un proyecto de generación de energía eléctrica y medición del potencial una vez instalado el programa SAM (System Advidor Model), se seleccionaron las opciones de

configuración que permitieran desarrollar un análisis apropiado para el proyecto. A continuación, se presentará una descripción detallada de los pasos realizados para las simulaciones realizadas y los resultados obtenidos.

6.3.1.2. Análisis de Sensibilidad con SAM

Figura 13 Inicio de SAM



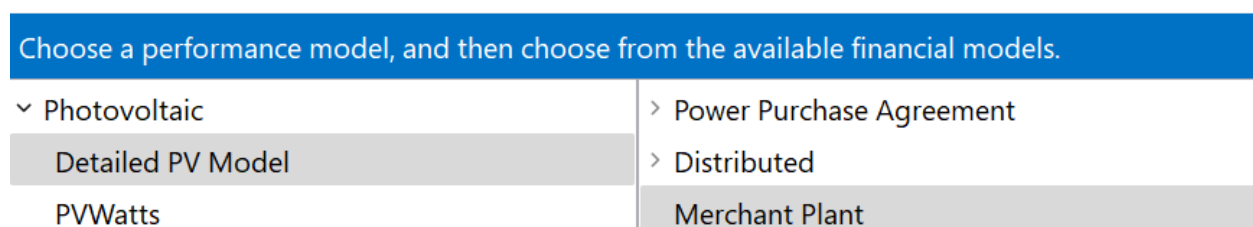
Elaboración Propia

Como se observa en la Figura 13 el programa SAM cuenta con diferentes opciones para trabajar, desde la creación de script de código de programación, hace la selección de proyectos con múltiples opciones de selección.

Para el proyecto se seleccionó la opción Star new project (Iniciar nuevo proyecto).

Una vez realizada la elección se despliega una ventana se permitirá escoger el modelo de sistema a implementar con múltiples opciones como se muestra en la Figura 14. Para el proyecto se seleccionó un modelo de panel fotovoltaico (Photovoltaic), modelo de panel solar detallado (Detailed PV Model) y de planta comercial (Merchant Plant). Una vez seleccionado el modelo de simulación se selecciona la opción Ok

Figura 14 Selección de Modelo de Simulación



Fuente: Autoría Propia

Al seleccionar el modelo, de forma automática se realizará una precarga de las características con las que se evaluará el sistema a desarrollar de forma predeterminada. en la Tabla 30 se presenta un resume las características clave del programa SAM que son fundamentales para el modelado y análisis de proyectos de energía, desde la ubicación y recursos hasta los parámetros financieros y económicos.

Tabla 30 Parámetros Característicos para el Modelo de Simulación

Característica	Descripción
Location and Resource	Permite la selección de ubicaciones geográficas específicas y la importación de datos climáticos para simular la irradiancia solar, velocidad del viento, y otros recursos energéticos disponibles en el sitio.
Module	Selección y configuración de módulos solares fotovoltaicos, incluyendo tipos de tecnología (monocristalino, policristalino, thin-film) y especificaciones técnicas como potencia, eficiencia, coeficiente de temperatura, y área del módulo.
Inverter	Configuración del inversor, incluyendo el tipo, la eficiencia, la capacidad de entrada y salida, y otros parámetros como la relación DC/AC, que afectan el rendimiento del sistema fotovoltaico.
System Design	Diseño del sistema, que incluye la disposición de los módulos, la orientación, el ángulo de inclinación, y la capacidad total del sistema. También permite ajustar parámetros como la sobrecarga del inversor y el tamaño de la batería, si aplica.

Shading and Layout	Herramienta para simular el efecto de sombras sobre los módulos solares debido a obstáculos cercanos (edificios, árboles, etc.), y para optimizar la disposición física de los paneles en el sitio.
Losses	Estimación de pérdidas del sistema debido a factores como suciedad en los paneles, mismatches, cableado, y temperaturas elevadas. SAM permite ajustar estos factores para obtener una estimación más precisa del rendimiento del sistema.
Grid Limits	Configuración de límites de la red eléctrica, como la capacidad máxima de inyección de energía a la red y los límites de exportación/importación de energía, para asegurar la compatibilidad del sistema con las normas locales.
DC Degradation	Modela la degradación anual de los módulos solares, que afecta la producción de energía a lo largo del tiempo. Esta característica permite simular cómo la disminución de la eficiencia influye en la viabilidad económica del proyecto.
Installation Cost	Ingreso de costos detallados de instalación, incluyendo el costo de los módulos, inversores, estructura de montaje, mano de obra, permisos y otros gastos asociados. SAM usa estos datos para calcular el costo total del proyecto.
Financial Parameters	Permite ajustar los parámetros financieros del proyecto, como la tasa de descuento, tasa de interés del préstamo, período de amortización, y otros factores que influyen en la evaluación económica del proyecto.
Revenue	Cálculo de los ingresos generados por la venta de energía a la red o el ahorro en las facturas de electricidad, considerando tarifas de electricidad, acuerdos de compra de energía (PPA), y otros factores de ingresos.
Incentives	Modelado de incentivos financieros como créditos fiscales, subvenciones, tarifas preferenciales, y otras políticas de apoyo que pueden mejorar la rentabilidad del proyecto.
Depreciation	Configuración de la depreciación de activos del proyecto según diferentes métodos (lineal, MACRS, etc.), lo que permite evaluar el impacto de la depreciación en los impuestos y el flujo de caja.
Electricity Purchases	Simulación de la compra de electricidad desde la red para cubrir las necesidades energéticas cuando el sistema no genera suficiente energía, incluyendo tarifas de energía, horarios de compra, y otros factores relevantes.

La tabla presenta una descripción de las principales características de software SAM. Elaboración propia con base en Guía de Introducción System Advisor Model (SAM)⁷⁵

En la

Figura 15 se presentan las características que se tienen en cuenta para el modelo fotovoltaico, los cuales pueden ser consultados en cada opción para determinar ajustes

⁷⁵ SAM. Guía de Introducción de System Advisor Model (SAM). [sitio en línea]. 2022. [Consultado: 12 de agosto de 2024]. Disponible en: https://sam.nrel.gov/images/web_page_files/sam-getting-started-for-translation-2020-12-16-spanish.pdf.

que se acerque al modelo que permitan un desempeño apropiado para la zona del proyecto.

Figura 15 Características de Análisis del Modelo de Simulación

Photovoltaic
Merchant
Location and Resource
Module
Inverter
System Design
Shading and Layout
Losses
Grid Limits
DC Degradation
Installation Costs
Operating Costs
Financial Parameters
Revenue
Incentives
Depreciation
Electricity Purchases

- Zonas Óptimas

El primer parámetro con el que se inició a trabajar fue identificar las zonas más óptimas para la implementación de sistemas de energía solar, de modos que fuera puntos de mayor recolección y que facilitaran la cuantificación del potencial de energía solar producida en la zona. Para esto se contó con el apoyo del grupo de investigación Geomática de la UIS, quienes proporcionaron la información de cada punto geográfico y un mapa de medición o determinación de zonas potenciales creado por ellos desde la herramienta ArcGis. Al tomar como base la investigación desarrollada por, en la Tabla 31

se presenta los criterios tenidos en cuenta para la implementación de sistemas solares. Proyecto en el cual se exploraron los principales aspectos a tener en cuenta, para la puesta en marcha de parques Solares en Colombia.

Tabla 31 Criterios de Ubicación de Sistemas de Energía Solar

Variable	Dimensión	Condición
Potencial de energía	Física	Rentable
Cuerpos de agua		< 60 m
Humedales		< 60 m
Riesgo de inundación		Zonas inundables
Pendiente		> 10%
Área disponible		< 100 ha
Áreas Protegidas	Biótica	Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP)
Zonas de alto valor ecosistémico		Páramos, manglares, ciénagas
Impacto Visual de Expansión	Económica	< 500 m (centros poblados)
Distancia a vías		< 30, 45 y 60 m
Distancia a red eléctrica		< 60 m
Zonas con alto valor arqueológico	Cultural	Áreas Arqueológicas Protegidas
Territorios étnicos		Resguardos Indígenas
ETCR (Posconflicto)	Política	Veredas designadas como ETCR
Cultivos de coca		Existencia cultivos de cocoa 2018-2019

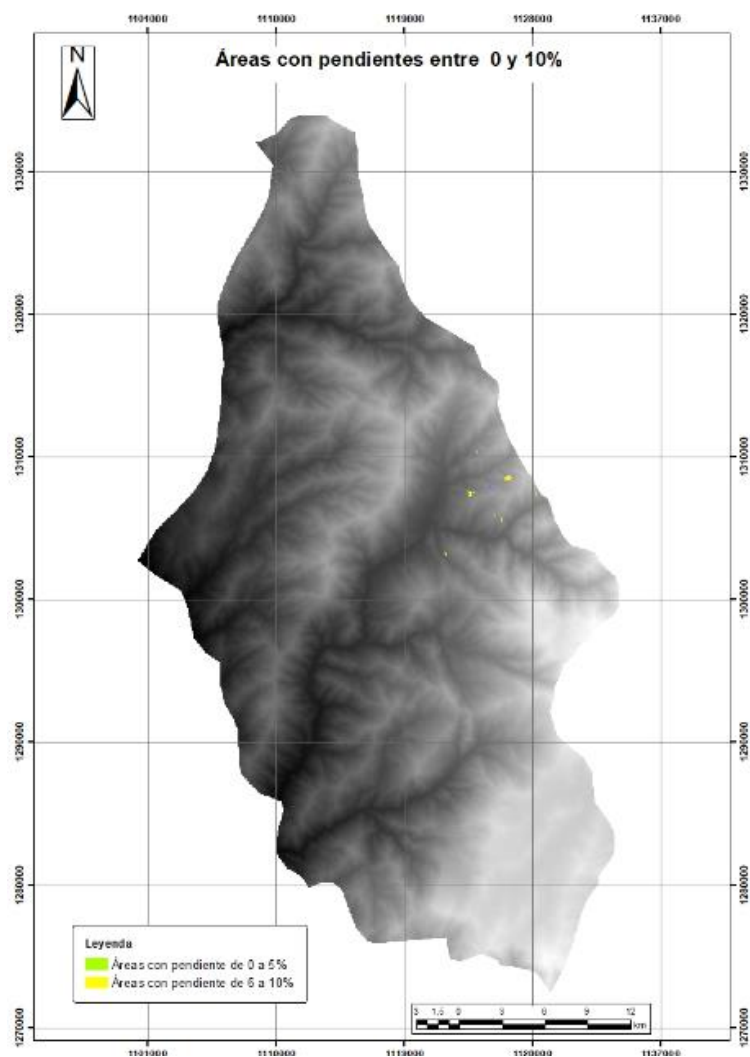
Nota. En la Tabla 31 se presentan los principales parámetros que se tomaron en cuenta para el desarrollo de las simulaciones. Elaboración propia con base García Urrego 2017

Al tener en cuenta los criterios del trabajo de García Urrego (2017)⁷⁶, el Grupo de Investigación Geomática de la UIS, proporcionó los lugares con potencial de implementación de energía solar con las inclinaciones entre 0% a 10%, polígonos que se

⁷⁶ GARCÍA URREGO, Simón. Análisis espacial multicriterio para la ubicación de parques eólicos y granjas solares en Colombia. [en línea] Trabajo de investigación Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. 2021 pp. 1-142. [Consultado: 16 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79490>.

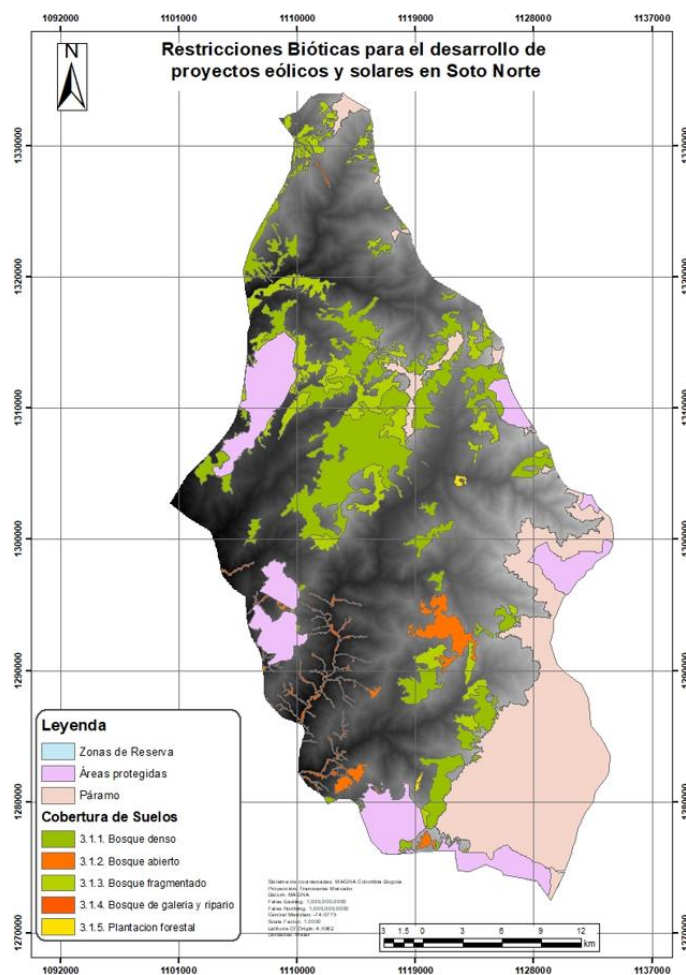
identificaron para la Provincia de Soto Norte en Santander, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16 Áreas Óptimas para el desarrollo de proyectos eólicos y solares en la Provincia de Soto Norte



Fuente: Grupo de Investigación Galileo UIS (2024)

Figura 17 Áreas con Restricción para el Desarrollo de Sistemas Fotovoltaicos

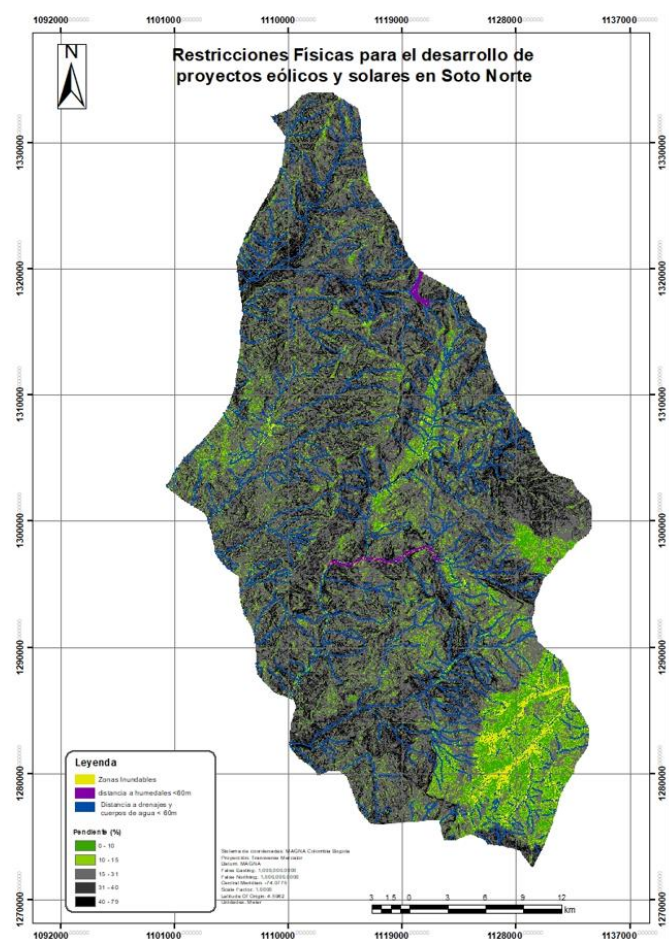


Fuente: Grupo de Investigación Galileo - UIS (2024)

De forma adicional, desde Geomática también se obtuvo un mapa de las restricciones bioéticas para el desarrollo de proyectos solares como se muestra en la

Figura 17.

Figura 18 Restricciones Físicas para el Desarrollo de los Proyectos Solares y Eólicos de Soto Norte



Fuente: Grupo de Investigación Galileo - UIS (2024)

Como se muestra en la Figura 18 en amarillo se marcan las zonas potencialmente inundables, de color morado los humedales con una distancia menor a 60 m; en color

azul oscuro se marcan drenajes u cuerpos de agua con una distancia menor a 60 m; en color verde oscuro los espacios con pendiente con valor máximo de 10%; en verde manzana pendientes de 10% a 15%; en color gris se marcan los espacios con pendiente de 15% a 31%; en color gris oscuro se muestran los lugares con 31% a 40% de pendiente y por último en color negro los potenciales lugares entre 40% a 79%.

Al tener en cuenta los criterios de decisión aplicados en proyecto desarrollado por Abed & Nagasaka, (2017)⁷⁷, dado que las granjas solares suelen establecerse en suelos sólidos, el riesgo de inundación es una preocupación fundamental para los proyectos. Esta condición los hace vulnerables a inundaciones, lo cual podría resultar en gastos extras para adquirir equipos resistentes, reparar daños y siniestros, o afectar la capacidad operativa. El IDEAM (2020)⁷⁸ realizó un estudio en el que se identificaron las áreas de Colombia con riesgo de inundación, que se tomarán en cuenta como restricciones para el desarrollo de dichos proyectos.

Los humedales se caracterizan por la saturación temporal o permanente de sus suelos con agua. Estos ambientes cuentan con una biodiversidad destacada y ofrecen una amplia variedad de servicios ecosistémicos. Los humedales se encuentran en diferentes formas, tales como pantanos, marismas, turberas, manglares, lagunas y deltas. Dentro de sus funciones se encuentra proveer hábitats para la vida silvestre, filtrar y purificar el agua, y posiblemente controlar inundaciones.

Por otro lado, los cuerpos de agua son extensiones que contienen agua en distintas formas y tamaños sobre la superficie terrestre. Este conjunto incluye océanos, mares, ríos, lagos, lagunas, arroyos, embalses, pantanos y estanques. El paisaje depende vitalmente de estos elementos, ya que desempeñan un papel fundamental en los

⁷⁷ ABED ANWARZAI, Op. cit., p. 7.

⁷⁸ IDEAM. Amenazas Inundaciones. [sitio web]. Bogotá; [Consultado: 14 de agosto de 2024]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>

ecosistemas y para la vida en el planeta. Los océanos y mares, ríos, lagos y lagunas, embalses, pantanos, humedales y estuarios son algunos de los tipos más comunes de cuerpos de agua. Se destaca que al revisar la información disponible por el IDEAM⁷⁹ sobre áreas urbanas y corregimientos en Santander bajo peligro de inundación se encuentran Girón y Cimitarra, lo que descarta a la provincia de Soto Norte, pues estos son: California, Charta, Matanza, Surata y Tona.

Al retomar a García (2017)⁸⁰ en los proyectos de energía solar fotovoltaica, la inclinación de los paneles es un factor técnico fundamental para maximizar la captación del sol a lo largo del año. Las áreas con suaves pendientes son especialmente propicias, al hacer más fácil la instalación y ajuste de los paneles solares. No obstante, terrenos con pendientes abruptas pueden plantear desafíos que en algunos casos pueden hacer que el proyecto no sea factible debido a una producción de energía reducida. Aunque se conocen casos en lugares con pendientes superiores, los autores recomiendan valores de pendiente por debajo del 10%⁸¹. Es fundamental enfatizar que este análisis se lleva a cabo a nivel nacional, dando prioridad a las condiciones generales del terreno. Los autores también estacaron que las áreas con pendientes pronunciadas complican la construcción de proyectos debido a su influencia en condiciones de accesibilidad y estabilidad deficientes.

- Dificultades de Acceso y Carreteras

Como se muestra en la Figura 19 para las selecciones de los espacios para proyectos de energía solar, también se toda información concerniente a las áreas que cuenta con distancias menores a 500 m de centros poblados; distancia a vías menor a 60 m; y distancia de redes eléctricas menores a 60 m⁸².

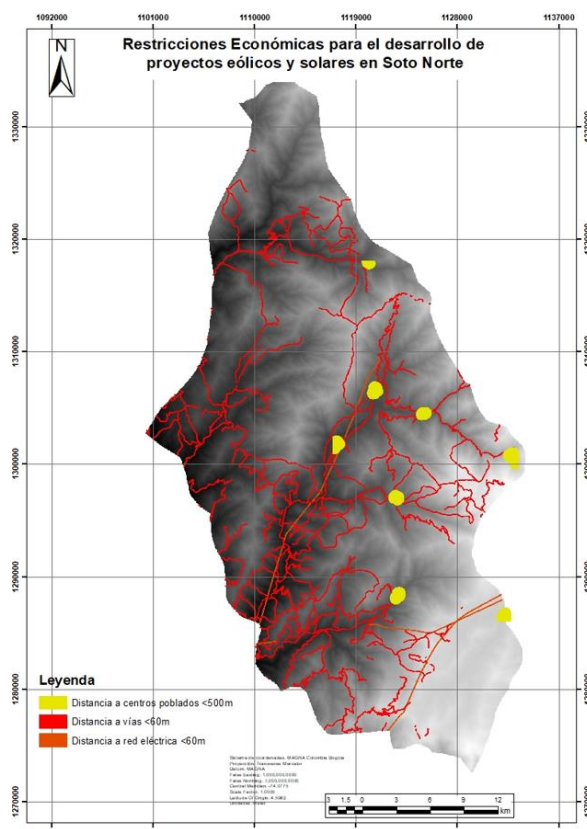
⁷⁹ Ibit, p. 13

⁸⁰ GARCÍA URREGO, Op. cit., p. 53.

⁸¹ GARCÍA URREGO, Op. cit., p. 54.

⁸² GARCÍA URREGO, Op. cit., p. 56.

Figura 19 Restricciones Económicas para proyectos solares en Soto Norte.



Fuente: Grupo de Investigación Galileo - UIS (2024)

A partir de los parámetros de la resolución 9-0708 de 2013⁸³ la cual estipula el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas -RETIE, expedida por Ministerio de Minas y Energía. En comparación con los aerogeneradores, los proyectos solares fotovoltaicos requieren menos espacio neto debido a que no necesitan separar los

⁸³ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 9-0708 de 2013. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. [sitio web]. Bogotá; [Consultado: 16 de agosto de 2024]. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/3821/22727/Resolucion_90907_Fe_de_erratas_Anexo_General_RETIE.pdf

dispositivos entre sí. Con la condición mínima de 50 MW y tomando en cuenta los valores de 0.5 MW/ha indicados en la literatura, junto con la información sobre proyectos actualmente operativos en Colombia, se necesita un área mínima de 100 hectáreas o 1 kilómetro cuadrado.

En el caso de la energía solar fotovoltaica, solo se consideran los distanciamientos especificados en las normativas para vías y redes eléctricas, que varían entre 30, 45 o 60 metros para vías dependiendo de su categoría; y entre 32 y 64 metros para líneas de transmisión. La distancia general considerada para las líneas de transmisión es de 60 metros, según el Reglamento RETIE⁸⁴ y la Resolución 2412 de 2013⁸⁵ (Ministerio de Minas y Energía, 2013; Invias & Ministerio de Transporte, 2013).

Los proyectos solares fotovoltaicos tienen la ventaja de poder ubicarse cerca de centros poblados o incluso dentro de ellos, sin generar ruido ni constituir una barrera visual, en términos de impacto visual y expansión. No obstante, estas áreas pueden resultar menos atractivas debido a los altos costos de la tierra cerca de zonas urbanizadas y los grandes requerimientos de espacio. Se fija una distancia de 500 metros desde el borde exterior de los centros urbanos para asegurar espacio para el crecimiento urbano y prevenir efectos visuales y operativos que puedan perturbar las actividades locales⁸⁶.

- Proceso de Simulación

⁸⁴ GARCÍA URREGO, Op. cit., p. 66.

⁸⁵ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Op. cit., p. 3.

⁸⁶ PLANAS, Alexandra; QUINTERO, Juan David; MONTEALEGRE, Libardo. Guía ambiental y social para proyectos de generación fotovoltaicos e híbridos menores o iguales a 1 MW [sitio web]. Publicaciones del Banco Interamericano de Desarrollo. 2021. [Consultado: 16 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/guia-ambiental-y-social-para-proyectos-de-generacion-fotovoltaicos-e-hibridos-menores-o-iguales-1>

Para lograr los procesos de simulación SAM cuenta con una base de datos que es proporcionada por NREL, por lo que cuenta con datos precargados de ubicación geográfica como se muestra en la Figura 20.

Figura 20 Solar Research Library

Solar Resource Library
The Solar Resource library is a list of weather files on your computer. Choose a file from the library and verify the weather data information below.

The default library comes with only a few weather files to help you get started. Use the download tools below to build a library of locations you frequently model. Once you build your library, it is available for all of your work in SAM.

Filter: Name ▾

Name	Latitude	Longitude	Time zone	Elevation	Station ID	Source
daggett_ca_34.865371_-116.783023_psmv3_60_tmy	34.85	-116.78	-8	561	91486	NSRDB
des_moiness_ia_41.586835_-93.624959_psmv3_60_tmy	41.57	-93.62	-6	263	757516	NSRDB
fargo_nd_46.9_-96.8_mts1_60_tmy	46.9	-96.8	-6	274	14914	TMY2
imperial_ca_32.835205_-115.572398_psmv3_60_tmy	32.85	-115.58	-8	-20	72911	NSRDB
phoenix_az_33.450495_-111.983688_psmv3_60_tmy	33.45	-111.98	-7	358	78208	NSRDB
tucson_az_32.116521_-110.933042_psmv3_60_tmy	32.12	-110.94	-7	772	67245	NSRDB

SAM scans the following folders on your computer for valid weather files and adds them to your Solar Resource library. To use weather files stored on your computer, click Add/remove Weather File Folders and add folders containing valid weather files.

C:\Users\Katana GF66 11UE\SAM Downloaded Weather Files

Add/remove weather file folders...

Refresh library

Figura 21 Descarga de Datos Climáticos

Download Weather Files
The NSRDB is a database of thousands of weather files that you can download and add to your solar resource library. Download a default typical-year (TMY) file for most long-term cash flow analyses, or choose files to download for single-year or uncertainty (P50/P90) analyses. See Help for details.

☐ One location ☒ Multiple locations ☐ Advanced download

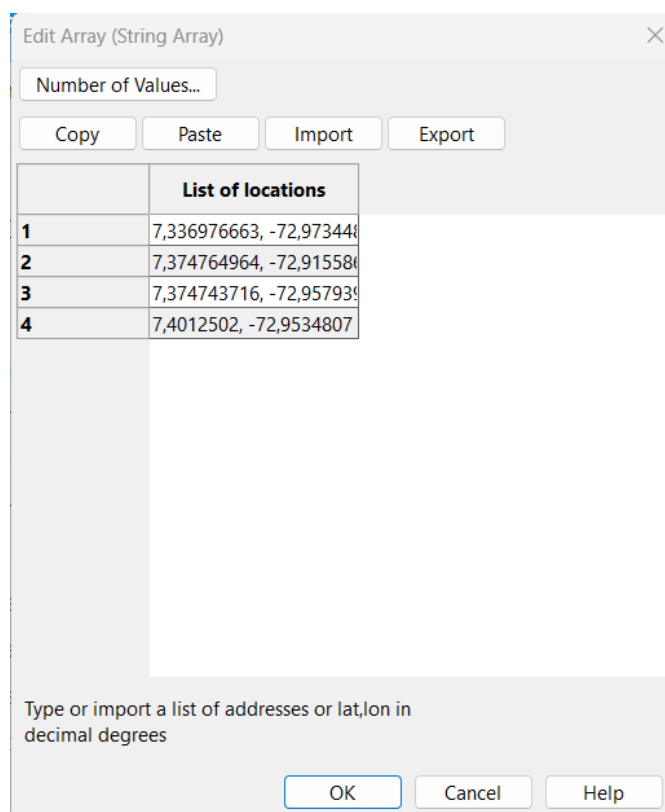
List of locations Edit array... Default TMY file

Download and add to library...

[For locations not covered by the NSRDB, visit the SAM website Weather Page for links to other data sources.](#)

Para el caso del proyecto se empleó de forma inicial la carga de los datos proporcionados por el grupo de investigación de Geomática, para lo que se contó con una base de datos de Excel que contenía información. Para agregar varios puntos se seleccionó la opción Edit array (Ver Figura 23). Una vez cargadas las coordenadas geográficas en grados de latitud y longitud, se seleccionó la opción download and add to library

Figura 22 Colocación de Ubicaciones Múltiples



Como se muestra en la Figura 22 seleccionaron 4 puntos, los cuales contaban con los índices más bajos de pendiente como se muestra en la Tabla 32, cabe recordar que según la investigación de García (2017) se tomaron puntos con porcentaje de pendiente < a 10%.

Tabla 32 Polígonos Geográficos de Menor Pendiente

Polígono	Coordenada Geográficas		Altura (m)	Valor de Pendiente (%)
	Latitud	Longitud		
1	7.336976663	-72.97344828	2.041	7
2	7.374764964	-72.91558652	2.770	7

3	7.374743716	-72.95793942	2.378	9
4	7.4012502	-72.9534807	2.429	2

Elaboración propia

Una vez los datos se han cargado se debe seleccionar el polígono geográfico de la coordenada sobre la cual se va a realizar la simulación, y el proceso se repite para cada polígono y configuración de simulación. Para la prueba inicial se empleó el polígono 1 como se muestra en la Figura 23.

Figura 23. Polígono 1

7_336976663_-72_97344828_40.6108_-74.0124_psm...	40.61	-74.02	-5	7	1243968	NSRDB
--	-------	--------	----	---	---------	-------

Figura 24 Información de Datos Climáticos Cargados

Weather Data Information

The following information describes the data in the highlighted weather file from the Solar Resource library above. This is the file SAM will use when you click Simulate.

Weather file:

Header Data from Weather File

Latitude	40.61 degrees	Location	1243968
Longitude	-74.02 degrees	Data Source	NSRDB
Time zone	GMT -5	For NSRDB data, the latitude and longitude shown here from the weather file header are the coordinates of the NSRDB grid cell and may be different from the values in the file name, which are the coordinates of the requested location.	
Elevation	7 m		
Time step	60 minutes		

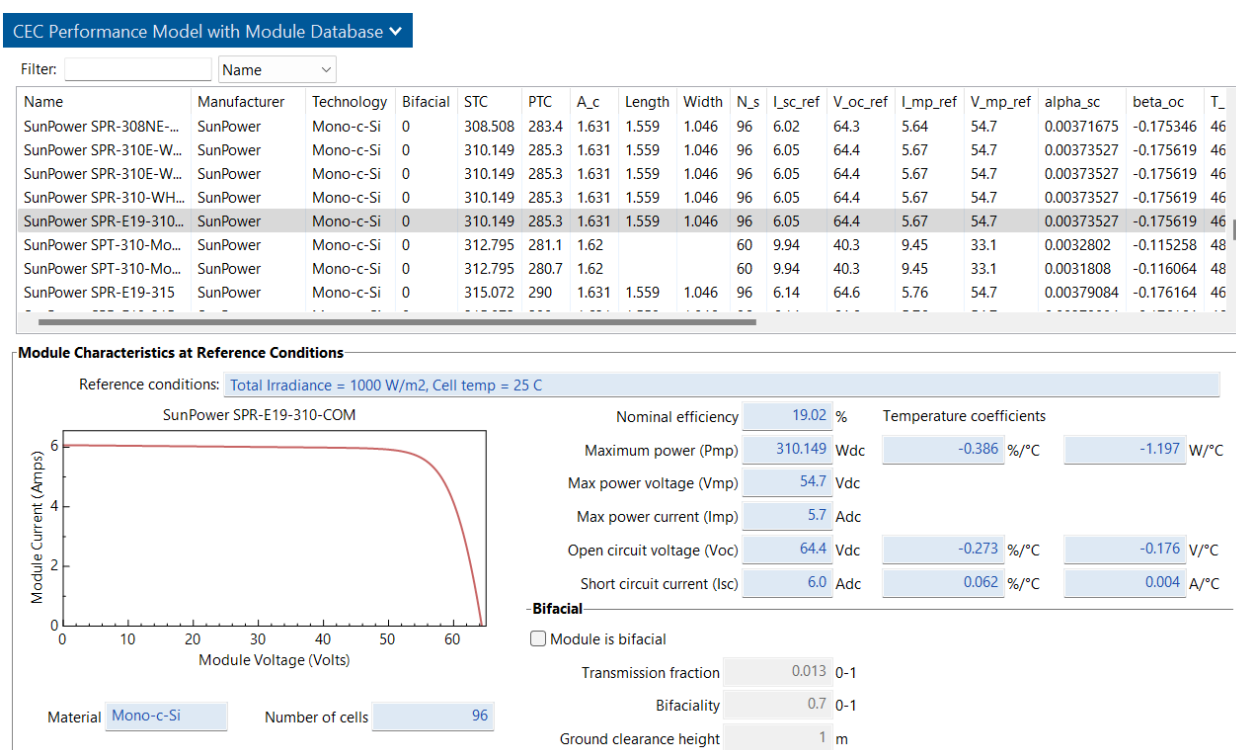
Annual Averages Calculated from Weather File Data		Optional Data	
Global horizontal	3.97 kWh/m ² /day	Maximum snow depth	NaN cm
Direct normal (beam)	4.36 kWh/m ² /day	Annual albedo	0.137
Diffuse horizontal	1.52 kWh/m ² /day		
Average temperature	12.5 °C		
Average wind speed	3.1 m/s	*NaN indicates missing data.	

Una vez cargados de polígono seleccionado, SAM muestra un encabezado de los datos climáticos que el sistema tiene almacenado en su base de datos, como se muestra en la Figura 24.

Por otra parte, sistema realiza una base de características de los elementos que se tiene en cuenta o parámetros para el modelo. Al ingresar a la opción Module, SAM cuenta con una base de datos de paneles solares de tipo comercial, y las características con las que cuenta dicho dispositivo. De igual forma, si se considera, se puede cambiar el modelo.

Para este caso se seleccionó un panel fotovoltaico SunPower SPR-E19-310-COM, como se muestra en la Figura 25. De igual forma, una vez seleccionado el módulo del panel fotovoltaico, el programa muestra la curva característica de desempeño y datos como la eficiencia nominal, máxima generación de energía, voltaje máximo, corriente máxima, voltaje de circuito abierto y corriente de corto circuito, el tipo de material y el número de celdas.

Figura 25 Módulo Solar – SunPower SPR-E19-310-COM



La siguiente opción que se puede revisar para configuración de parámetros es el inversor que irá conectado al panel solar, esto al tener en cuenta que los paneles solares trabajar en conversión de energía térmica a energía de corriente directa (DC), por lo que se hace necesario un dispositivo que realice la conversión a corriente alterna (AC), que es la que llega de forma convencional a los hogares y dispositivos electrónicos. El inversor seleccionado fue un Sungrow Power Supply de 550 V. Las principales características del inversor y su curva de rendimiento se muestran en la

Figura 26.

Figura 26 Módulo Inversor

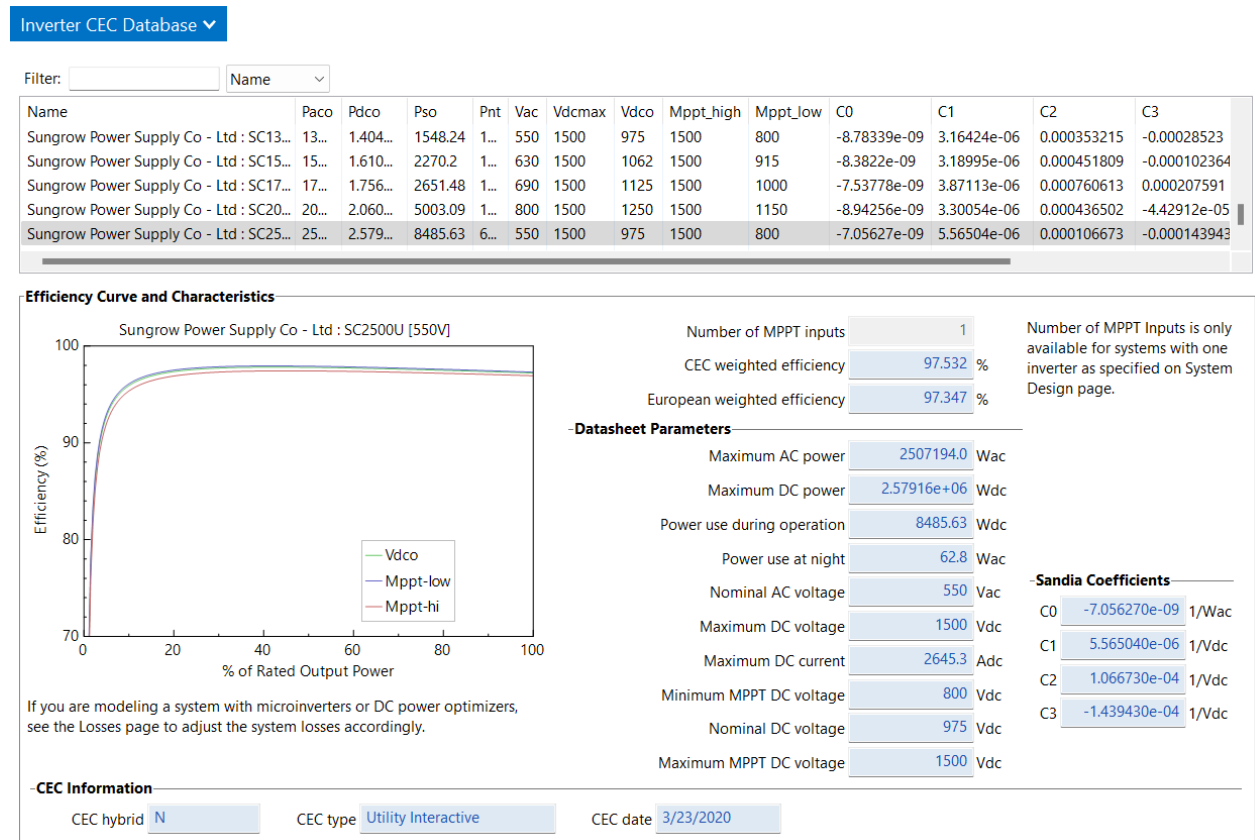
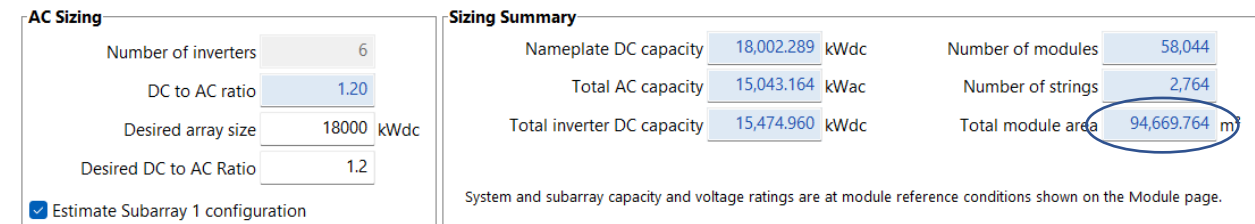


Figura 27 Tamaño del Proyecto en AC < 100 m



En la opción System Desing se pueden configurar parámetros de diseño de todo el sistema, por ende, como se muestra en la Figura 27, desde la opción AC Sizing se pudo configurar el tamaño de la red de paneles solares al tener en cuenta que, según el trabajo de García y la RETIE, en Colombia el tamaño máximo para una zona no debe superar los 100 m2. De este modo al seleccionar una relación de conversión DC a AC de 1.2 (ideal 1 a 1). El tamaño deseado de la matriz de los paneles solares se propuso con un valor de 1800 KWdc, de modo que se obtuvo un tamaño total de área de 94.669 m^2 , con un total de 58.044 paneles.

Figura 28 Configuración de Tamaño en DC

DC Sizing and Configuration

To model a system with one array, specify properties for Subarray 1 and disable Subarrays 2, 3, and 4. To model a system with up to four subarrays connected in parallel to a single bank of inverters, for each subarray, check Enable and specify a number of strings and other properties.

	Subarray 1	Subarray 2	Subarray 3	Subarray 4
-Electrical Configuration-				
	(always enabled)	☐ Enable	☐ Enable	☐ Enable
Modules per string in subarray	21			
Strings in parallel in subarray	2,764			
Number of modules in subarray	58,044			
String Voc at reference conditions (V)	1,352.4			
String Vmp at reference conditions (V)	1,148.7			
-Multiple MPPT Inputs-				
Set MPPT inputs	1			

Set MPPT inputs when Number of MPPT Inputs on the Inverter page is greater than 1.

Una vez seleccionados los datos anteriores del tamaño de la red de paneles, el programa realiza una parametrización del tamaño y configuración en DC, como se muestra en la Figura 28.

Figura 29 Configuración de Seguimiento y Orientación

-Tracking & Orientation

☐ Fixed
☒ 1 Axis
☐ 2 Axis
☐ Azimuth Axis
☐ Seasonal Tilt

☐ Tilt=latitude

Tilt (deg)

Azimuth (deg)

Ground coverage ratio (GCR)

Tracker rotation limit (deg)

Backtracking ☐ Enable

Terrain slope (deg)

Terrain azimuth (deg)

Ground coverage ratio is used (1) to determine when a one-axis tracking system will backtrack; (2) in self-shading calculations for fixed tilt or one-axis tracking systems

Como se muestra en la

Figura 29 para los sistemas se pueden configurar como sistemas fijos (fixed), por lo general son los que se colocan en techos y pared. Al habar de un axis, hace referencia a su movimiento en el eje x. y de forma inicial una inclinación (Tilt) de 0°.

Figura 30 Pérdidas Anuales de Irradiancia por Suciedad

Irradiance Losses
 Losses apply to the total solar irradiance incident on each subarray. SAM applies these losses in addition to any losses on the Shading and Snow page.

	Subarray 1	Subarray 2	Subarray 3	Subarray 4
Monthly soiling loss	Edit values...	Edit values...	Edit values...	Edit values...
Average annual soiling loss (%)	5	5	5	5
Bifacial rear soiling (%)	0	0	0	0
Bifacial rack shading (%)	4	0	0	0

Al tener en cuenta las potenciales pérdidas, como se muestra en la Figura 30 se muestran las pérdidas por irradiancia. Al tener en cuenta que en sistemas ideales las perdidas por diferentes factores deberían ser cero, pero los sistemas y dispositivos electrónicos no son ideales, por los que el programa maneja una configuración de 5% de pérdidas anuales de irradiancia por suciedad.

Figura 31 Pérdidas en DC

DC Losses

DC losses apply to the electrical output of each subarray and account for losses not calculated by the module performance model.

Module mismatch (%)	2	2	2	2	
Diodes and connections (%)	0.5	0.5	0.5	0.5	
DC wiring (%)	2	2	2	2	
Tracking error (%)	0	0	0	0	
Nameplate (%)	0	0	0	0	Calculate?
Bifacial electrical mismatch (%)	0	0	0	0	☒
DC power optimizer loss (%)	0	All four subarrays are subject to the same DC power optimizer loss.			
Total DC power loss (%)	4.440	4.440	4.440	4.440	

Total DC power loss = 100% * [1 - the product of (1 - loss/100%)]

- Default DC Losses

Apply default losses to replace DC losses for all subarrays with default values.

Apply default losses for:

La Figura 31 se muestran las pérdidas aplicadas a la salida de los sistemas eléctricos, por defecto el programa muestra un desajuste de los módulos en un 2%, pérdidas por diodos y conectores de 0.5% y DC wiring (pérdidas por cableado en corriente continua) de 2%. Lo que muestra un total de pérdidas de 4.44%.

- Costo de Instalación

Figura 32 Costos Directos de Capital

PV Capital Costs

Direct Capital Costs

Module	58,044 units	0.3 kWdc/unit	18,002.3 kWdc	0.39 \$/Wdc		\$ 7,020,892.54
Inverter	6 units	2,507.2 kWac/unit	15,043.2 kWac	0.05 \$/Wdc		\$ 900,114.43
			\$	\$/Wdc	\$/m²	
Balance of system equipment			0.00	0.29	0.00	\$ 5,220,663.68
Installation labor			0.00	0.18	0.00	\$ 3,240,411.94
Installer margin and overhead			0.00	0.12	0.00	\$ 2,160,274.63
					Subtotal	\$ 18,542,357.21
-Contingency						
			Contingency	3 % of subtotal		\$ 556,270.72
Total direct cost						\$ 19,098,627.93

Como se muestra en la Figura 32 el software SAM realiza un cálculo del valor en capital de inversión directa, esto al tener en cuenta los 58 módulos de paneles solares con un costo USD\$7.020.893 y los 6 inversores, con un costo de USD\$900.114. Finalmente, con un valor de inversión costos de capital directo de USD\$19.098.627.

Figura 33 Costos Indirectos de Capital

Indirect Capital Costs				
	% of direct cost		\$/Wdc	\$
Permitting and environmental studies	0		0.00	0.00
Engineering and developer overhead	0	+	0.02	0.00
Grid interconnection	0		0.02	0.00
-Land Costs				
Land area	77.978	acres		
Land purchase	\$ 0/acre	+	0	0.00
Land prep. & transmission	\$ 0/acre	+	0	0.01
Total indirect cost				\$ 900,114.43

En la Figura 33 se presentan los costos de capital indirectos propuestos por SAM a partir de los parámetros seleccionados, de manera que los costos indirectos de ingeniería y desarrollo se calcularon en USD\$360.045 y de igual forma, los costos de interconexión de la red por USD\$ 360.045.

Figura 34 Impuesto por Ventas

Sales Tax		
Sales tax basis, percent of direct cost	100 %	Sales tax rate 5.0 %
		\$ 954,931.40
Total Installed Cost		
The total installed cost is the sum of the indirect, sales tax, and direct costs. Note that it does not include any financing costs from the Financial Parameters page.		Total Installed Cost \$ 20,953,673.75
		Total installed cost per capacity \$ 1.16/Wdc

Figura 35 Parámetros de Análisis

Analysis Parameters		
Analysis period	25 years	Inflation rate 2.5 %/year
		Real discount rate 6.4 %/year
		Nominal discount rate 9.06 %/year
Project Tax and Insurance Rates		
-Income Tax		
Federal income tax rate	21 %/year	
State income tax rate	7 %/year	
-Sales Tax and Insurance		
Insurance rate (annual)	0 % of installed cost	
Sales tax	5 % of total direct cost	
The sales tax rate applies to the total direct cost on the Installation Costs page.		
-Property Tax		
Assessed percentage	100 % of installed cost	
Assessed value	20,953,673.75 \$	
Annual decline	0 %/year	
Property tax rate	0 %/year	

Para el análisis de parámetros se tomó un periodo de 25 años, con una inflación de 2.5% anual y una tasa de descuento del 6.4% por año, lo que presenta una tasa de descuento nominal de 90.6%, con un valor asignado de USD\$20.953.673.

Figura 36 Financiación de la Construcción

Construction Financing

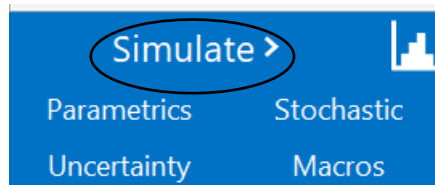
Construction Period Debt

Specify the terms of up to five optional short-term construction loans. SAM calculates the total financing cost and adds it to the project's investment cost. The sum of percentages in the Percent of Installed Costs column must equal 100%.

Construction loans	Percent of installed costs	Up-front fee (% of principal)	Months prior to operation	Annual interest rate (%)	Principal (\$)	Interest (\$)	Total construction financing cost (\$)
Loan 1	100	1	6	6.5	20,953,673.75	340,497.20	550,033.94
Loan 2	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
Loan 3	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
Loan 4	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
Loan 5	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
Totals:	100				20,953,673.75	340,497.20	550,033.94

Como se muestra en la Figura 36 SAM especifica términos del periodo de endeudamiento de la construcción, a partir del total de financiamiento y adicional los costos de inversión del proyecto. De manera que la inversión principal sería de USD\$20.953.673, con unos intereses de 340.497 y un costo total de financiamiento de construcción por USD\$550.033.

Figura 37 Inicio de Simulación



Una vez determinados todos los parámetros se da click en Simulate, como se muestra en la Figura 37.

- Análisis Económico

Figura 38 Simulación Polígono 1 – Inclinación 0° - 1 axis

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	31,134,494 kWh
DC capacity factor in Year 1	19.7%
Energy yield in Year 1	1,729 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.83
LCOE Levelized cost of energy nominal	5.59 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	4.46 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-9,765,885
IRR Internal rate of return	-2.77 %
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	-2.77 %
Net capital cost	\$21,782,840
Equity	\$20,208,562
Size of debt	\$1,574,280
Debt percent	7.23%

Al observar la Figura 38, análisis de los resultados obtenidos de la simulación con SAM para una red de 58 paneles solares en la Provincia de Soto Norte, Santander, mostró que

- Producción de Energía

Se generarían 31.134.494 kWh de energía alterna (AC) en el primer año, lo cual es un valor significativo para una instalación de este tipo.

El factor de capacidad del sistema es 19.7%, lo que indica que el sistema opera cerca del 20% de su capacidad máxima a lo largo del año.

El rendimiento energético es de 1.729 kWh/kW, lo que mide la eficiencia de conversión de energía solar en energía eléctrica.

- Relación de Desempeño y Costos

La tasa de desempeño es 0.83, lo que sugiere que el sistema está aprovechando el 83% de la energía disponible para producir electricidad, con pérdidas que podrían ser atribuibles a factores como sombras, temperatura o eficiencia de los componentes.

- **Costo Nivelado de Energía (LCOE)**

Nominal: 5.59 ¢/kWh, lo cual representa el costo nivelado considerando inflación.

Real: 4.46 ¢/kWh, que es el costo sin considerar inflación.

- **Indicadores Financieros**

El Valor Presente Neto (NPV) es negativo en USD\$-9.765.885, lo que sugiere que el proyecto, bajo las condiciones simuladas, no es financieramente viable a lo largo de su vida útil.

Tasa Interna de Retorno (IRR) es de -2.77%, indicando que el retorno de inversión no es suficiente para cubrir los costos del proyecto. Se estima que en el año 25 se podría lograr la IRR, pero sigue siendo negativa al final del proyecto.

- **Costos y Financiamiento**

Costo de Capital Neto: USD\$21.782.840, que es el costo total del proyecto.

Equidad: USD\$20,208,562, lo que representa la inversión directa sin financiamiento.

Tamaño de la Deuda: USD\$1.574.280, lo que equivale a un 7.23% del financiamiento total, indicando que el proyecto tiene una baja carga de deuda.

Los resultados de esta simulación sugieren que, bajo las condiciones dadas, el proyecto de instalación solar no es económicamente viable. Aunque la producción de energía es considerable, los indicadores financieros como el NPV negativo y la IRR negativa indican que los costos y las expectativas de retorno no justifican la inversión, al menos con la

configuración actual del proyecto. Se podría considerar ajustar parámetros como la inclinación de los paneles, buscar reducción de costos, o explorar financiamiento más favorable para mejorar la viabilidad del proyecto.

Figura 39 Simulación Polígono 1 – Inclinación 10° - 1 axis

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	32,685,742 kWh
DC capacity factor in Year 1	20.7%
Energy yield in Year 1	1,816 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.83
LCOE Levelized cost of energy nominal	5.23 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	4.18 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-9,256,224
IRR Internal rate of return	-2.13 %
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	-2.13 %
Net capital cost	\$21,797,478
Equity	\$20,036,470
Size of debt	\$1,761,009
Debt percent	8.08%

Como se muestra en la Figura 39, al cambiar la inclinación de 10° para los paneles solares mejora tanto la producción de energía como algunos indicadores financieros en comparación con la inclinación de 0°. Sin embargo, el proyecto sigue siendo económicamente inviable bajo las condiciones actuales, dado que tanto el NPV como la IRR permanecen en valores negativos. Estos resultados sugieren que, aunque la inclinación de 10° es preferible a 0°, se necesitan ajustes adicionales para mejorar la rentabilidad, como la optimización de costos o la obtención de un financiamiento más favorable.

Figura 40 Simulación Polígono 1 – Inclinación 20° - 1 axis

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	33,716,268 kWh
DC capacity factor in Year 1	21.4%
Energy yield in Year 1	1,873 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.83
LCOE Levelized cost of energy nominal	5.01 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	4.00 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-8,930,418
IRR Internal rate of return	-1.73 %
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	-1.73 %
Net capital cost	\$21,806,000
Equity	\$19,935,182
Size of debt	\$1,870,819
Debt percent	8.58%

Al tomar como base la información obtenida de la Figura 40, al variar la inclinación de 20° proporciona la mejor producción de energía y mejora los indicadores financieros comparado con las inclinaciones de 0° y 10°. Aunque el NPV y la IRR aún son negativos, están más cerca de volverse positivos, lo que sugiere que esta inclinación es más favorable para maximizar la viabilidad del proyecto. Aun así, sería necesario realizar más ajustes en costos o financiamiento para alcanzar la rentabilidad deseada.

Figura 41 Simulación Polígono 1 – 2 axis

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	35,988,800 kWh
DC capacity factor in Year 1	22.8%
Energy yield in Year 1	1,999 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.82
LCOE Levelized cost of energy nominal	4.55 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	3.63 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-8,031,076
IRR Internal rate of return	-0.64 %
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	-0.64 %
Net capital cost	\$21,836,480
Equity	\$19,569,926
Size of debt	\$2,266,555
Debt percent	10.38%

Como se muestra en la Figura 41, el sistema de seguimiento de dos ejes proporciona la mayor producción de energía, el mejor rendimiento energético y los costos de energía más bajos, lo que lo convierte en la opción más favorable desde el punto de vista técnico y económico. Aunque el proyecto aún presenta un NPV negativo y una IRR ligeramente por debajo de cero, esta configuración es la que más se acerca a la viabilidad financiera, sugiriendo que, con ajustes adicionales en financiamiento o reducción de costos operativos, el proyecto podría volverse rentable. Este sistema es particularmente atractivo para ubicaciones con alta irradiación solar, como la Provincia de Soto Norte en Santander.

- Mejora de Rentabilidad del Proyecto - Cambio de módulo solar - Sunpower SPR-X21-255

Una vez seleccionado un módulo fotovoltaico para el cambio, se procedió a realizar un proceso de simulaciones con la nueva configuración de los dispositivos. A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas.

Figura 42 Polígono 4 Simulación 1 - inclinación 0° – 1 axis

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	30,849,496 kWh
DC capacity factor in Year 1	19.6%
Energy yield in Year 1	1,714 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.82
LCOE Levelized cost of energy nominal	5.66 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	4.52 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-9,963,791
IRR Internal rate of return	-3.02 %
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	-3.02 %
Net capital cost	\$21,772,786
Equity	\$20,325,698
Size of debt	\$1,447,087
Debt percent	6.65%

Como se muestra a la Figura 42, el análisis de los resultados obtenidos de la simulación con SAM para una red de 58 paneles solares en la Provincia de Soto Norte, Santander, utilizando una inclinación de 0° y un sistema de un eje (1 axis) en un terreno con una pendiente del 2%, mostró las siguientes características.

- Producción de Energía:

La producción es de 30.849.496 kWh, que es ligeramente inferior a la obtenida en simulaciones con las mismas características, pero en otras ubicaciones geográficas. La menor producción puede estar influenciada por la pendiente del 2% y las nuevas coordenadas.

El factor de capacidad es 19.6%, lo que indica una eficiencia razonable, aunque un poco más baja en comparación con las simulaciones previas en ubicaciones diferentes.

El rendimiento energético es de 1.714 kWh/kW, lo que sigue siendo competitivo, pero muestra una pequeña reducción respecto a los valores observados en otras simulaciones, posiblemente debido a la pendiente del terreno y la variación en la irradiación solar en esta nueva ubicación.

- Relación de Desempeño y Costos

La relación de desempeño es de 0.82, una ligera disminución en comparación con simulaciones anteriores, lo cual puede estar relacionado con la configuración de la pendiente y la ubicación.

- Costo Nivelado de Energía (LCOE)

Nominal: 5.66 ¢/kWh, el costo nominal es ligeramente superior al de simulaciones anteriores, lo que sugiere un impacto negativo debido a la menor eficiencia del sistema en esta ubicación específica.

Real: 4.52 ¢/kWh, también un poco más alto, indicando que la viabilidad económica se ve afectada por las condiciones de la nueva ubicación.

- Indicadores Financieros

El Valor Presente Neto (NPV) fue de USD\$-9.963.791, un valor negativo que refleja una menor rentabilidad en comparación con otras simulaciones, lo que puede estar relacionado con la menor producción de energía y los costos operativos en este nuevo sitio.

La Tasa Interna de Retorno (IRR) fue de -3.02%, lo que indica una rentabilidad aún más baja, acentuada por la pendiente del 2% y las condiciones geográficas.

Se estima que la IRR se logra en el año 25, como en simulaciones previas, pero la tasa negativa sugiere que es improbable que el proyecto sea rentable sin ajustes significativos.

- Costos y Financiamiento

Costo de Capital Neto: USD\$21.772.786, un costo muy similar a las simulaciones anteriores, lo que sugiere que los costos de instalación y equipamiento no se ven significativamente afectados por la nueva ubicación.

Equidad: USD\$20.325.698, con un financiamiento en deuda del 6.65%, un porcentaje menor en comparación con otras simulaciones, posiblemente para compensar el mayor riesgo financiero debido a los resultados menos favorables.

La nueva ubicación con una pendiente del 2% en la Provincia de Soto Norte resulta en una menor producción de energía y una eficiencia más baja en comparación con simulaciones en terrenos planos y con diferentes coordenadas geográficas. Los indicadores financieros también reflejan un menor atractivo económico, con un NPV y una IRR menos favorables. Aunque el proyecto sigue siendo viable desde el punto de vista técnico, económicamente requiere ajustes significativos, ya sea en la estructura de financiamiento, en la reducción de costos operativos o en la optimización de la inclinación y orientación de los paneles para mejorar la captación solar en esta nueva ubicación.

Figura 43 Polígono 2 Simulación 2 - inclinación 10° – 1 axis

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	32,371,592 kWh
DC capacity factor in Year 1	20.5%
Energy yield in Year 1	1,798 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.82
LCOE Levelized cost of energy nominal	5.30 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	4.23 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-9,474,967
IRR Internal rate of return	-2.41 %
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	-2.41 %
Net capital cost	\$21,786,430
Equity	\$20,165,076
Size of debt	\$1,621,354
Debt percent	7.44%

Al tener en cuenta la Figura 43, el ajuste de la inclinación a 10° mejora la producción de energía y la eficiencia del sistema, lo que se refleja en un aumento en el rendimiento energético y una reducción en los costos nivelados de energía. Sin embargo, los indicadores financieros todavía muestran un proyecto con rentabilidad negativa, aunque menos acentuada que en la simulación con inclinación de 0°. Esto sugiere que mientras la inclinación de los paneles mejora el desempeño técnico del sistema, aún se necesitarían optimizaciones adicionales en la configuración del proyecto o en la reducción de costos para lograr la viabilidad económica.

Figura 44 Polígono 2 Simulación 3 - inclinación 20° – 1 axis

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	33,419,224 kWh
DC capacity factor in Year 1	21.2%
Energy yield in Year 1	1,856 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.82
LCOE Levelized cost of energy nominal	5.07 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	4.05 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-9,157,637
IRR Internal rate of return	-2.02 %
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	-2.02 %
Net capital cost	\$21,794,396
Equity	\$20,071,196
Size of debt	\$1,723,200
Debt percent	7.91%

La inclinación de 20° mejora la producción de energía y reduce los costos nivelados de energía (LCOE) en comparación con las inclinaciones de 0° y 10°. Sin embargo, aunque los indicadores financieros mejoran, el proyecto aún presenta un NPV negativo y una IRR negativa, lo que indica que, bajo las condiciones simuladas, el proyecto todavía no es financieramente viable. La inclinación de 20° ofrece la mejor opción en términos de eficiencia energética y reducción de costos operativos, pero aún se requerirían optimizaciones adicionales para alcanzar la rentabilidad económica del proyecto.

Figura 45 Polígono 2 Simulación 4 - 2 axis

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	35,556,548 kWh
DC capacity factor in Year 1	22.5%
Energy yield in Year 1	1,975 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.81
LCOE Levelized cost of energy nominal	4.63 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	3.69 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-8,293,538
IRR Internal rate of return	-0.95 %
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	-0.95 %
Net capital cost	\$21,824,004
Equity	\$19,716,066
Size of debt	\$2,107,938
Debt percent	9.66%

El sistema de seguimiento de dos ejes (2 axis) ofrece un rendimiento energético significativamente superior, con un 22.5% en el factor de capacidad y 35.556.548 kWh de energía anual generada, lo cual es el valor más alto entre todas las simulaciones. Este sistema también proporciona los costos nivelados de energía (LCOE) más bajos, tanto nominal como real, lo que lo convierte en la opción más eficiente y económica a largo plazo.

Aunque el NPV sigue siendo negativo y la IRR es negativa, la magnitud de las pérdidas se reduce considerablemente en comparación con las simulaciones de inclinación fija. Esto sugiere que, si bien el proyecto todavía no es rentable bajo las condiciones simuladas, la implementación de un sistema de seguimiento de dos ejes es la opción más cercana a la viabilidad financiera. Con ajustes adicionales o una posible reducción en los costos de instalación, este sistema podría llegar a ser rentable.

- Comparativa de Polígonos de Simulación

Al comparar ambos polígonos de simulación se puede establecer que La Simulación 1 es la opción más conveniente entre las dos. A pesar de una deuda ligeramente mayor, esta simulación produce más energía, tiene un mejor rendimiento energético, un menor costo nivelado de energía y mejores indicadores financieros. Estos factores hacen que sea la opción preferida para maximizar la rentabilidad y eficiencia del proyecto solar en la Provincia de Soto Norte en Santander.

- Mejoras al Modelo del Proyecto Planteado

Con el fin de mejorar el desempeño del proyecto se buscó una disminución de los costos operativos, esto al cambiar el módulo de panel solar fotovoltaico inicial por un Sunpower SPR-X21-255. Esto permitió bajar los costos de instalación de USD\$21.836.480 en el polígono 1 y USD\$21,824,004 en el polígono 2, a un valor de USD\$17.903.170 en el polígono 1 y de USD\$17.934.978. Como se muestra en la Figura 46 a continuación:

Figura 46 Polígono 1 con cambio de módulo fotovoltaico

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	26,845,124 kWh
DC capacity factor in Year 1	20.7%
Energy yield in Year 1	1,816 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.85
LCOE Levelized cost of energy nominal	5.24 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	4.18 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-7,527,237
IRR Internal rate of return	-2.02 %
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	-2.02 %
Net capital cost	\$17,903,170
Equity	\$16,389,376
Size of debt	\$1,513,794
Debt percent	8.46%

El proyecto no es económicamente viable bajo las condiciones simuladas, con un NPV negativo y un IRR desfavorable, lo que indica que no sería una inversión rentable. Aunque la planta tiene una producción de energía razonable y un buen rendimiento, esto no es suficiente para compensar los costos, lo que refuerza la necesidad de optimizar las variables económicas o buscar subvenciones u otras formas de reducir los costos. La estructura de financiamiento, sugiere que los inversionistas están asumiendo la mayor parte del riesgo. Una revisión para aumentar la proporción de deuda o encontrar mejores condiciones de financiamiento podría mejorar la viabilidad económica del proyecto.

Figura 47 Polígono 2 con cambio de módulo fotovoltaico

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	30,531,600 kWh
DC capacity factor in Year 1	23.6%
Energy yield in Year 1	2,066 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.84
LCOE Levelized cost of energy nominal	4.38 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	3.50 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-6,370,466
IRR Internal rate of return	-0.33 %
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	-0.33 %
Net capital cost	\$17,934,978
Equity	\$16,018,146
Size of debt	\$1,916,831
Debt percent	10.69%

Como se muestra en la Figura 47 el análisis de los resultados del polígono 2 muestra un rendimiento superior en términos de producción de energía, eficiencia y viabilidad económica en comparación con el polígono 1. Aunque el NPV sigue siendo negativo y el IRR es marginalmente negativo, el proyecto en el polígono 2 presenta menores pérdidas potenciales y costos más bajos de producción de energía, lo que lo hace más atractivo desde una perspectiva financiera. Este sitio parece ofrecer mejores condiciones para la instalación de una planta solar, y podría acercarse a la rentabilidad con ajustes en las condiciones de financiamiento o con el apoyo de incentivos económicos adicionales.

- **Comparativa de Escenarios**

Tabla 33 Comparativa de Escenarios con Cambio de Módulo Fotovoltaico

Coordenadas Geográficas	Polígono 1	Polígono 2
Latitud	7.336976663	7.4012502
Longitud	-72.97344828	-72.9534807
Métricas		
Energía AC Anual en Año 1	26.845.124 kWh	30.531.600 kWh
Factor de Capacidad DC en Año 1	20.7%	23.6%
Rendimiento Energético en Año 1	1.816 kWh/kW	2.066 kWh/kW
Ratio de Rendimiento en Año 1	0.85	0.84
LCOE Nominal	5.24 ¢/kWh	4.38 ¢/kWh
LCOE Real	4.18 ¢/kWh	3.50 ¢/kWh
Valor Presente Neto (NPV)	USD\$-7.527.237	USD\$-6.370.466
Tasa Interna de Retorno (IRR)	-2.02%	-0.33%
Año de Logro de IRR	25	25
IRR al Final del Proyecto	-2.02%	-0.33%
Costo de Capital Neto	USD\$17.903.170	USD\$17.934.978
Equity	USD\$16.389.376	USD \$16.018.146
Tamaño de la Deuda	USD\$1.513.794	USD \$1.916.831
Porcentaje de Deuda	8.46%	10.69%

Al realizar una comparativa de cada uno de los polígonos del proyecto, el polígono 2 presenta un mayor rendimiento energético con un valor de 2.066 kWh/kW y un factor de capacidad DC de 23.6%, comparado con los 1.816 kWh/kW y 20.7% del polígono 1. Esto indica que la ubicación del polígono 2 es más favorable en términos de generación de energía.

El polígono 2 ofrece un LCOE nominal y real más bajo (4.38 ¢/kWh y 3.50 ¢/kWh respectivamente) en comparación con el polígono 1 (5.24 ¢/kWh y 4.18 ¢/kWh). Además, el NPV es menos negativo en el polígono 2, lo que implica un menor déficit financiero y una mejor rentabilidad potencial.

Aunque el polígono 2 requiere un mayor porcentaje de deuda (10.69% frente al 8.46% del polígono 1), esta ubicación sigue siendo más rentable a largo plazo debido a una menor tasa interna de retorno negativa (-0.33% frente al -2.02% del polígono 1) y mejores indicadores económicos generales. Esto sugiere que el polígono 2, aunque requiere más

financiamiento, es una inversión más sólida en el contexto de la Provincia de Soto Norte en Santander.

- Escenarios con el Valor Total del Área de Cada Polígono

Para lograr determinar de una forma más amplia el potencial de energía solar de los puestos empleados. La tabla presenta los datos de cada lugar

Tabla 34 Escenarios

Polígono	Coordenada Geográficas		Área (h)	Altura (m)	Valor de Pendiente (%)
	Latitud	Longitud			
1	7.336976663	-72.97344828	1.324599423	2.041	7
2	7.4012502	-72.9534807	3.034504277	2.429	2

- Simulación para el polígono 1

Al tener en cuenta que el programa trabaja en unidades de m^2 , se trabajaron los datos de áreas de polígonos totales con la estimación de la equivalencia de hectáreas (*ha*) donde 1 *ha* es equivalente a $10.000 m^2$. De modo que al tomar el área de 1.324599423 *ha*, su equivalencia sería de $13.245 m^2$.

A partir de lo anterior en la opción System Desing, desde la opción AC Sizing, se varió el valor de Desire array size (tamaño de arreglo deseado) hasta logra el valor más cercano a el tamaño del área a trabajar.

Figura 48 Modificación System Desing

AC Sizing		Sizing Summary	
Number of inverters	1	Nameplate DC capacity	2,853.465 kWdc
DC to AC ratio	1.14	Total AC capacity	2,507.194 kWac
Desired array size	2855 kWdc	Total inverter DC capacity	2,579.160 kWdc
Desired DC to AC Ratio	1.2	Number of modules	11,205
☒ Estimate Subarray 1 configuration		Number of strings	415
		Total module area	13,244.310 m ²

System and subarray capacity and voltage ratings are at module reference conditions shown on the Module page.

Como se muestra en la **Figura 48** el área total aproximada fue de 13.244.310 m², esto generó un numero de módulos de 11.205, el tamaño del arreglo 2.855 kWdc, con una relación deseada de DC a AC de 1.2.

Figura 49 Costos de Instalación

Direct Capital Costs						
Module	11,205 units	0.3 kWdc/unit	2,853.5 kWdc	0.39 \$/Wdc		\$ 1,112,851.47
Inverter	1 units	2,507.2 kWac/unit	2,507.2 kWac	0.05 \$/Wdc		\$ 142,673.26
			\$	\$/Wdc	\$/m ²	
Balance of system equipment			0.00	0.29	0.00	\$ 827,504.94
Installation labor			0.00	0.18	0.00	\$ 513,623.75
Installer margin and overhead			0.00	0.12	0.00	\$ 342,415.84
					Subtotal	\$ 2,939,069.26
Contingency						
			Contingency	3 % of subtotal		\$ 88,172.08
Total direct cost						\$ 3,027,241.34

Indirect Capital Costs						
		% of direct cost		\$/Wdc	\$	
Permitting and environmental studies		0		0.00	0.00	\$ 0.00
Engineering and developer overhead		0	+	0.02	0.00	\$ 57,069.31
Grid interconnection		0		0.02	0.00	\$ 57,069.31
Land Costs						
Land area	10.909 acres					
Land purchase	\$ 0/acre	0	+	0.00	0.00	\$ 0.00
Land prep. & transmission	\$ 0/acre	0	+	0.01	0.00	\$ 28,534.65
Total indirect cost						\$ 142,673.26

Como se muestra en la Figura 49, el emplear los datos del proyecto, el valor de costos directos fue de USD\$3`027.241.34 y los costos indirectos.

Al llevar a cabo la simulación con los nuevos parámetros, en la Figura 50 se muestran los resultados que resumen los valores obtenidos.

Figura 50 Resultados de Simulación del Polígono 1

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	6,034,514 kWh
DC capacity factor in Year 1	24.1%
Energy yield in Year 1	2,115 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.84
LCOE Levelized cost of energy nominal	4.22 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	3.37 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-1,151,934
IRR Internal rate of return	0.26 %
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	0.26 %
Net capital cost	\$3,465,429
Equity	\$3,053,320
Size of debt	\$412,109
Debt percent	11.89%

Como se observa en la Figura 50, los resultados muestran que se obtuvo una rentabilidad baja, esto se presentó un NPV negativo y la tasa interna de retorno extremadamente baja (0.26%), esto indicaría que, en su forma actual, no es rentable.

El IRR no se logra hasta el año 25, lo que implica un periodo muy largo para alcanzar un retorno financiero, lo cual es poco atractivo para los inversionistas. A pesar de los problemas financieros, el LCOE real es relativamente bajo, lo que significa que el proyecto podría ser competitivo en términos de costos de energía si se logra mejorar su rentabilidad financiera.

Figura 51 Resultado de Costos de Instalación

Direct Capital Costs						
Module	11,205 units	0.3 kWdc/unit	2,853.5 kWdc	0.39	\$/Wdc	\$ 1,112,851.47
Inverter	1 units	2,507.2 kWac/unit	2,507.2 kWac	0.05	\$/Wdc	\$ 142,673.26
			\$	\$/Wdc	\$/m ²	
Balance of system equipment			0.00	0.29	0.00	\$ 827,504.94
Installation labor			0.00	0.18	0.00	\$ 513,623.75
Installer margin and overhead			0.00	0.12	0.00	\$ 342,415.84
						Subtotal
						\$ 2,939,069.26
Contingency						
				Contingency	3 % of subtotal	\$ 88,172.08
Total direct cost						\$ 3,027,241.34

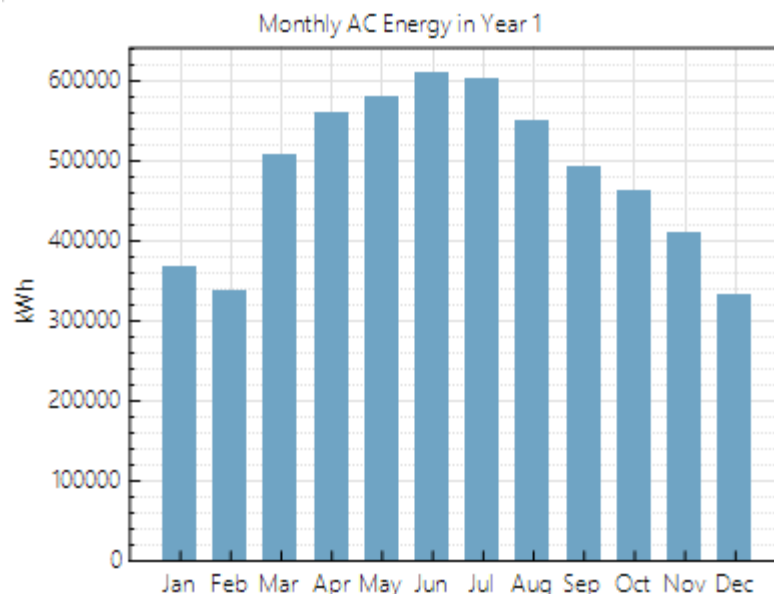
Indirect Capital Costs						
		% of direct cost		\$/Wdc		\$
Permitting and environmental studies		0		0.00		\$ 0.00
Engineering and developer overhead		0	+	0.02	+	\$ 57,069.31
Grid interconnection		0		0.02		\$ 57,069.31
Land Costs						
Land area	10.909 acres					
Land purchase	\$ 0/acre	0	+	0.00	+	\$ 0.00
Land prep. & transmission	\$ 0/acre	0	+	0.01	+	\$ 28,534.65
Total indirect cost						\$ 142,673.26

Sales Tax			
Sales tax basis, percent of direct cost	100 %	Sales tax rate	5.0 %
			\$ 151,362.07

Total Installed Cost	
The total installed cost is the sum of the indirect, sales tax, and direct costs. Note that it does not include any financing costs from the Financial Parameters page.	Total Installed Cost \$ 3,321,276.67
	Total installed cost per capacity \$ 1.16/Wdc

Al revisar los costos asociado a la instalación del proyecto, en la Figura 51, los costos directos de operación tendrían un valor de USD\$ 3'027.241 y los costos indirectos asociados, serian de USD\$142.673.

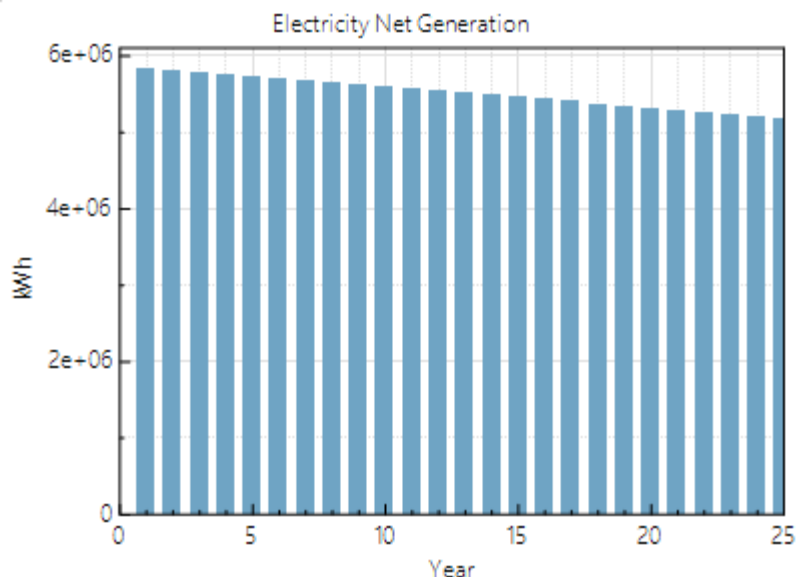
Figura 52 Comportamiento de la Energía Solar en el Primer año (kWh)



Como se muestra en la **Figura 52**, la energía generada tiene un comportamiento estacional, alcanzando sus valores más altos en los meses de mayo, junio y julio, donde la producción está cerca de los 600.000 kWh. Los meses con menor generación de energía son enero, noviembre y diciembre, con valores entre 250,000 kWh y 350,000 kWh. En general, la producción de energía aumenta desde enero hasta alcanzar su punto máximo en junio y julio, para luego decrecer hacia finales del año.

Al tener en cuenta la Figura 53, esta presenta el comportamiento típico que tendrá el sistema de generación de energía renovable fotovoltaico de proyecto, durante el proceso de 25 años, se tendrá una ligera disminución en la eficiencia de los paneles solares a medida que envejecen.

Figura 53 Comportamiento de Eficiencia del Proyecto en 25 años



- Simulación de Polígono 2

Para desarrollar el análisis correspondiente a polígono 2, se emplearon las coordenadas de esta ubicación, se evaluó sobre la configuración que obtuvo mejor desempeño, con un sistema de doble axis y con el cambio del panel solar con en el sistema del polígono 1. De igual forma, se tuvo en cuenta el área del polígono de 3.034504277 hectáreas. De modo que se realizó la conversión de esta medida de *ha* a m^2 .

$$1 \text{ ha} = 10.000 \text{ m}^2$$

$$3.034504277 \text{ ha} \times \frac{10.000 \text{ m}^2}{\text{ha}}$$

$$3.034504277 \text{ ha} = 30.345.04277 \text{ m}^2$$

Desde la opción System Design se modificó la opción AC Sizing (Tamaño en corriente continua) de modo que se obtuvo un desired array size (tamaño deseado de arreglo) de

30.350.214 m^2 , como se muestra en la Figura 54. Esto permitió una configuración que necesitaría 2 inversores DC a AC, una relación de 1.30 y una relación deseada de 1.2 de conversión de DC a AC.

Figura 54 Tamaño del arreglo para polígono 2

AC Sizing		Sizing Summary	
Number of inverters	2	Nameplate DC capacity	6,538.905 kWdc
DC to AC ratio	1.30	Total AC capacity	5,014.388 kWac
Desired array size	6540 kWdc	Total inverter DC capacity	5,158.320 kWdc
Desired DC to AC Ratio	1.2	Number of modules	25,677
☒ Estimate Subarray 1 configuration		Number of strings	951
		Total module area	30,350.214 m^2
System and subarray capacity and voltage ratings are at module reference conditions shown on the Module page.			

Con esta modificación, el sistema varió sus parámetros de costos como se muestra en la Figura 55. De manera que en costos directos sería necesaria una inversión de USD\$ 6.937.124, y de costos indirectos de USD\$ 326.945.

Figura 55 Costos de Instalación de Polígono 2

Direct Capital Costs					
Module	25,677 units	0.3 kWdc/unit	6,538.9 kWdc	0.39 \$/Wdc	\$ 2,550,172.88
Inverter	2 units	2,507.2 kWac/unit	5,014.4 kWac	0.05 \$/Wdc	\$ 326,945.24
		\$	\$/Wdc	\$/m ²	
Balance of system equipment		0.00	0.29	0.00	\$ 1,896,282.40
Installation labor		0.00	0.18	0.00	\$ 1,177,002.87
Installer margin and overhead		0.00	0.12	0.00	\$ 784,668.58
Subtotal					\$ 6,735,071.96
Contingency					
			Contingency	3 % of subtotal	\$ 202,052.16
Total direct cost					\$ 6,937,124.12
Indirect Capital Costs					
		% of direct cost	\$/Wdc	\$	
Permitting and environmental studies		0	0.00	0.00	\$ 0.00
Engineering and developer overhead		0	0.02	0.00	\$ 130,778.10
Grid interconnection		0	0.02	0.00	\$ 130,778.10
Land Costs					
Land area	24,999 acres				
Land purchase	\$ 0/acre	0	0.00	0.00	\$ 0.00
Land prep. & transmission	\$ 0/acre	0	0.01	0.00	\$ 65,389.05
Total indirect cost					\$ 326,945.24

Figura 56 Resultado del Polígono 2

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	12,808,479 kWh
DC capacity factor in Year 1	22.4%
Energy yield in Year 1	1,959 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.80
LCOE Levelized cost of energy nominal	4.64 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	3.70 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-2,988,320
IRR Internal rate of return	-0.84 %
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	-0.84 %
Net capital cost	\$7,928,494
Equity	\$7,135,293
Size of debt	\$793,200
Debt percent	10.00%

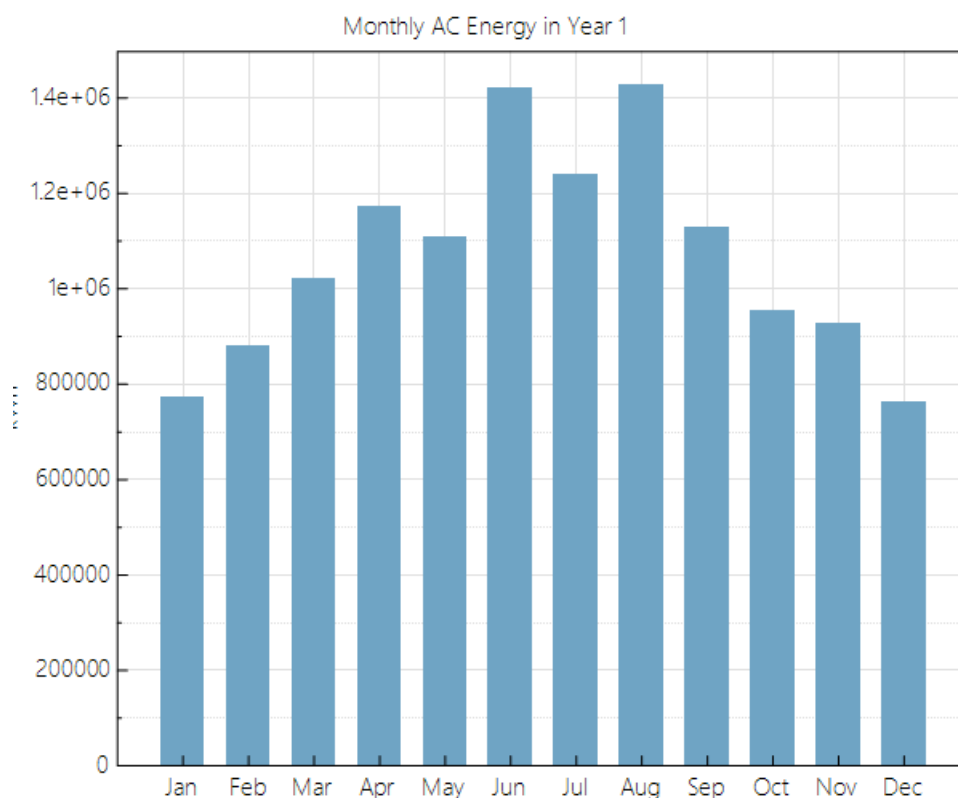
Al tener en cuenta la Figura 56 los resultados reflejaron varios aspectos críticos de un proyecto energético, específicamente en su primer año de operación. La producción anual de energía AC en el primer año es de 12.808.479 kWh, con un factor de capacidad DC del 22.4%, lo que indica que la planta funciona por debajo de su capacidad máxima teórica durante una parte significativa del tiempo. El rendimiento energético es de 1,959 kWh/kW, mientras que la ratio de rendimiento, que mide la eficiencia de conversión de la energía, es de 0.80.

En términos económicos, el costo nivelado de la energía (LCOE) nominal es de 4.64 ¢/kWh y el LCOE real es de 3.70 ¢/kWh, lo que sugiere un costo competitivo para la generación de energía. Sin embargo, el valor presente neto (NPV) negativo de USD \$-2.988.320 y una tasa interna de retorno (IRR) negativa de -0.84% indican que el proyecto no es financieramente viable en su estado actual, ya que no recupera la inversión inicial.

El proyecto alcanzaría su IRR en el año 25, pero este valor sigue siendo negativo al final del proyecto, reflejando una falta de rentabilidad. El costo neto de capital es de USD\$ 7.928.494, financiado en su mayoría con capital propio (USD\$ 7.135.293) y un 10% de

deuda (USD\$ 793.200). Estos datos subrayan la necesidad de mejorar los parámetros operativos y financieros del proyecto para alcanzar la viabilidad económica deseada.

Figura 57 Desempeño del Proyecto en el Primer año

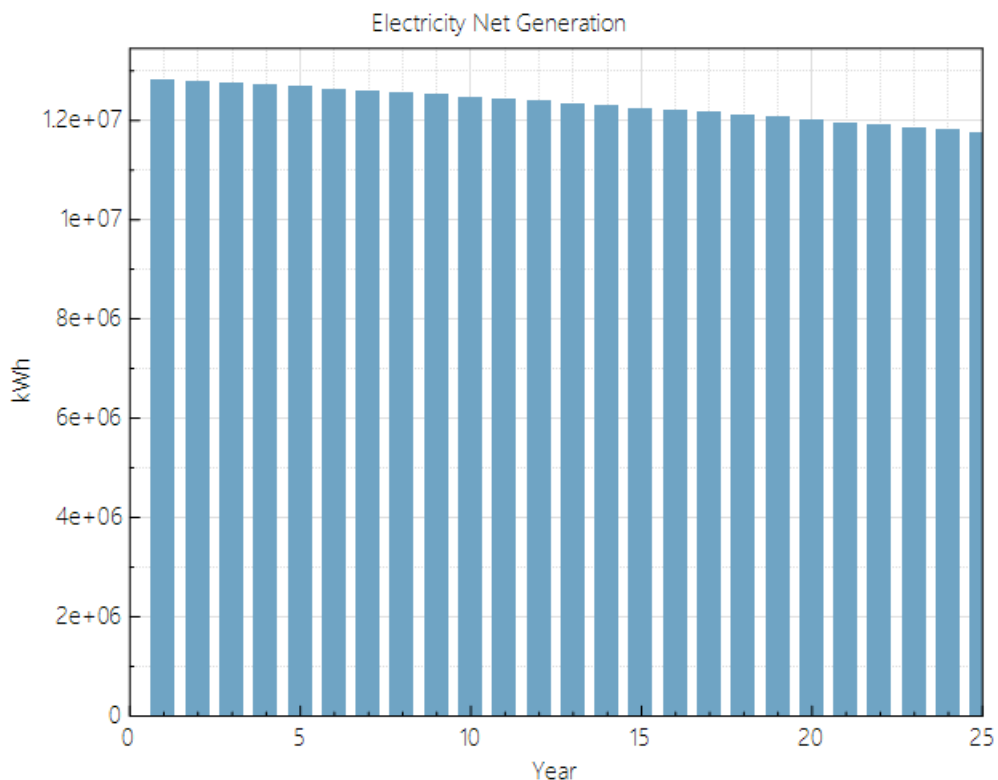


Como se muestra en la **Figura 57** la generación de energía del sistema solar muestra un patrón estacional evidente. Desde el mes de enero hasta junio, la producción de energía aumenta de forma progresiva, alcanzando su punto más alto en julio y agosto con valores que superan los 1.4 millones de kWh. Posteriormente, a partir de septiembre, la energía generada comienza a disminuir, presentando una tendencia descendente hasta llegar a diciembre, el mes con menor producción, cercana a los 700,000 kWh. Este patrón refleja el comportamiento típico de los sistemas fotovoltaicos, donde la radiación solar disponible varía a lo largo del año.

Durante junio, julio y agosto, la producción de energía se mantiene bastante estable, registrando los valores más altos. Este período de alto rendimiento muestra que el

sistema aprovechará al máximo las condiciones solares óptimas de los meses de verano. Es posible que durante estos meses el sistema funcione a su capacidad máxima, lo que indica que está bien diseñado para adaptarse a las condiciones más favorables de radiación solar.

Figura 58 Generación de Electricidad de la Red a 25 años



Como se observa en la **Figura 58** el comportamiento refleja una producción estable durante la mayor parte del ciclo de vida del sistema, pero con una disminución gradual en los últimos años. Esto es típico de muchos proyectos de energía renovable, como los solares, donde la degradación de componentes puede reducir la capacidad de producción con el tiempo. La planificación a largo plazo debe considerar estos factores para mantener la viabilidad económica del proyecto.

- **Comparativa de Resultados**

Tabla 35 Comparativa de Resultados

Metric	Value	Value
Annual AC energy in Year 1	6,034,514 kWh	12,808,479 kWh
DC capacity factor in Year 1	24.1%	22.4%
Energy yield in Year 1	2,115 kWh/kW	1,959 kWh/kW
Performance ratio in Year 1	0.84	0.80
LCOE Levelized cost of energy nominal	4.22 ¢/kWh	4.64 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	3.37 ¢/kWh	3.70 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-1,151,934	\$-2,988,320
IRR Internal rate of return	0.26 %	-0.84 %
Year IRR is achieved	25	25
IRR at end of project	0.26 %	-0.84 %
Net capital cost	\$3,465,429	\$7,928,494
Equity	\$3,053,320	\$7,135,293
Size of debt	\$ 412,11	\$ 793,20
Debt percent	11.89%	10.00%

Al tomar en cuenta la información de la Tabla 35, el análisis comparativo muestra diferencias significativas en el desempeño energético y financiero de dos proyectos.

En términos de generación de energía, el segundo proyecto produce más electricidad en el primer año (12,808,479 kWh) en comparación con el primero (6,034,514 kWh), aunque presenta un factor de capacidad DC ligeramente inferior (22.4% frente a 24.1%). Esto sugiere que, aunque la segunda instalación produce más energía, no opera tan eficientemente como la primera, reflejado también en un menor rendimiento energético (1,959 kWh/kW frente a 2,115 kWh/kW) y una menor ratio de rendimiento (0.80 frente a 0.84).

Desde el punto de vista económico, los costos nivelados de energía (LCOE) son más altos en el segundo proyecto, tanto en términos nominales (4.64 ¢/kWh) como reales (3.70 ¢/kWh), en comparación con el primer proyecto (4.22 ¢/kWh nominal y 3.37 ¢/kWh real). Esto indica que, a pesar de producir más energía, el segundo proyecto es más costoso por unidad de energía generada.

El análisis financiero resalta que ambos proyectos tienen un valor presente neto (NPV) negativo, lo que indica que no son rentables en sus condiciones actuales. Sin embargo, el segundo proyecto muestra un NPV considerablemente menos favorable (-\$2,988,320) en comparación con el primero (-\$1,151,934). Además, la tasa interna de retorno (IRR) del segundo proyecto es negativa (-0.84%) a lo largo de su duración, mientras que el primer proyecto tiene una IRR ligeramente positiva (0.26%), aunque ambas no cumplen los criterios típicos de inversión rentable.

En cuanto a la estructura de capital, el segundo proyecto tiene un costo neto de capital significativamente mayor (\$7,928,494 frente a \$3,465,429) y depende más del capital propio (90% de equity frente al 10% de deuda), mientras que el primer proyecto tiene una proporción ligeramente mayor de deuda (11.89%).

- Selección de áreas que posean una inclinación similar

Posteriormente, se tuvo en cuenta el nivel de inclinación de ambos polígonos, para tomar el área de polígonos cercanos, modo que el primer polígono mostró una inclinación de 7%, por ende, se tomaron las inclinaciones de 6 a 10, de la base de datos de polígonos óptimos dada por geomática, y para el polígono 2, el cual presentó una inclinación de 2%, se tomaron los valores de 0 a 5% de inclinación.

Al realizar el proceso con un filtro, se pudo establecer que valores cercanos a 2% de inclinación solo se obtuvo el polígono ya simulado, y dentro del rango de 0-5% no se obtuvieron otros valores.

Tabla 36 Polígonos de inclinación de 0% a 5%

Polígonos de Inclinación de 0 a 5% (Polígono 2)				
Latitud	Longitud	Área (Ha)	Altura	Inclinación (%)
7.4012502	-72.9534807	3.034504277	2.429	2

$$\begin{aligned}PotSolar &= PotPunto \times TotalAreas \\PotSolar &= 12.808.479 \text{ kWh} \times 3.034504277 \text{ ha} \\PotSolar &= 38.854.884 \text{ kWh} * ha\end{aligned}\tag{1}$$

Como resultado del análisis de los polígonos óptimos y las áreas con inclinación con valores similares del polígono 2 de 0 a 5% con un total de 38.854.884 *kWh * ha*.

Por último, para llevar el resultado a términos de potencia generada, se tomó en cuenta la cantidad de horas que contiene un año. Si un día tiene 24 horas, y un año tiene 365 días. En la ecuación 2 se muestra la cantidad de horas en un año.

$$\begin{aligned}Horas_{años} &= 24horas \times 365 \text{ días} \\Horas_{años} &= 8.760 \text{ horas}\end{aligned}\tag{2}$$

Por otro lado, la potencia es la relación de la energía producida en el tiempo, de modo que se genera la ecuación 3.

$$P = \frac{Energia \text{ Solar}}{Horas_{año}}\tag{3}$$

$$P = \frac{38.854.884 \text{ kWh}}{8760 \text{ horas}}$$

$$P = 4.436 \text{ kW}$$

Por otro lado, al tomar en cuenta el polígono 1, en la Tabla 37 se muestran los valores de los polígonos de inclinación de 6 a 10%.

Tabla 37 Polígonos de inclinación de 6-10%

Polígonos de Inclinación de 6-10% (Polígono 1)				
Latitud	Longitud	Área (Ha)	Altura	Inclinación (%)
7.36112619	-72.9422479	0.86044079	2.603	9
7.3846609	-72.9335122	10.7919123	2154	6
7.37474372	-72.9579394	6.67541658	2378	9
7.37547119	-72.9551135	0.97832857	2442	10
7.37476496	-72.9155865	2.4773235	2770	7
7.33697666	-72.9734483	3.03450428	2041	7
Total de área		24.817926		

Al tener en cuenta que el análisis entre los dos polígonos mostró que el polígono 1 tuvo resultados más favorables, el paso siguiente fue tomar el valor de potencial solar (6,034,514 kWh), y el total de las áreas que muestra Tabla 37 de 24.817926 (Ha), El resultado obtenido se muestra en la ecuación 1

$$\begin{aligned}
 PotSolar &= PotPunto \times TotalAreas \\
 PotSolar &= 6.034.514 \text{ kWh} \times 24,81792598 \text{ ha} \\
 PotSolar &= 149.764.122 \text{ kWh} * ha
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Como resultado del análisis de los polígonos óptimos y las áreas con inclinación con valores similares del polígono 1 de 6 a 10% con un total de 149.764.122 kWh * ha.

Por último, para llevar el resultado a términos de potencia generada, se tomó en cuenta la cantidad de horas que contiene un año. Si un día tiene 24 horas, y un año tiene 365 días. En la ecuación 2 se muestra la cantidad de horas en un año.

$$\begin{aligned}
 Horas_{años} &= 24horas \times 365 \text{ días} \\
 Horas_{años} &= 8.760 \text{ horas}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Por otro lado, la potencia es la relación de la energía producida en el tiempo, de modo que se genera la ecuación 3.

$$P = \frac{\textit{Energia Solar}}{\textit{Horas}_{\textit{año}}} \quad (3)$$

$$P = \frac{149.764.122 \textit{ kWh}}{8760 \textit{ horas}}$$

$$P = 17.096.36 \textit{ kW}$$

7. CONCLUSIONES

La evaluación del potencial de energía solar se basa en la recolección precisa de datos mediante radiómetros, piranómetros y satélites meteorológicos, complementados por bases de datos como la NASA SSE y NREL. Software especializado como ArcGIS, QGIS, PVGIS, HOMER PRO y SAM permiten analizar y optimizar la producción solar, lo que aseguran que los proyectos sean eficientes y rentables. La integración de estos recursos es clave para desarrollar proyectos solares sostenibles y exitosos.

La determinación del potencial de energía solar fotovoltaica en la Provincia de Soto Norte, Santander, depende crucialmente de una adecuada ubicación geográfica y la consideración de diversos parámetros físicos, bióticos, económicos, culturales y políticos. Factores como el potencial de energía, la proximidad a cuerpos de agua, humedales, riesgo de inundación, pendiente, áreas disponibles, y la distancia a infraestructuras claves como vías y redes eléctricas, son determinantes para la viabilidad y rentabilidad de los proyectos solares.

Adicionalmente, la recopilación de datos geográficos, meteorológicos y ambientales es esencial para calcular con precisión este potencial. La integración de estos datos en software especializado como SAM permitió modelar escenarios precisos y optimizar la ubicación y diseño de los sistemas solares, asegurando que se maximice el rendimiento energético y la sostenibilidad de los proyectos en la región.

Los resultados obtenidos a partir de diversas simulaciones utilizando el software SAM permiten una evaluación integral del potencial de energía solar fotovoltaica en la Provincia de Soto Norte, Santander. Las simulaciones consideraron diferentes configuraciones de inclinación y seguimiento solar, así como la utilización de módulos fotovoltaicos específicos como el Sunpower SPR-X21-255, en distintas ubicaciones dentro de la provincia.

El polígono 2 se presenta como la opción más viable para el proyecto de energía solar, generando 30,531,600 kWh anuales, lo que representa un 13.75% más que el Polígono 1 (26,845,124 kWh). Además, tiene un factor de capacidad del 23.6%, superior al 20.7% del Polígono 1, y un rendimiento energético de 2,066 kWh/kW, un 13.78% mayor que el del Polígono 1 (1,816 kWh/kW). En términos de costos, el LCOE nominal es de 4.38 ¢/kWh, un 16.41% menor que en el Polígono 1 (5.24 ¢/kWh), mientras que el LCOE real es de 3.50 ¢/kWh, un 16.27% más bajo.

Financiar el proyecto en el Polígono 2 también parece menos desfavorable, con un NPV de USD\$-6,370,466, una mejora del 15.39% frente al Polígono 1, y una Tasa Interna de Retorno (IRR) de -0.33%, más cercana a la rentabilidad que el -2.02% del Polígono 1. Ambos proyectos alcanzarían el logro de IRR en 25 años, pero el Polígono 2 requiere un mayor porcentaje de deuda (10.69% frente al 8.46% del Polígono 1), lo que podría ser justificado por su mejor rendimiento energético y costos más bajos.

Sin embargo, la rentabilidad financiera, medida a través del Valor Presente Neto (NPV) y la Tasa Interna de Retorno (IRR), aún presenta desafíos, con todas las simulaciones mostrando un NPV negativo y una IRR por debajo del umbral de rentabilidad. Esto indica que, aunque la zona tiene un buen potencial energético, los altos costos de capital y la eficiencia económica requieren de un análisis más profundo y posiblemente la integración de incentivos financieros o reducciones en costos de instalación para mejorar la viabilidad de los proyectos.

Aunque ambos proyectos enfrentan desafíos financieros, el primer proyecto muestra resultados superiores en varios aspectos clave. La energía anual generada es mayor en el primer proyecto con 6,034,514 kWh en comparación con 5,830,798 kWh en el segundo. Asimismo, el factor de capacidad es más alto en el primer proyecto (24.1% frente a 23.3%) y el rendimiento energético es mayor (2,115 kWh/kW frente a 2,043 kWh/kW). Aunque ambos presentan un valor presente neto (NPV) negativo, el primer proyecto sufre una pérdida menor (USD\$-1,151,934 frente a USD\$-1,243,394). Además, la tasa interna

de retorno (IRR) es positiva en el primer caso (0.26%), mientras que es negativa en el segundo (-0.42%). En cuanto a los costos, el costo nivelado de energía (LCOE) nominal y real es más bajo en el primer proyecto (4.22 ¢/kWh nominal y 3.37 ¢/kWh real) en comparación con el segundo (4.43 ¢/kWh nominal y 3.53 ¢/kWh real). A pesar de que el segundo proyecto tiene una deuda menor (USD\$365,640 frente a USD\$412,110), y un menor porcentaje de deuda (10.56% frente a 11.89%), el primer proyecto ofrece una mejor viabilidad económica en general, al combinar mejores rendimientos y una mayor eficiencia en la generación de energía.

8. RECOMENDACIONES

Al tener en cuenta los resultados y conclusiones que se logran generar de la investigación. A continuación, se presentan recomendaciones para trabajos y proyectos de investigaciones a futuro:

Dado que los resultados obtenidos en las simulaciones revelan desafíos en términos de rentabilidad financiera, se recomienda realizar estudios específicos sobre la reducción de costos de instalación y capital. Esto puede incluir la evaluación de alternativas de optimización de materiales y procesos de instalación utilizados en los proyectos fotovoltaicos de la Provincia de Soto Norte. Además, es crucial investigar la posibilidad de acceder a subsidios gubernamentales, incentivos financieros, y mecanismos de financiamiento verde que podrían mejorar la viabilidad económica de estos proyectos. Esta investigación contribuirá directamente a mejorar la rentabilidad de los proyectos solares, resolviendo uno de los problemas identificados en los resultados.

Se sugiere ampliar el uso de herramientas de software como HOMER PRO y PVGIS para crear modelos comparativos con los resultados obtenidos del software SAM, adaptados a las condiciones geográficas y climáticas locales de Soto Norte. Además, investigaciones futuras podrían explorar la integración de estas herramientas con tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, para optimizar la producción energética y reducir los costos de operación. Esto permitirá una validación más amplia de los resultados y una mejora continua de la metodología aplicada en el proyecto, fomentando la investigación avanzada en este campo.

Dada la incertidumbre sobre la rentabilidad a largo plazo de los proyectos fotovoltaicos en Soto Norte, se recomienda realizar estudios prospectivos que analicen diferentes escenarios futuros. Estos estudios deberían considerar cambios en las políticas energéticas nacionales, la variabilidad climática, y las fluctuaciones en los precios del

mercado energético. La investigación futura debe enfocarse en desarrollar estrategias para mitigar riesgos asociados a estos factores, asegurando así la sostenibilidad económica y energética de los proyectos fotovoltaicos en el largo plazo. Estas recomendaciones están construidas sobre los desafíos identificados en la investigación actual y son esenciales para la planificación estratégica del sector.

Para garantizar el éxito sostenible de los proyectos fotovoltaicos en la región, se recomienda profundizar en el análisis de los impactos ambientales y socioeconómicos, particularmente en lo referente a las comunidades locales, la biodiversidad y las áreas protegidas. Futuros estudios deben diseñar estrategias que minimicen los posibles efectos negativos y maximicen los beneficios sociales y económicos, contribuyendo así al desarrollo regional. Con esto se busca asegurar una integración armónica de los proyectos fotovoltaicos con su entorno, tal como se ha sugerido en los resultados obtenidos del análisis de viabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

TORRES ÁLVAREZ, Nicolas Esteban. Huella de Carbono y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) evitadas para la toma de decisiones frente al aprovechamiento de residuos sólidos en una empresa del sector textil. Trabajo de grado de Ingeniero Ambiental. Medellín. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería, 2022 1-39 p.

ABED ANWARZAI, Mohammad; NAGASAKA, Ken. Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis. En Renewable and Sustainable Energy Reviews, Tokyo University of Agriculture and Technology. 2021, vol.71, p., 150-160

IRENA. El futuro de la energía solar fotovoltaica. International Renewable Energy Agency. [Consultado: 14 de noviembre de 2019]. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_summary_2019_ES.pdf?la=en&hash=DE82F7DC53286F720D8E534A2142C2B8D510FB0B.

BACO MUNDIAL. Colombia lidera el camino hacia la sostenibilidad en América Latina. Banco Mundial. [Consultado: 7 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2022/08/31/colombia-leading-the-path-to-sustainability-in-latin-america>.

GRUPO GALILEO. Galileo Grupo de Investigación en Planeamiento Energético. [Consultado: 2 de junio de 2024]. Disponible en: <https://grupogalileo.org/nuestro-grupo>

UNCC. ¿Qué es el Acuerdo de París?. Uniyed Natios Climate Change. [Consultado: 12 de diciembre de 2015]. Disponible en: <https://unfccc.int/es/most-requested/que-es-el-acuerdo-de-paris>

GIRALDO, María; VACCA RAMÍREZ, Raúl; URREGO QUINTANILLA, Andrés. Las energías alternativas: ¿una oportunidad para Colombia?. En Revista Punto de Vista. Repositorio Politécnico Grancolombiano. 2021, vol 9, num 1, p.1-88

BECERRA PÉREZ, Luis A.; GONZÁLEZ DÍAZ, Romel R.; VILLEGAS GUTIERREZ, Ana C. La energía solar fotovoltaica, análisis costo beneficio en los proyectos en México. Revista Internacional de Desarrollo Regional Sostenible), vol. 5, nro. 2, p. 1-12.

NATIONAL GEOGRAPHIC. La energía solar y su potencial para ayudar a reducir el calentamiento global. National Geographic. [Consultado: 20 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/04/la-energia-solar-y-su-potencial-para-ayudar-a-reducir-el-calentamiento-global>

IEA. Renewable electricity. [Consultado: 5 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021/renewable-electricity?mode=market®ion=Latin+America&publication=2021&product=PV>

THEMA, Johannes; ROA GARCÍA, María Cecilia. La transición energética en Colombia: Situación actual, proyecciones, desafíos, narrativas y políticas públicas. Universidad de los Andes, Bogotá. 2022 1-39 p.

GALILEO Op. cit.

UNCC Op. cit.

MINISTERIO DE ENERGÍA. Fuentes No Convencionales de Energía Renovable – FNCR: Ley 1715 de 2014. Ministerio de Energía. Bogotá. [Consultado: 10 de junio de 2024]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/fuentes-no-convencionales-de-energ%C3%ADa-renovable-fncr/>.

ACCIONA. La importancia de las energías renovables. Acciona: Energías renovables. [Consultado: 2 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.acciona.com/es/energias-renovables/?_adin=1385087718

ACCIÓN SOLAR. Conversión De Energía Solar A Energía Eléctrica: Proceso Detallado. Acción solar. [Consultado: 2 de junio de 2024]. Disponible en: <https://accion-solar.org/conversion-de-energia-solar-a-energia-electrica-proceso-detallado/>.

INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS. Energías Limpias: Tecnologías para Alcanzar las Metas de Reducción de Emisiones. MIT. [Consultado: 2 de junio de 2024]. Disponible en: <https://professionalprograms.mit.edu/es/programa-online-energias-limpias/>.

ACCIONA, Op. Cit.

CELSIA. Proyectos de energía solar que debes conocer en Colombia. CELSIA. 21 de junio de 2018. [Consultado: 2 de junio de 2024]. Disponible en: <https://www.celsia.com/es/blog-celsia/proyectos-de-energia-solar-que-debes-conocer-en-colombia/>.

AWASTHI, Anshul; SHUKLA, Akash Kumar; MURALI, Manohar S.R.

NWAIGWE, K., MUTABILWA, P.; DINTWA, E. An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids. Materials Science for Energy Technologies, 2019, vol. 2, nro. 3, p. 629-633

ASUAMAH, Emmanuel Yeboah; GYAMFI, Samuel; DAGOUMAS, Athanasios. Potential of meeting electricity needs of off-grid community with mini-grid solar systems. Scientific African, 2021, vol. 11, p. 1-12

GROSSI GALLEGOS, Hugo. Medición de la radiación solar en la superficie de la Tierra: instrumental y errores asociados. III Jornadas Iberoamericanas sobre Energías Renovables: Solarimetría. Universidad Nacional de Luján. Argentina. 2001. p.16

GROSSI GALLEGOS, Hugo. Medición de la radiación solar en la superficie de la Tierra: instrumental y errores asociados. III Jornadas Iberoamericanas sobre Energías Renovables: Solarimetría. Universidad Nacional de Luján. Argentina. 2001. p.16

GARZÓN GUZMÁN, Brian Yesid; RICÓN CERÓN, María Fernanda. Diseño e implementación de un prototipo de estación meteorológica para la medición de variables ambientales. Trabajo de investigación Ingeniero Eléctrico. Bogotá. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ingeniería. Proyecto curricular de Ingeniería Eléctrica, 2017. 1-96 p.

IDEAM. El IDEAM presenta los nuevos Atlas de clima, radiación y Viento de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM. 04 de junio de 2018. [Consultado: 2 de junio de 2024]. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/LdWW0ECY1uxz/content/el-ideam-presenta-los-nuevos-atlas-de-clima-radiacion-viento-de-colombia.

RYSE ENERGY. Estimación de Producción Eólica y Solar. RYSE ENERGY. [Consultado: de junio de 2024]. Disponible en: <https://www.enair.es/es/app>

METEOSAT. The Weather's Record Keeper. Meteosat. [Consultado: 3 de junio de 2024]. Disponible en: <https://meteostat.net/en/>

METEOBLUE. The Weather Time. Meteoblue. [Consultado: 3 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/bogot%c3%a1_colombia_3688689#

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto., FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos., & BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. Metodología de la Investigación. 6ta Edición. México. McGraw-Hill Interamericana. 2016, 624 p. [Consultado el 6 de junio de 2024]. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/0B7fKI4RAT39QeHNzTGh0N19SME0/view?resourcekey=0-Tg3V3qROROH0Aw4maw5dDQ>

Ibid., p. 203.

GUAJARDO CANTÚ, Gerardo y ANDRADE DE GUAJARDO, Nora E. Contabilidad para no contadores [en línea]. 2 ed. México: McGraw-Hill Interamericana. 2012, 425 p. [Consultado el 6 de diciembre de 2016]. Disponible en: Base de datos McGraw Hill. <http://ezproxy.uao.edu.co:2061/book.aspx?i=372>

Ibid., p.248.

TAMASI, Mariana; MARTÍNEZ, Mónica; Bolzi, Claudio; DÍAZ SALAZAR, Martha; FERNÁNDEZ VASQUEZ, Javier. Desarrollo de sensores fotovoltaicos de radiación solar para aplicaciones terrestres y especiales

Ibíd., p. 8.

TORNICH, Vinicius. Guía Básico de Instrumentos Meteorológicos. Trabajo de investigación. Universidad de Sao Pablo. Facultad de Filosofía, Letras de Ciencias Humanas. Departamento de Geografía. 2020. p. 1-49

GAMBOA LERENA, Martín Miguel. Polarización del Fondo Cósmico de Radiación: Buscando los modos B utilizando el experimento QUBIC de interferometría bolométrica. Tesis de Doctorado en Astronomía Universidad Nacional de la Plata. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. 2022. p. 1-139

VIDELA, María E.; MARTÍNEZ BOGADO, Manuel y TAMASI, Mario E. Comparación entre un piranómetro clase B comercial y un radiómetro fotovoltaico desarrollado en el departamento de energía solar. En: Revista Energías Renovables y Medio Ambiente. San Martín, Departamento Energía Solar. Centro Atómico Constituyentes, enero-junio, 2020, vol. 46. p. 43 - 48. ISSN 2684-0073.

RODRÍGUEZ ORDOLEZ, Freddi Roland, FEBRE MARTÍNEZ, Christian Raúl y CHANTA SANTOS, Eden. (2022). "Desarrollo de un Prototipo de Piranómetro para Medir la Radiación Solar". Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén, Carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. 2022. p. 1-82.

CALBET, Op. cit., p. 8.

ROMERO JURE, Op. cit., p. 26.

MELENDEZ SERVAN, Gerson Gil. Optimización de redes satelitales de datos mediante el uso de satélites de órbita baja. Tesis de posgrado, Universidad Católica del Perú, Ingeniería de las telecomunicaciones. 2021. p. 1-24.

CARLOTTO, Jorge Adrián y JUÁREZ, José María. Sistema Satelital de Colecta de Datos Ambientales (DcS). En: Nombre de la revista: In-Genium [tipo de medio electrónico]. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de la Plata, diciembre, 2023, vol1, nro.6, p. 160-167. [Consultado: 1 de agosto de 2024]. Disponible en ISSN. 2796-7042

GARCÍA RUIZ, Pedro Jesús. Satélites de observación de la Tierra. Evolución de la erupción volcánica en la isla de La Palma. Trabajo de grado, Universitat Politècnica de València, Ingeniería de las telecomunicaciones. 2023. p. 1-88.

EARTHDATA ATMOSPHERIC SCIENCE DATA CENTER. Surface meteorology and Solar Energy [sitio web]. NASA. [Consultado: 01 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://asdc.larc.nasa.gov/project/SSE>.

VERDUCI, Rosalia et al. Solar Energy in Space Applications: Review and Technology Perspectives. En: Advanced Energy Materials. Revista: Wiley. 22 de junio. 2022. Vol. 12 nro. 29. p. 1 - 8.

SPRINGER LINK. Weather Forecasting for Renewable Energy System: A Review. En: Archives of Computational Methods in Engineering. Universidad de Sanbuenaventura. 26 de junio. 2022. Vol. 29. p. 2875-2891. url: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-021-09695-3>

NREL. Energy Analysis. [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 01 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/analysis/future-system-scenarios.html>.

GIANNELLI, Charles, LEÓN SÁNCHEZ, Diego y AGUGIARO, Guillermo. Comparison and evaluation of different gis software tools to estimate solar irradiation. Revista: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.2022. Vol. 4. p. 275-282.

USTA, Yasemin, CARIONI, Giovanni & MUTANI. Guglielmina. Modeling and mapping solar energy production with photovoltaic panels on Politecnico di Torino university campus. Revista: Springer Link. Vol. 17, 16 de febrero. 2022. Vol. 17 nro. 53. p. 23-34.

DOST MOHAMMADI, Shir Ahmad. Design and Simulation of Grid-Connected Solar PV System Using PVSYST, PVGIS and HOMER Software. En: International Journal of Pioneering Technology and Engineering: Revista de administración y negocios [en línea] Samsun, Turquía, Ondokuz Mayıs University junio. 2022. vol. 1, nro. 1. p. 36-41. [Consultado: 02 de agosto de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.56158/jpte.2022.24.1.01>

Ibíd., p. 3.

ALHOUSNI, Fadhil Khadoum et al. Photovoltaic Power Prediction Using Analytical Models and Homer-Pro: Investigation of Results Reliability. En: Sustainability [en línea]. Selangor, Malasia: Institute of Sustainable Energy, Universiti Tenaga Nasional, mayo de 2023, vol. 15. nro. 1. 1-12 p. [Consultado: 3 de agosto de 2023]. Disponible en <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/11/8904>

NOLASCO, Daniela; SOLÍS CHAVES, José. Samuel. Shading simulation for two photovoltaics solar generation residential systems (SPV) using SAM (System Advisor Model). En: EBSCO. Revista: Tecciencia.

MOHAMMADI, Op. cit., p. #.

ORDOÑEZ PALACIOS, Luis Eduardo; BUCHELI GERRERO, Víctor Andrés; CAICEDO BRAVO, Eduardo Francisco. Evaluation of solar radiation obtained from NASA and satellite imagery-based prediction models adjusted for microgrid sizing in Homer Pro. En: Revista INGE CUC.Valle del Cauca: Universidad del Valle, enero-junio, 2024, vol. 20 nro. 1. p. 1 - 13. ISSN-e 2382-4700.

MILOSAVLJEVIĆ, DRAGANA D. Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/software based on case study. En: De Gruyter Open Access. [en línea]. enero-junio de 2022, nro. 12 p. [Consultado: 7 de septiembre de 2024]. Disponible en <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/phys-2022-0042/html>

LORETA BALLESTEROS, Michael Biviana. Identificación de la calidad de agua para consumo humano de la provincia Soto Norte del departamento de Santander en el año 2019-2022 a través de revisión bibliográfica. Unidades Tecnológicas de Santander. Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías. 2023. 81 p.

Ibíd., p. 45.

Ibíd., p. 22.

Ibíd., p. 66.

IDEAM. Atlas climatológico de Colombia / Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). En: <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=46264>

Ibíd., p. 88.

UPME. Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia de 2006

ACEVEDO, Álvaro. Pensar el cambio socioambiental: un acercamiento a las acciones colectivas por el páramo de Santurbán (Santander, Colombia). En: Revista Colombiana de Sociología. vol. 3, nro. 15. 1-10 p. [Consultado: 25 de agosto de 2020]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-159X2019000100157&script=sci_arttext

Ibíd., p. 5

Ibíd., p. 88

SIB COLOMBIA. Estudio de Impacto Ambiental -EIA- para el proyecto “Explotación Subterránea de Minerales Auroargentíferos Soto Norte”_BENTOS. En: Proyecto de Explotación Subterránea de Minerales Auroargentíferos “Soto Norte”. [Consultado: 25 de agosto de 2024]. Disponible en: https://ipt.biodiversidad.co/permisos/resource?r=01252_eia_minesa_bentos

Ibíd., p. 6

MUÑOZ MALDONADO, Yecid Alfonso; ACEBEDO RONCANCIO, German David; SANTAMARÍA SAAVEDRA, Juan David. RINCÓN, Carlos Augusto. Evaluación del potencial de energía solar en Santander, Colombia. En: Prospectiva [en línea]. Bucaramanga: Universidad Autónoma de Bucaramanga, julio-diciembre de 2019. vol. 17, nro. 2. p. 7-12. [Consultado: 13 de agosto de 2024]. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7047512>.

Ibíd., p. 2.

Ibíd., p. 3.

IDEAM, Op. cit., p.35

UPME, Op. cit., p.10

Ibíd., p. 16.

SAM. Guía de Introducción de System Advisor Model (SAM). [sitio en línea]. 2022. [Consultado: 12 de agosto de 2024]. Disponible en: https://sam.nrel.gov/images/web_page_files/sam-getting-started-for-translation-2020-12-16-spanish.pdf.

GARCÍA URREGO, Simón. Análisis espacial multicriterio para la ubicación de parques eólicos y granjas solares en Colombia. [en línea] Trabajo de investigación Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. 2021 pp. 1-142. [Consultado: 16 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79490>.

ABED ANWARZAI, Op. cit., p. 7.

IDEAM. Amenazas Inundaciones. [sitio web]. Bogotá; [Consultado: 14 de agosto de 2024]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>

Ibit, p. 13

GARCÍA URREGO, Op. cit., p. 53.

GARCÍA URREGO, Op. cit., p. 54.

GARCÍA URREGO, Op. cit., p. 56.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 9-0708 de 2013. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. [sitio web]. Bogotá; [Consultado: 16 de agosto de 2024]. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/3821/22727/Resolucion_90907_Fe_de_erratas_Anexo_General_RETIE.pdf

GARCÍA URREGO, Op. cit., p. 66.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Op. cit., p. 3.

PLANAS, Alexandra; QUINTERO, Juan David; MONTEALEGRE, Libardo. Guía ambiental y social para proyectos de generación fotovoltaicos e híbridos menores o iguales a 1 MW [sitio web]. Publicaciones del Banco Interamericano de Desarrollo. 2021. [Consultado: 16 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/guia-ambiental-y-social-para-proyectos-de-generacion-fotovoltaicos-e-hibridos-menores-o-iguales-1>