Uso de SIG mediante análisis multicriterio para la identificación de áreas óptimas para instalaciones fotovoltaicas en Neiva, Huila

Julieth Marcela Ramírez Luis, Natalia Jazmín Ramírez Luis

Carlos Andrés Martínez Moreno, Jefferson Andrés Tellez Ardila, Juan Diego Pinillos Agudelo

Propuesta de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de

Especialista (s) en Sistemas de Información Geográficos

Director (a):

M.Sc. Héctor Andrés Mora Bedoya

Codirector (a):

Título (Ph.D., M.Sc., etc.) y nombre del codirector(a)

Línea de Investigación

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2025

Resumen

La energía solar fotovoltaica disminuye la dependencia de combustibles fósiles, lo cual posibilita una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero y alivio del calentamiento global. Para esto las herramientas SIG, permiten la localización de sitios óptimos para la ubicación de paneles solares, logrando evaluar la radiación solar en diferentes ubicaciones, identificando áreas con alta exposición solar, topografía, cobertura vegetal, densidad poblacional y áreas protegidas, evitando conflictos ambientales y legales. Dado esto, se realizó un análisis detallado que identifique las condiciones óptimas para la generación de energía fotovoltaica en el departamento Neiva, Huila, Colombia, utilizando la metodología que comprende la recolección de datos geoespaciales y el análisis multicriterio. Los resultados contribuirán a la correcta selección de áreas para paneles solares, generando aportes al desarrollo sostenible y a la transición energética del país.

Palabras clave: Energía Fotovoltaica – Sistemas de Información Geográfica – Radiación Solar – Usos del suelo – Condiciones Ambientales.

Abstrac

Photovoltaic solar energy reduces dependence on fossil fuels, which makes it possible to reduce greenhouse gas emissions and alleviate global warming. For this, GIS tools allow the location of optimal sites for the creation of photovoltaic solar farms, managing to evaluate solar radiation in different locations, identifying areas with high solar exposure, topography, vegetation cover, population density and protected areas, avoiding environmental conflicts. and legal. Given this, a detailed model was built that identifies the optimal areas for the generation of photovoltaic energy in the department Neiva, Huila, Colombia, using the methodology that includes the collection of geospatial data and multicriteria analysis. The results will contribute to the correct selection of areas for the construction of solar farms, generating contributions to sustainable development and the energy transition of the country.

Keywords: Photovoltaic Energy – Geographic Information Systems – Solar Radiation – Land Use – Environmental Conditions.

Contenido

Pág.

1. INTRODUCCIÓN 9

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN 10

2.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA 13
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 16
2.3 JUSTIFICACIÓN 18

3. OBJETIVOS 20

3.1 OBJETIVO GENERAL 20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 20

4. ANTECEDENTES 21

5. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL 29

5.1 LEY 1715 DE 2014 29
5.2 RESOLUCIÓN 1283 DE 2016 DE LA UPME (UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA) 29
5.3 LICENCIA AMBIENTAL – AGENCIA NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES 30
5.4 REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE) 30
5.5 RESOLUCIÓN 2182 DE 2016 30
5.6 RESOLUCIÓN 627 DE 2006 31

6. REFERENTE TEÓRICO 32

7. METODOLOGÍA 38

7.1 ENFOQUE METODOLÓGICO 39
7.2 TIPO DE ESTUDIO 41
7.3 PROCEDIMIENTO 42
7.3.1 Fase 1: Recopilación de datos 43
7.3.2 Fase 2: Limpieza y Estandarización de Datos 61
7.3.3 Fase 3: Reclasificación y ponderación 62
7.3.4 Fase 4: Integración y delimitación final 77

8. RESULTADOS 85

8.1 UBICACIÓN ÓPTIMA 86

9. CONCLUSIONES 89

10. RECOMENDACIONES 91

11. REFERENCIAS 93

Lista de figuras

Figura 1. Datos de energía 17
Figura 2. Potencial Energético Solar en Colombia 35
Figura 3. Parques Naturales en Colombia 37
Figura 4. Enfoque de la Investigación 41
Figura 5. Clasificación del Territorio 44
Figura 6. Datos Global Mapper 46
Figura 7. Área de estudió 47
Figura 8. DEM 48
Figura 9. Mapa de Pendientes 49
Figura 10. Red Vial 50
Figura 11. Hidrografía del municipio de Neiva 52
Figura 12. Repositorio IDEAM 53
Figura 13. Nubosidad Neiva 54
Figura 14. Precipitación histórica del municipio de Neiva 56
Figura 15. Temperatura Neiva 58
Figura 16. Radiación Solar 59
Figura 17. Producción fotovoltaica 60
Figura 18. Procesamiento de Datos 61
Figura 19. Geoprocesamiento de analisis espacial en ArcgisPro 63
Figura 20. Vías del municipio de Neiva 63
Figura 21. Reclasificación de accesibilidad vial 64
Figura 22. Reclasificación de áreas con potencial energético 66
Figura 23. Mapa de temperatura 67

Figura 24. Mapa de radiación solar 69

Figura 25. Mapa de nubosidad..... 72

Figura 26. Mapa de precipitación..... 74

Figura 27. Mapa de pendientes 76

Figura 28. Áreas óptimas para la instalación de paneles solares..... 78

Figura 29. Mapa de las áreas óptimas para la producción de energía fotovoltaica 80

Figura 30. Mapa de las áreas óptimas para la producción de energía fotovoltaica formato vectorial..... 81

Figura 31. Mapa de las áreas óptimas para la producción de energía fotovoltaica respecto al uso del suelo 82

Figura 32. Mapa de restricción de acuerdo con la ocupación de la red vial..... 83

Figura 33. Mapa de restricción de área respecto a la hidrografía del municipio 84

Figura 34. Mapa final de las áreas óptimas para la instalación de paneles solares en Neiva, Huila 87

Figura 35. Grafica del área total del municipio de acuerdo con la aptitud del suelo..... 87

Figura 36. Mapa de las áreas óptimas para la producción de energía fotovoltaica respecto a su distribución política..... 88

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Rangos de proximidad a la red vial 64

Tabla 2. Producción Fotovoltaica kWh/año 65

Tabla 3. Temperatura Reclasificada (TEMP) 67

Tabla 4. Radiación solar (kW/m²/Año) 69

Tabla 5. Rangos de Nubosidad 70

Tabla 6. Reclasificación de nubosidad 71

Tabla 7. Precipitación 73

Tabla 8. Pendiente reclasificada 75

Tabla 9. Porcentajes por capa 77

Tabla 10. Reclasificación por pendiente 79

Tabla 11. Distribución de áreas clasificadas por nivel de factibilidad 86

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
MWh	Mega vatio hora	MWh	E/T
ºC	Grados Celsius	ºC	T
Gw	Giga vatio	Gw	E/T
m²	Metro cuadrado	m²	

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ANLA	Agencia Nacional de Licencias Nacionales
CO2	Dioxido de Carbono
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energia Renovable
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
PV	Panel Fotovoltaico
POT	Plan de Ordenamiento Territorios
PIB	Producto Interno Bruto
SIG	Sistemas de Información Geográfica

1. Introducción

En los últimos años, la transición hacia energías renovables se ha convertido en una prioridad a nivel global debido a la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles. Dentro de las alternativas para mitigar los efectos del cambio climático, la energía solar fotovoltaica ha demostrado ser una opción eficiente y sostenible, especialmente en regiones con alta radiación solar.

En este contexto, la energía solar se presenta como una alternativa sostenible y viable para la generación de electricidad. Sin embargo, la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos depende en gran medida de la adecuada selección de los sitios de instalación, considerando factores como la radiación solar, la pendiente del terreno, el uso del suelo y las restricciones ambientales.

El municipio de Neiva, ubicado en el departamento del Huila, cuenta con condiciones climáticas favorables para la implementación de sistemas de energía solar, lo que representa una gran oportunidad para el desarrollo de soluciones energéticas limpias. Sin embargo, a pesar del potencial de la región, la adopción de paneles solares aún enfrenta desafíos técnicos, económicos y sociales que deben ser analizados con anterioridad para asegurar el éxito del mismo.

El presente proyecto tiene como objetivo determinar las áreas óptimas para la instalación de paneles solares en Neiva, Huila, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), mediante el análisis espacial y análisis multicriterio, se pretende identificar las zonas con mayor potencial para la implementación de esta tecnología. Para ello, se empleará una metodología basada en la recopilación y procesamiento de datos geoespaciales, incluyendo información sobre radiación solar, altitud, inclinación del terreno, uso del suelo y restricciones ambientales. Posteriormente, se aplicarán técnicas de análisis multicriterio y herramientas de geoprocesamiento en un entorno SIG para generar mapas de idoneidad. Este estudio busca

proporcionar información clave para la toma de decisiones en proyectos de energía solar, contribuyendo a una planificación más eficiente y sostenible del uso de los recursos naturales, reduciendo el tiempo y recursos, contribuyendo a generar técnicas de localización eficientes en el estudio de pre factibilidad del proyecto.

2. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

El consumo de energía eléctrica aumenta en relación con el crecimiento de la población mundial, una fuente para la producción de energía eléctrica proviene de los combustibles fósiles, que influyen negativamente al medio ambiente, debido a la generación de gases de efecto invernadero (GEI). (GHG, GreenHouse Gases); el impacto en el entorno a la hora de su implementación y los escases del recurso a través del tiempo, por lo cual, en los últimos años, se ha empezado a implementar diferentes fuentes de energía limpia como la hidráulica, eléctrica y solar, esta última es una alternativa prometedora con el uso de paneles solares (PV), que son una forma de generación de energía eléctrica limpia y a bajo costo, libre de gases contaminantes. (García Barrios, 2018).

A nivel mundial, la potencia acumulada en instalaciones fotovoltaicas ha tenido un constante aumento en los últimos años, alcanzando una potencia instalada de 402,5 GW (GW equivale a 1.000 millones de voltios; 1GW = 1000’000.000 voltios) para finales del año 2017. China ahora lidera las capacidades acumulativas con 131 GW, seguida por los EE. UU. (51 GW), Japón (49 GW), Alemania (42 GW), Italia (19,7 GW) ocupa el quinto lugar, India (18

GW) sexto y el Reino Unido séptimo (13 GW). Todos los demás países están por debajo de la marca de 10 GW (Gastelbondo, 2019). A nivel latinoamericano los países con mayor potencia acumulada en instalaciones fotovoltaicas son Brasil (2 GW), Chile (2,42 GW) y México (1,6 GW). Además, presentan los mayores Parques Solares en Latinoamérica, donde los 3 Parques en operación más grandes para el 2018 son: el parque Villanueva de 310 MW ubicado en México, Parque Nova Olinda de 292 MW ubicado en Brasil y el parque Pirapora Solar de 284 MW también ubicado en Brasil (Gastelbondo, 2019)

La energía solar puede ser una alternativa complementaria para atender la demanda del país en periodos de sequía, ya que Colombia tiene un gran potencial energético en el recurso solar por su ubicación geográfica. Además, con la existencia de mecanismos que incentivan la integración de las FNCER como lo es la Ley 1715 de 2014, donde por medio de incentivos fiscales como son: exclusión de arancel, deducción del IVA, reducción del impuesto de renta y permitir la depreciación acelerada, ayuda a que los grandes proyectos de generación solar o también llamadas Parques Solares, tengan mayores posibilidades de viabilidad financiera. Lo anterior hace una oportunidad de negocio para diferentes actores que quieran invertir en Parques Solares (Gastelbondo, 2019), no obstante, su implementación, no garantiza una eficiencia que permita cubrir las necesidades energéticas en determinadas zonas, puesto que su eficiencia se ve continuamente afectada por diferentes factores externos relacionados a la ubicación como: las condiciones climáticas, ambientales o geográficas de la zona.

Por lo cual es fundamental determinar la mejor ubicación y orientación para situar proyectos energéticos. Por esto es imprescindible el análisis del territorio y las condiciones geográficas, ambientales, de infraestructura, entre otros. De este modo, identificar el potencial de las energías renovables y sus emplazamientos se ha convertido en un tema estratégico dentro de

la planificación energética (Roberts et al., 2017), es por esta razón que se debe tener un apoyo de la tecnología, en la cual nos pueda orientar y ayudar a tomar decisiones, sin embargo, la principal barrera consiste en el análisis de variedad de datos que resultan en algo complejo a nivel numérico, y que requiere de diferentes programas para sus cálculos, por lo cual para poder realizar un análisis eficiente se recurre a los Sistemas de Información geográfica (SIG), los cuales permiten el análisis, procesamiento y visualización de datos espaciales y numéricos, estos permiten realizar estudios de brillo solar, dirección de vientos, riesgos ambientales, emisiones atmosféricas, entre otros en diferentes áreas simultáneamente. De acuerdo con (Lozano et al., 2014), los softwares SIG son herramientas poderosas que no solo solucionan problemas de ubicación, sino que también generan bases de datos esenciales para afrontar desafíos territoriales de manera efectiva.

Anteriormente la etapa de exploración al desarrollo de los proyectos se realizaba de forma física, se tendría que trasportar un equipo de técnicos y profesionales para inspeccionar el área de interés, recorrer largas distancias, enfrentarse a la adversidad del terreno y variabilidad climática, muchas veces los sitios eran de difícil acceso y para nuestro país, las situaciones de orden público retrasaban o incrementaban en gran medida el presupuesto para la construcción de las obras. Dado lo anterior es notorio una ausencia y precariedad en el estado y desarrollo de la infraestructura nacional.

Con el avance tecnológico se han desarrollado nuevos métodos de exploración, uno de los más importantes basados en una disciplina ampliamente extendida es el uso de SIG, ya que es un método indirecto que facilita en gran medida las labores de exploración, nos permite compilar información necesaria y filtrar la más relevante, y presentar los resultados por medios visuales,

reduciendo el tiempo e inversión de los proyectos, fortaleciendo la toma de decisiones debido a un sólido estudio de pre factibilidad dado por la calidad del análisis geoespacial anterior al proyecto.

El propósito principal de la implementación de paneles solares aprovechamiento de las notables características y oferta solar de la ciudad de Neiva es la generación de energía fotovoltaica por medio de paneles solares, uno de los principales beneficios es la reducción de emisiones atmosféricas, reducción en las crecientes tarifas de electricidad doméstica, desarrollo sostenible del territorio y protección de las fuentes hídricas.

2.1 Descripción del área problemática

El cambio climático causado por la contaminación masiva, gases de efecto invernadero (GEI), impactos ambientales derivados de las actividades humanas, así como por la variabilidad climática atribuible a causas naturales (IPCC, 2014), entre otros, ha producido una serie de cambios importantes y significantes en el planeta tierra, como el aumento aproximado de un grado Celsius en el último siglo, una elevación de aproximadamente 17 cm en el nivel del mar, pérdida de la biodiversidad marina, reducción de la captura de dióxido de carbono y disminución de la cobertura de hielo en los casquetes polares; efectos que repercuten en el hábitat de los asentamientos humanos, animales y vegetales (Herrán, 2012).

Por lo cual, frente al problema ambiental global del cambio climático, las tendencias de crecimiento altamente impactantes por el aumento en el consumo de recursos y energía y la generación de residuos y entropía, surge la oportunidad de desarrollar innovaciones en productos, procesos y servicios que permitan generar bienestar y a la vez reducir la presión sobre el ambiente local, regional y global (Ortiz Motta et al., 2012). Es por esto que cada vez más

países y regiones implementen el uso de energías alternativas para reducir los efectos causados por actividades realizadas en el territorio, no obstante, en países en vía de desarrollo, se tienen diferentes obstáculos debido a la disposición de apoyo que permita su implementación, falta de tecnología y carencias en guías adecuadas para la implementación de estas energías.

Es evidente que Colombia necesita acceso a fuentes de energía renovables por la creciente demanda energética y la urgencia de reducir los efectos del calentamiento global. La ley 1715 de 2014 señala que se debe buscar el aprovechamiento del recurso solar en proyectos de urbanización municipal o distrital, en edificaciones oficiales, los sectores industriales, residenciales y comerciales planteando incentivos tributarios para los constructores que implementen fuentes de energía limpias en sus proyectos.

No obstante, aunque la abundancia de recursos para la implementación de energías renovables como la fotovoltaica es significativa en el país, identificar ubicaciones adecuadas para instalar plantas de energía solar es un desafío que requiere un análisis detallado de diversos factores ambientales y tecnológicos.

La ubicación estratégica de estas instalaciones es fundamental para aumentar su eficacia y reducir su impacto en el entorno natural y social. Por lo que, se requiere análisis de condiciones físicas, bióticas, económicas, culturales y políticas que pueden condicionar la implementación de estos proyectos para determinar la viabilidad en la zona. A lo largo de este documento se determinará cuales áreas del municipio de Neiva, Huila, tienen limitaciones o son potencialmente idóneas para la implementación de paneles solares, para esto es adecuado realizar una descripción general del municipio.

El municipio de Neiva, Huila, se ubica entre las cordilleras Central y Oriental, cuenta con varias fuentes hídricas, entre las cuales se destacan los ríos Magdalena, el Oro y Las Ceibas. Limita al norte con los municipios de Aipe y Tello; al sur con los municipios de Rivera, Palermo y Santa María; al oriente con el departamento del Caquetá y al occidente con el departamento del Tolima. En los meses de agosto y septiembre, en los que las lluvias son casi nulas, la temperatura máxima en la zona urbana puede alcanzar los 40 °C, y en los meses más frescos, que son los más lluviosos, como abril, noviembre y diciembre; oscila entre los 28° y 30° C (Documento Diagnostico Alcaldía De Neiva POT). Su área metropolitana posee una economía muy dinámica basada en el ecoturismo, gastronomía, industria y comercio.

Sus principales actividades económicas son la agricultura y la ganadería; los principales cultivos son café, algodón, arroz riego, fríjol, maíz, sorgo, cacao, caña panelera, plátano, yuca, iraca y tabaco. De las actividades del sector primario el 64,9% corresponde al sector Agrícola, 8,7% al sector pecuario y el 7,2% al sector piscícola. En la actividad minera se destaca las minas de oro, plata, caliza, mármol y cobre. El 11% de los establecimientos de la ciudad se dedican al sector industrial. Se destaca la explotación de petróleo y gas natural. La actividad industrial se desarrolla en la agroindustria, en manufacturas de producción artesanal, en la producción de alimentos y bebidas, y en la fabricación de carrocerías y la metalmecánica (Documento Diagnostico Alcaldía De Neiva POT, n.d.). En el municipio hay diferentes proyectos orientados al aprovechamiento de la energía solar como el parque Solar Brisas de Ecopetrol, emprendimientos de energía solar y la implementación de un sistema fotovoltaico en las instalaciones del SENA. Este incremento en su uso se debe a las condiciones adecuadas de que el área aprovecha energías alternativas. No obstante, aunque se tienen varios aprovechamientos de energías alternativas, el consumo de energías y precio solo ha ido en aumento de acuerdo a

(ElectroHuila, 2023), el costo promedio ponderado de energía comprada en contratos paso de 252.87 en 2021 a 287.03 en 2023, por lo cual, es necesario ampliar más la cobertura con energías alternativas, para esto se requiere análisis de condiciones atmosféricas, sociales y demás que permitan determinar la ubicación idónea para este tipo de proyectos, tomando en cuenta que el municipio de Neiva, cuenta con condiciones favorables para la implementación de energía fotovoltaica en el municipio, en el desarrollo del presente documento se estudiara las posibles ubicaciones de paneles solares, tomando en cuenta las características propias del municipio.

2.2 Formulación del problema

El municipio de Neiva, Huila, en los últimos años ha venido presentando un incremento en los precios de energía y suscriptores, de acuerdo con Superintendencia delegada para energía y gas combustible dirección técnica de gestión de energía, para el 2012 los suscriptores correspondían a 270.656, no obstante, para el 2023, el número de clientes es 443.444, lo que evidencia una clara demanda en el consumo de energía. Por lo cual, le generación de energía año tras año se ve en un aumento claro, para el año 2021 se generaba 16,29 MWh/ Año, pero para el 2023 de generan 27,25 MWh/Año (ElectroHuila, 2023), por lo cual la implementación de energías alternativas no es solo una posibilidad para cumplir con el aumento de demanda energético, sino que además es una necesidad cada vez más evidente, tomando en cuenta el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, uno de los objetivos del articulado es el de impulsar la penetración de energías renovables en la matriz de generación y la respectiva disposición de infraestructura y tecnología avanzada en el sistema energético. Esto con el fin de atender la demanda en todos los sectores, a la vez que se cumplen los compromisos sociales, ambientales y se garantiza la seguridad, confiabilidad, asequibilidad y eficiencia del servicio de energía, por lo

cual se espera incorporar 2.000 megavatios (MW), a partir de fuentes no convencionales de energía renovable, no obstante para cumplir esto se requiere realizar estudios y guías, que instruyan a los diferentes sectores a implementar de manera adecuada y eficiente estas energías, por lo cual es preciso tener unas directrices que permitan determinar la utilización de fuentes de energía no convencional en una zona específica, ya que, sin esto el uso de energías alternativas podría acabar siendo inviable sin los adecuados estudios y análisis.

Tomando en cuenta lo anterior se busca realizar un análisis de diferentes condiciones ambientales como las variaciones atmosféricas, usos de suelo y la disposición de la infraestructura eléctrica a través de SIG, a fin de conocer ¿Cuáles son las posibles localizaciones de paneles solares en el municipio de Neiva, Huila?

Figura 1.

Datos de energía

Trimestre	2021	2022	2023	VAR (%) 2022-2023
N.º de clientes	420.702	430.782	443.444	2,94
Cobertura %	95,57%	81,43%	45.02%	-44,2
(Demanda - Compras/ Demanda)	95,57%	81,43%	45.02%	-44,2
Costo promedio ponderado de energía comprada en contratos ($/KWh)	252.87	278.59	287.03	8,44
Costo promedio ponderado de energía comprada en bolsa ($/KWh)	256.50	247.89	601.64	353,75

Nota. producción de energía del departamento del Huila de los últimos 3 años. Tomado de: Electrohuila. 2024. https://www.electrohuila.com.co/wp-content/uploads/2023/07/Reporte-integrado-EH-2023.pdf

2.3 Justificación

El consumo de energía eléctrica aumenta en relación con el crecimiento de la población mundial, una parte considerable de la producción de energía proviene de los combustibles fósiles, que influyen negativamente por la generación de gases de efecto invernadero (GEI). (GHG, GreenHouse Gases); una alternativa prometedora es el uso de paneles solares (PV), que son una forma de generación de energía eléctrica limpia y a bajo costo, libre de gases contaminantes. (García Barrios, 2018), no obstante, la eficiencia de los paneles solares se ve continuamente afectada por diferentes factores externos relacionados a la ubicación como: las condiciones climáticas, ambientales o geográficas de la zona. Por lo cual es fundamental determinar la mejor ubicación y orientación para situar proyectos energéticos, para los cuales es imprescindible el análisis del territorio y las condiciones geográficas, ambientales, de infraestructura, entre otros. De este modo, identificar el potencial de las energías renovables y sus emplazamientos se ha convertido en un tema estratégico dentro de la planificación energética (Roberts et al., 2017), es por esta razón que se debe tener un apoyo de la tecnología, en la cual nos pueda orientar y ayudar a tomar la mejor decisión, por lo cual se ha implementado en los últimos años las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), la cual permiten realizar estudios de brillo solar, dirección de vientos, riesgos ambientales, entre otros, que permiten el estudio de diferentes áreas simultáneamente. De acuerdo con (Lozano et al., 2014), los software SIG son herramientas poderosas que no solo solucionan problemas de ubicación, sino que también generan bases de datos esenciales para afrontar desafíos territoriales de manera efectiva, es por esto que en conjunto con esta herramienta, se estudiara las posibles ubicaciones del paneles solares en Neiva, Huila, esto aporta no solo una base para que futuros proyectos

tengan en cuenta la utilización de estas herramientas para proyectos de energía alternativa, sino que además le brinda a el municipio un conocimiento de las posibilidades de implementación en su territorio de energía fotovoltaica. Por otro lado, permite una guía a futuros proyectos para la implementación de estas energías, teniendo en cuenta factores que pueden llegar a causar la ineficiencia de los procesos, y como analizar las diferentes condiciones atmosféricas, sociales y ambientales, a través de SIG, para aprovechar las características de un territorio para proyectos de energía renovable.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Determinar las áreas óptimas para la instalación de paneles solares en Neiva, Huila, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), considerando variables ambientales, climáticas y de uso del suelo para evaluar su idoneidad.

3.2 Objetivos específicos

- Utilizar datos de sistemas de información geográfica (SIG) para identificar las regiones con mayor potencial para la generación de energía fotovoltaica en Neiva – Huila, considerando factores como usos de suelo, áreas protegidas y técnicas (como accesibilidad) que puedan afectar la instalación y operación de paneles solares.
- Identificar y analizar las limitaciones atmosféricas mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) tales como, la radiación solar, nubosidad, temperatura, y precipitación.
- Desarrollar un mapa por medio de SIG de la ubicación óptima de paneles solares en Neiva – Huila, tomando en cuenta las condiciones analizadas previamente.

4. Antecedentes

Según Sawyer H. et al. (2022), la energía solar en comparación con otras energías renovables es la que tiene las emisiones de gases de efecto invernadero más bajas del ciclo de vida y, en algunos casos puede tener una alta eficiencia en el uso de la tierra. Los impactos asociados con la energía solar en gran escala (USSE), son la cantidad de tierra que requieren las instalaciones, esto tiene gran impacto en los paisajes y pérdida directa e indirecta de hábitat de fauna y flora. En su estudio se enfoca en los impactos potenciales del desarrollo solar en la vida silvestre, especialmente en animales ungulados ya que los USSE pueden alterar o bloquear los movimientos o migraciones de estas especies y poder brindar pautas para minimizarlos, así poder tener consideraciones importantes para equilibrar los beneficios globales de la energía renovable con los impactos en la vida silvestre donde se construyen estos parques solares. (Neita & Restrepo, 2024)

Ahora bien, el uso de SIG para la implementación de sistemas fotovoltaicos se ha esparcido alrededor del mundo, un ejemplo actual es el de Irán un país del oriente medio donde se han realizado estudios para investigar la viabilidad de la energía solar basados en el uso de SIG, agregando otros tipos de análisis como: La lógica difusa y las funciones de membresía difusa para crear capas de criterios en el medio ambiente para dibujar el mapa de la idoneidad de las tierras y la técnica del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP). (Mohsen Soleymani & Mohammad Javad, 2017); por otra parte, el uso por primera vez de un enfoque de promedio de peso ordenada (OWA). (Firozjaei, y otros, 2019). Arrojando resultados positivos para el desarrollo de esta tecnología limpia.

Según la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (EPIA) (REVE, 2014), la capacidad global de generación eléctrica a partir de sistemas fotovoltaicos era para el año 2013

igual a 140 GW, siendo Europa la región líder con una participación del 58%, equivalente a 81.5 GW, seguida de los países asiáticos con un porcentaje igual a 29%, América con un 9% y el resto del mundo con una capacidad porcentual del 4%. Cabe destacar la importancia del aumento de la capacidad instalada en China, que se encuentra por encima de los 18MW, ubicándose en el panorama mundial por encima de Italia. Dentro de los países que pertenecen a la región europea, la mayor capacidad fotovoltaica se encuentra distribuida entre Alemania, Italia, España y Francia, en ese orden. (Checa & Cruz, 2015)

Entre los países que cuentan con la mayor capacidad instalada de generación fotovoltaica a nivel mundial están: Alemania, China, Estados Unidos, Italia, España y Francia; países de América como: Costa Rica, Brasil, Ecuador, Argentina y Colombia, y algunas ciudades y países de Asia. Esto permite realizar un comparativo entre las regiones para poder evidenciar el potencial de generación fotovoltaica en estos países de América. (Checa & Cruz, 2015)

Sánchez-Lozano; realizaron un estudio en la región de Murcia en el 2014, donde se ubican las zonas con los parámetros más adecuados para la instalación de una granja solar en la provincia de Murcia en España, concluyen que el uso de SIG es una excelente herramienta para resolver problemas complejos de localización, logrando reducir las alternativas a un número reducido y manejable. (Sanchéz-Lozano, Garcia-Cascales, Meseguer-Valdenebro, Roca-González, & Lamata-Jiménez, 2014).

Por otra parte las tesis de grado presentada por: (Navarro López, 2019) para optar por el título de ingeniera Topógrafo y Agrimensor de la Universidad del Altiplano de Perú, utiliza la evaluación multicriterio de SIG para identificar zonas potenciales para el uso de energía fotovoltaica para aplicar riego en áreas agrícolas en las cercanías de la cuenca 0171 ubicadas en

las provincias de Moho u Huancané, donde recomienda el uso de SIG y profundizar el análisis multicriterio, ya que considera una gran ayuda para proyectos de manejo medioambiental además de abaratar costos; la tesis de grado de (Julón Perez, 2022), realiza un estudio para determinar las áreas idóneas en la provincia del Amazonas, para la instalación de sistemas de energía fotovoltaica conectada a una planta, con el uso de SIG e incluyendo Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), donde se analizaron 14 subcriterios para zonificar por medio de un modelo geográfico con resolución espacial de 1 km.

A nivel nacional se observan la investigación realizada por: (Bonilla Perez, 2014), donde realizo una evaluación de la oferta solar de 4 veredas en el municipio de Sogamoso, donde se hallaron 53 predios sin cobertura solar por lo que se propuso el uso de SIG para conocer la dinámica del paisaje, análisis del costo-beneficio ambiental y social, para suplir la necesidad energética por medio de la instalación de micro redes de sistemas solares con alta potencialidad. En el departamento de Antioquia otro tesista (Acosta Campos, 2021), se propuso a diseñar un Catastro Solar en el municipio el Retiro por medio de la combinación de la tecnología Lidar y fotogrametría con drones, para la generación de energía solar fotovoltaica sobre los tejados en una ubicación para brindarle información a cada uno de los usuarios.

Es crucial considerar el potencial de Colombia en la generación de energías renovables, dado su ubicación geográfica y cercanía al ecuador. Esta posición permite una constancia climática a lo largo del año, sin estaciones marcadas como en los países más cercanos a los polos. En este contexto, es fundamental prestar atención a los pisos térmicos de cada región y sus características al momento de localizar los paneles solares.

Colombia se encuentra ubicada en una zona privilegiada del trópico, donde la posición del sol no posee mayor variación durante el año y, por consiguiente, la luminiscencia mantiene

un valor constante. Esta localización mundial les facilita a los ingenieros diseñar sistemas fotovoltaicos y reducir los costos de sus diseños, ya que no se necesitan sistemas de rastreo mecánico como se realiza en países con clima estacional, donde opera todo el año (Bitar & Chamas, 2017).Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

Como se menciona en el trabajo Estimación del Potencial de Generación de Energía Solar en el Norte del Caribe Colombiano, se destaca que esta región del país es ideal para la instalación de infraestructuras solares debido a su clima cálido y tropical durante todo el año, con una temperatura promedio de 25°C y picos que pueden alcanzar los 40°C. (Mejía,2021)

Por otro lado, es de importancia reconocer el clima en Colombia está influenciado por factores geográficos y atmosféricos, lo que resulta en temperaturas que pueden variar desde 0°C en regiones montañosas hasta 40°C en regiones costeras y desérticas La agregación situada en la línea del ecuador, el país está situado en una región intertropical, lo que permite que los rayos del sol incidan verticalmente durante una estación determinada.

Estos fenómenos, que ocurren durante todo el año, dan como resultado climas extremadamente cálidos, pero son causados por factores como la humedad. La reducción de los efectos de la radiación puede dar lugar a una amplia gama de climas, proporcionando alivio (Tovar, 2014).

Además, es relevante tener en cuenta el impacto del fenómeno de El Niño en la producción de energía en Colombia. Desde julio de 2015 hasta el primer trimestre de 2016, diversos países de América Latina, incluida Colombia, han sufrido sequías intensas debido a este fenómeno. La falta de lluvias afecta considerablemente las cuencas hidrográficas, disminuyendo la capacidad de generación hidroeléctrica, que es la principal fuente de energía en el país. Esto

no solo reduce la disponibilidad de agua en los embalses, sino que también incrementa la dependencia de la generación termoeléctrica basada en combustibles fósiles, lo que eleva las tarifas eléctricas y pone en riesgo el desarrollo productivo del país. (Qué es el fenómeno El Niño y cómo afecta a América Latina, 2015)

Cabe mencionar que en Colombia el consumo energético al ir ligado al cambio climático, específicamente a fenómenos como el de La Niña o El Niño que mencionamos anteriormente pueden afectar el suministro y la generación de la red eléctrica nacional, especialmente por la generación por embalse, filo de agua e hidráulica. De igual manera el PIB del país y la situación económica tienen un impacto en la demanda energética. Según la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), la proyección es que entre los años 2010 y 2020 una tasa media de crecimiento del 3,4% y del 3.1% para el periodo 2020 a 2030 (Rodríguez et al., 2018).

Para abordar estos retos, Colombia se ha propuesto disminuir sus emisiones en al menos un 51% para el año 2030, conforme a los objetivos del Acuerdo de París. Además, el país tiene como meta lograr el carbono neutralidad para el 2050 mediante una transición energética. Dentro de este contexto, Colombia pretende generar al menos 4 GW de energía a partir de fuentes no convencionales y aspira a que para el 2022, el 12% de su matriz energética esté compuesto por energías renovables no convencionales. (Tejada & Malagón & Prieto, 2022)

De acuerdo con el Atlas de radiación solar de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), ciertas regiones de Colombia, como La Guajira, gran parte de la Costa Atlántica, y áreas específicas en los departamentos de Arauca, Casanare, Vichada y Meta, presentan niveles de radiación solar superiores al promedio nacional, alcanzando hasta 6,0 kWh/m²/día. Estas zonas son especialmente propicias para la instalación de paneles solares. Aunque la Costa Pacífica tiene niveles de radiación solar inferiores al promedio, aún son adecuados para la

generación de energía eléctrica a partir de energía solar, lo que demuestra el amplio potencial del país para aprovechar las energías renovables. (Méndez & Gómez, 2023)

No obstante para poder aprovechar de manera adecuada la radiación solar en una zona específica se debe tener en cuenta diferentes condiciones, como lo es la cantidad de luz solar diaria, la anergia requerida en un lugar y las condiciones ambientales que pueden llegar a causar deficiencias energéticas, en el estudio de (Vargas & Torres, 2020), tuvieron en cuenta la radiación solar que se disponía en una zona determinada, a través de datos obtenidos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), con los cuales lograron determinar la inclinación de los paneles solares y el potencial energético que podrían obtener. Por otro lado, aunque las condiciones como radiación solar son importantes, es adecuado considerar otras consideraciones, en el estudio de (Francisco & Arzola De La Peña, 2024) se toman consideraciones socioeconómicas del lugar, considerando las actividades económicas del municipio, la ecología y la relación del municipio con las energías alternativas, determinando las necesidades energéticas del municipio y las posibles energías alternativas a implementar.Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

Cada consideración que se debe tomar para analizar las energías alternativas y su ubicación se puede examinar mediante sistemas SIG, según (Gandullo, 2022), en su estudio de localización de una central fotovoltaica mediante SIG, se realizó el estudio mediante el programa QGIS, de diferentes factores como vías, líneas eléctricas, poblaciones, niveles de radiación solar, pendientes y tipología de suelos, que se reúnen en mapas excluyentes con peso determinado, lo que permite determinar las zonas con factores idóneos para su mejor ubicación. Aunque las consideraciones ambientales son importantes para una ubicación adecuada, también se pueden

analizar cuestiones sociales por medio de los SIG, considerando el estudio de (Lozano et al., 2014), se toman en cuenta consideraciones de afectación social como suelos urbanos y aptos para urbanizar, áreas de valor paisajístico, patrimonios arqueológicos, paleontológicos y cultural y lugares de importancia comunitaria, como primer filtro de exclusión de zonas para la ubicación de huertos solares, para proteger la cultura de una población.Haga clic o pulse aquí para escribir texto. Por otro lado, los estudios económicos realizados en SIG, pueden ser de gran ayuda al determinar cuáles son las opciones para prestar un mejor servicio a los consumidores, un caso claro es el estudio de (Vélez, 2018), en el cual se realizó un análisis de costos que implicarían una ampliación de la red eléctrica y de la implementación de paneles solares, con lo cual se puede determinar a través de programas SIG, que la ampliación de la red eléctrica podrían resultar igual de costosa a la implementación de energías alternativas, esto tomando en cuenta la instalación y costo de los paneles solares, no obstante aunque la implementación de energías alternativas resulta ser costosa, tomando en cuenta la distancia que se debería cumplir con la ampliación de la red y su eficiencia, resulta más óptimo el uso de energías renovables, por lo cual, los SIG, no solo resultan ser una herramienta muy útil para determinar la viabilidad de estos proyecto, sino resultan ser algo determinante a la hora de analizar diferentes características de la zona.

En cuanto al departamento del Huila se presenta la instalación de paneles y parques solares como una solución efectiva para aprovechar su abundante recurso solar, especialmente en la Riviera del Río Magdalena. Esta iniciativa, dirigida inicialmente a los estratos socioeconómicos altos, empresas e instituciones gubernamentales, ofrece una fuente de energía estable y rápida de implementar, ideal para mitigar los problemas del fenómeno del Niño. Las granjas solares son más económicas y rápidas de construir que las represas, con menores costos e

impacto ambiental. Aunque la inversión inicial es alta, su larga vida útil y bajo mantenimiento la hacen rentable. Ejemplos actuales en Huila muestran una adopción limitada en hogares de estratos bajos. La alta irradiación solar en Colombia y los incentivos fiscales gubernamentales hacen que la energía solar sea una opción viable y económica a largo plazo. En Huila, el elevado potencial solar puede aprovecharse para proyectos fotovoltaicos. (Cuellar, 2021)

5. Referente normativo y legal

En Colombia, la construcción y operación de energías fotovoltaicas se rige por una serie de normas, leyes y resoluciones que abarcan aspectos ambientales, técnicos y administrativos. Éstos son algunos de los más importantes:

5.1 Ley 1715 de 2014

Tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, sistemas de almacenamiento de tales fuentes y uso eficiente de la energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nación I. (*Ley 1715 de 2014*, n.d.)

5.2 Resolución 1283 de 2016 de la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética)

Por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables – FNCER y gestión eficiente de la energía para obtener los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11,12 13 y 14 de la ley 1715 de 2014 y se adoptan otras determinaciones (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016a)

5.3 Licencia Ambiental – Agencia Nacional de Licencias Ambientales

La construcción de un parque solar fotovoltaico requiere de una licencia ambiental, la cual es emitida por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) o la autoridad ambiental regional competente. (ANLA, 2017)

5.4 Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)

Establece las exigencias y especificaciones que garanticen la seguridad de las instalaciones eléctricas con base en su buen funcionamiento; la confiabilidad, calidad y adecuada utilización de los productos y equipos, es decir, fija los parámetros mínimos de seguridad para las instalaciones eléctricas (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

5.5 Resolución 2182 de 2016

Se modifica y consolida el Modelo de Almacenamiento Geográfico contenido en la Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales y en el Manual de Seguimiento Ambiental de Proyectos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016b).

5.6 Resolución 627 de 2006

Por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental. En este se establecen como parámetros principales para la medida del ruido nivel de presión sonora continúo, ruido residual y nivel percentil. (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006)

6. Referente teórico

La problemática generada por la sobreproducción de CO2 a nivel mundial representa una preocupación a nivel mundial, en donde países como China y Estados Unidos han ocupado el primer y segundo lugar en producción de este (Marland, Boden, & Andres, 2013). Los inconvenientes ambientales por las energías convencionales han motivado el uso de otras fuentes de energía, es entonces cuando surge la solar como un sistema con ventajas medioambientales evidentes en comparación con las fuentes convencionales. Su principal ventaja está relacionada con las bajas emisiones de CO2.

En China, debido al crecimiento industrial y a los asentamientos humanos, ha aumentado el consumo de energía (Martinot, 2001) y ha desencadenado problemas de contaminación ambiental, con hasta 75% por contaminación derivada del consumo de carbón empleado para generación eléctrica (Yanrui, 2003). Por lo anterior, como estrategia gubernamental fundamentada en los incentivos y directrices de gestión de nuevas fuentes de energía (National Renewable Energy Laboratory, 2004).

En Alemania, luego de la comisión de cambio climático de 2004, en donde se estableció la necesidad mundial de reducir el dióxido de carbono y gas metano en 80% para 2050, se elaboró el Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) (Lauber y Mez, 2004). Por ello se proyectó el uso de la energía renovable en 38% para 2020, 50% para 2030, 65% para 2040 y 80% para 2050, con una capacidad total acumulada de energía solar por fotoceldas de 51,750 MW7 adicionados de 3, 500 MW por año. Conviene destacar también que Alemania es uno de los países que mayor número de investigaciones ha realizado sobre uso de energía solar y llegó a registrar en 2010 un total de 290 patentes relacionadas (Grigoleit, & Lenkeit, 2012).

Con relación a Colombia, la ley 1715 de 2014 señala que se debe buscar el aprovechamiento del recurso solar en proyectos de urbanización municipal o distrital, en edificaciones oficiales, en los sectores industrial, residencial y comercial planteando incentivos tributarios para los constructores que implementen fuentes de energía limpias en sus proyectos. Aun así, el desarrollo de este tipo de energía en Colombia está en proceso de implementación.

Ahora bien, la producción y uso de energía solar repercute de manera positiva y negativa en el ambiente. La primera se hace evidente porque este energético produce hasta 18.8% menos emisiones de CO2 (Hernandez et al., 2014), favorece el proceso incluyente de energía para poblaciones rurales y se hace parte de la oferta energética de las comunidades con posibilidad de oportunidades laborales para proveedores de celdas y paneles y para los responsables del funcionamiento de la planta de producción, que incluso puede estar ubicada en terrenos degradados pero que se recuperan con la construcción de la central solar. Todas estas justificaciones positivas hacen que este energético sea un medio para la mejora en la calidad de vida de los países en desarrollo (Burney, Woltering, Burke, Naylor, & Pasternak, 2010; Tsoutsos, Frantzeskaki, & Gekas, 2005). Con respecto a los segundos, se asocian más a la fase de conservación y desmantelamiento de la planta por la permanencia que puedan tener en el paisaje las adecuaciones realizadas durante la operación de la central solar, cuya vida útil puede ser de 25 a 40 años (UPME, 2015).

Las grandes centrales solares requieren grandes extensiones de tierra para la instalación de celdas o paneles solares y éstos alteran el paisaje, y pueden causar desertificación (Bastida, Moreno, Hernández, & García, 2006), generan barreras para la movilidad de las especies y en algunos casos obligan a la migración definitiva de las mismas afectando sensiblemente a la biodiversidad (UPME, 2015). Por otro lado, la remoción de la cobertura vegetal hace que se

favorezca la liberación de carbono a la atmósfera en forma de dióxido de carbono (CO2), lo que disminuye la concentración de carbono en el recurso suelo (UPME, 2015) esto atenta contra la calidad del suelo, afecta la capacidad para la sustentabilidad de los sistemas productivos y repercute en la fertilidad y la productividad de la tierra para la producción de alimentos y para la seguridad alimentaria (Fthenakis, & Chul Kim, 2009). También la instalación de paneles solares, que pueden elaborarse con plomo, níquel, arsénico y en ocasiones con teluro de cadmio, sustancias que requieren adecuados procesos de disposición (IPCC, 2012; Sinha et al., 2008) en consideración a su toxicidad (IEA, 2014).

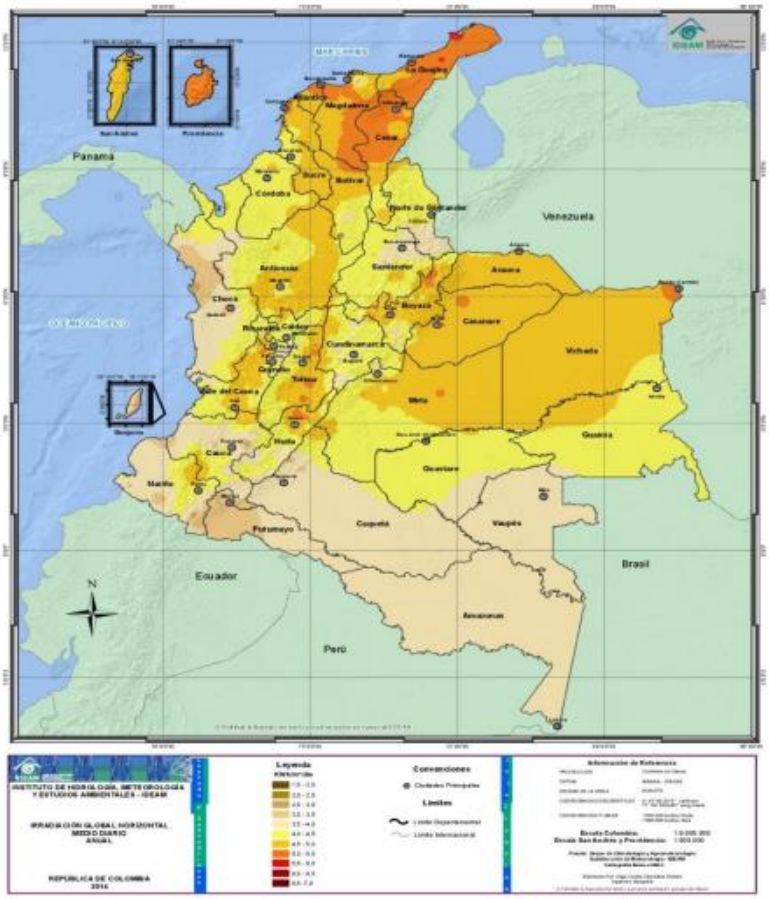
Ahora bien, para el desarrollo de todo tipo de proyecto de energías renovables es de importancia conocer las variables atmosféricas y condiciones ambientales que se suman al reto de la obtención de energías limpias. Entre estas tenemos las precipitaciones, ya que influyen en el desempeño de los paneles fotovoltaicos convencionales, disminuyendo su productividad en generación de energía eléctrica, es decir, entre mayores precipitaciones haya en una zona, menor energía se va a producir por parte de los paneles solares, y es debido principalmente a que las precipitaciones están directamente relacionadas con las nubes. (Gastelbondo. David, 2019)

Otra de estas variables es la Radiación, ya que es el factor más importante para el análisis energético en la implementación de energía fotovoltaica, ya que esta nos permite conocer la energía que se puede generar. Entre más radiación se tenga en cierto punto, mayor es la energía producida por parte de los paneles fotovoltaicos, entonces, al momento de elegir una zona para la ubicación de los paneles solares, es fundamental que los índices de radiación sean altos para aprovechar al máximo el recurso solar. (Gastelbondo. David, 2019)

El Instituto de Hidrología, Metrologías y Estudios Ambientales (IDEAM), suministra el mapa de radiación global incidente sobre un plano horizontal, este mapa presenta la intensidad solar y la indica mediante convenciones de colores, desde marrón claro hasta rojo oscuro, permitiendo conocer el potencial energético solar en Colombia.

Figura 2.

Potencial Energético Solar en Colombia



Nota: última actualización del atlas del IDEAM donde se observan los niveles de la oferta de energía solar en Colombia en el año 2018. Tomado de: IDEAM. (2018) Atlas de radiación, viento y clima. https://archive.org/details/atlas-climatologico-de-colombia/page/22/mode/2up

La radiación solar es muy variable a lo largo del país, sin embargo, para la región andina la cual es la zona en la que se ubica el departamento del Huila, como localización de estudio la

radiación en esta región es muy variable con sectores que alcanzan los 5,5 kW/m2 día y sectores con radiaciones menores a los 4 kW/m2 día. En general la región tiene un promedio de 4,5 kW/m2 día (Gastelbondo. David, 2019).

Por otro lado, Colombia es uno de los países más ricos en especies del mundo, tanto en fauna como en flora y por esta razón presenta muchas zonas que son protegidas, con el fin de la conservación de las especies, contando actualmente con 59 parques naturales. Estas áreas de los parques naturales son restringidas para su uso y aprovechamiento, por lo cual, al momento de desarrollar proyectos de ingeniería como lo es el aprovechamiento de energía por medio de fuentes alternativas, se debe tener en cuenta que las áreas que cubren los parques naturales se deben evitar para su implementación. El Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), suministra mapas con las ubicaciones de esos 59 parques naturales (Gastelbondo. David, 2019).

Figura 3.

Parques Naturales en Colombia

Nota. Evaluación técnica y económica de Parques Solares fotovoltaicos en Colombia, 2019. Tomado de: Gastelbondo. (2029) UAntioquia PIA 12556.pdf (udea.edu.co)

Otro aspecto importante por observar en el análisis ambiental es la geomorfología del suelo, con el fin de observar el relieve del país. Por lo cual es necesario hacer un análisis topográfico, con fin de encontrar áreas relativamente planas.

ya que esto facilita aspectos como transporte, mantenimiento, la construcción de la instalación, entre otros (Gastelbondo. David, 2019). Es importante resaltar que Colombia está constituida en un 67% de tierras planas y un 33 % de zonas montañosas en su territorio, las cuales son causadas

por la presencia de las 3 cordilleras (Occidental, Central y Oriental) pertenecientes (Gastelbondo. David, 2019). Con respecto a las tierras planas, Colombia cuenta con muchas zonas con este tipo de topología como, por ejemplo, los valles interandinos (localizados en medio de los sistemas montañosos de las tres cordilleras) y las llanuras del Caribe, Pacifico, Amazonas y Orinoquía (Gastelbondo. David, 2019).

Finalmente, durante la operación de proyectos de energía fotovoltaica, es común llevar a cabo actividades de lavado de paneles o espejos, con lo cual se puede contaminar el agua. Para esta labor se ha encontrado que son necesarios alrededor de 0.02m3 de agua por megavatio hora de energía (UPME, 2015). En este caso, aunque el impacto por consumo de agua es bajo, la disposición final de las aguas con sedimentos, cuando son descargadas al suelo durante el lavado, afecta la cobertura vegetal, lo que propicia espacios para la erosión. A lo anterior se suma la ocupación permanente de la tierra por los paneles y las redes de transmisión, así como la afectación sobre la visibilidad tanto para los vehículos que ocupan las vías perimetrales como las aves que ocupan el espacio aéreo (Hernandez et al., 2014).

7. Metodología

La metodología del proyecto en primera instancia incluye usar instrumentos de recolección de información de diversas fuentes y análisis documental para consultar e identificar factores relevantes para una investigación, por lo cual se dará uso a herramientas como: bases de datos, investigaciones, fuentes gubernamentales, comunidades online, fuentes cartográficas nacionales e institucionales para analizar su contenido. Principalmente se investigara

características físicas del territorio como los usos de suelo, las áreas protegidas y la accesibilidad a la red, que puedan influir en la implementación de los paneles solares, se tendrá en cuenta documentos tales como el POT del municipio de Neiva, mapas oficiales dados por el Instituto Agustín Codazzi (IGAC), estudios hechos en la zona, entre otros, los cuales se plasmaran en programas SIG, para la identificaciones de zonas con menor complicación física y con mayor potencial en el territorio para la ubicación adecuada de paneles solares.

Posteriormente, se determinará las condiciones atmosféricas como radiación solar, nubosidad, temperatura, humedad, viento y precipitación, por medio de fuentes como el IDEAM, satélites, estudios en la zona y artículos, estos datos se llevarán a programas SIG, donde conjunto a las variables físicas ya analizadas, nos guiarán a una reducción de las zonas óptimas para la ubicación de paneles solares. Finalmente, se desarrollará un mapa por herramientas informáticas, en las cuales se logre determinar las ubicaciones óptimas para paneles solares, tomando en cuenta las condiciones físicas como atmosféricas ya mencionadas.

7.1 Enfoque metodológico

El proyecto se fundamenta en un enfoque mixto, que integra de manera simultánea técnicas cualitativas y cuantitativas para abordar de forma integral la complejidad del aprovechamiento de la energía solar. Tal como lo proponen Leech y Onwuegbuzie (2009), este paradigma permite recoger, analizar e interpretar datos de distintas naturalezas en un mismo estudio, facilitando una comprensión profunda del fenómeno investigado.

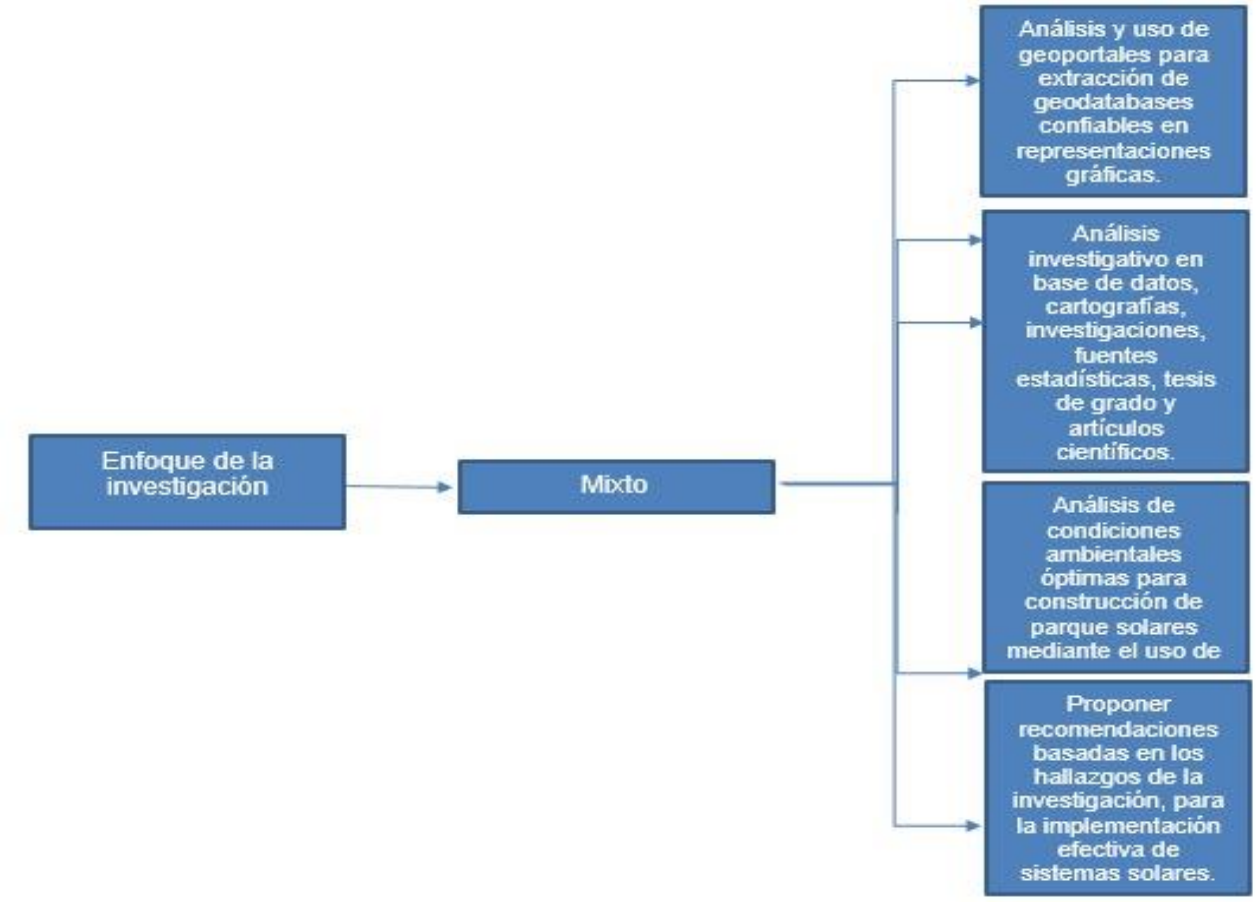
Inicialmente, se identifican y describen los factores cualitativos, centrados en las características y condiciones del entorno que pueden influir en la eficiencia de los sistemas

fotovoltaicos. Posteriormente, se complementa este análisis con la evaluación de datos numéricos extraídos de Sistemas de Información Geográfica (SIG), donde se aplican fórmulas matemáticas y algoritmos para el procesamiento riguroso de la información.

La integración de ambos enfoques no se reduce a la mera suma de sus componentes, sino que su interacción permite superar las limitaciones propias de cada método, proporcionando una visión más amplia y robusta del estudio. El resultado final se plasma en una representación gráfica que sintetiza la viabilidad de la instalación de paneles solares, ofreciendo así una propuesta factible y respaldada por una base analítica sólida.

Figura 4.

Enfoque de la Investigación



7.2 Tipo de estudio

El presente estudio adopta un enfoque descriptivo, orientado a caracterizar y validar las condiciones ambientales que favorecen la instalación de paneles solares en el municipio de Neiva (Huila). De acuerdo con Nieto (2018), el propósito esencial de este tipo de investigación es "recopilar datos e informaciones sobre las características, propiedades, aspectos o dimensiones de las personas, agentes e instituciones de los procesos sociales". En la misma línea, Gay (1996) señala que la investigación descriptiva "comprende la colección de datos para probar

hipótesis o responder a preguntas concernientes a la situación corriente de los sujetos del estudio. Un estudio descriptivo determina e informa los modos de ser de los objetos".

Siguiendo a Sampieri, Hernández, Baptista y Fernández Collado (2010), la relevancia de este método radica en su capacidad para mostrar con precisión las múltiples facetas de un fenómeno, suceso o comunidad. Al enfocarse en la minuciosidad y el detalle de las variables, se logra una base sólida para tomar decisiones fundamentadas y plantear mejoras en el campo investigado.

En este caso, se emplearán fuentes de información confiables, previamente verificadas y analizadas, que incluyen datos geoespaciales y climáticos de organizaciones internacionales y entidades gubernamentales. El uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permitirá la elaboración de mapas y modelos que reflejen de forma detallada la radiación solar, la temperatura, la humedad y otros factores ambientales de importancia en la región. Esta aproximación descriptiva, por tanto, sentará las bases para futuros estudios y orientará la toma de decisiones estratégicas en el sector energético, al identificar con mayor exactitud las zonas de mayor potencial para el desarrollo de proyectos solares.

7.3 Procedimiento

La implementación de esta metodología se hará en cuatro fases, estas consisten en las siguientes actividades:

7.3.1 Fase 1: Recopilación de datos

En la etapa inicial de recopilación de datos se obtuvieron las capas geográficas y variables fundamentales para el análisis, asegurando su coherencia y compatibilidad a través de fuentes oficiales y bases de datos especializadas. En este apartado se presentan, de forma desagregada, cada una de las capas utilizadas, acompañadas de su descripción, origen y los intervalos que se presentan, las capas son las siguientes:

- **Clasificación Territorial**

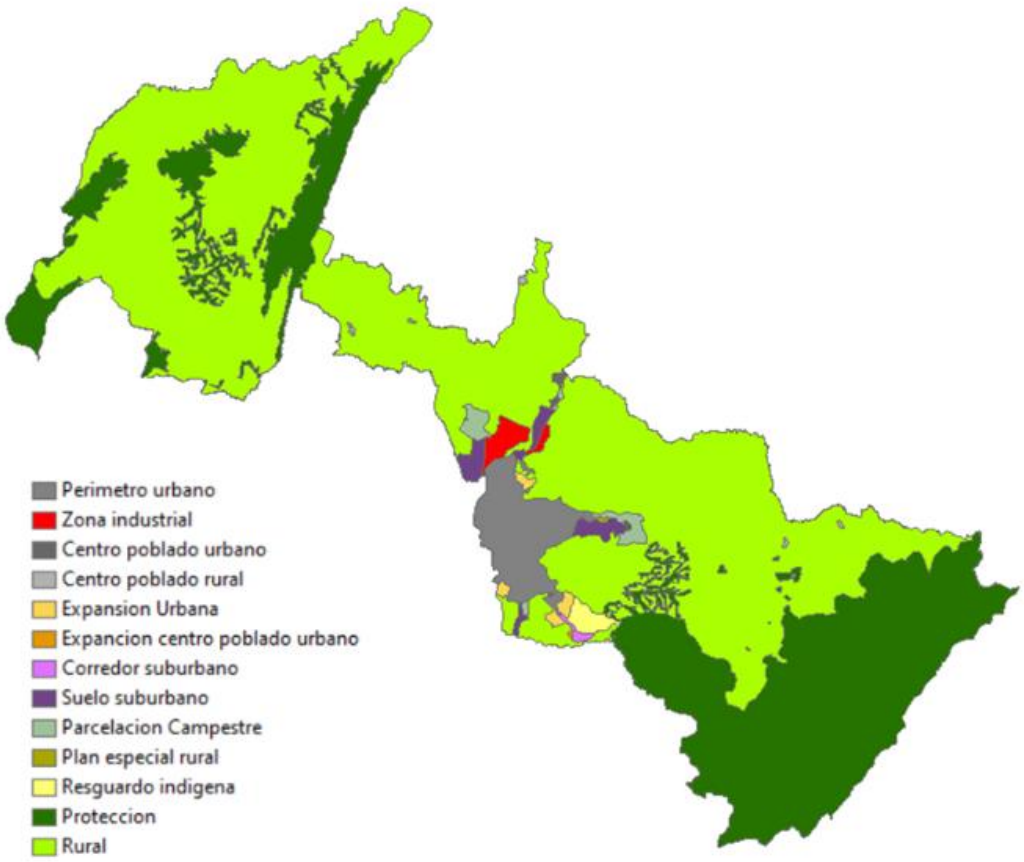
Para definir las clasificaciones territoriales del municipio de Neiva, se realizó un proceso que incluyó la obtención y digitalización de un plano de clasificación territorial, derivado del Plan de Ordenamiento Territorial (POT). Este plano detalla la distribución de diferentes áreas dentro del municipio, tales como la zona urbana, las zonas de protección ambiental, las zonas de expansión y las zonas industriales, entre otras.

La digitalización y el análisis de esta información resultaron esenciales para identificar las zonas de exclusión, es decir, aquellas áreas donde no es posible instalar paneles solares debido a restricciones legales, ambientales o de uso del suelo. Entre estas zonas se encuentran, por ejemplo, las áreas protegidas, que deben ser preservadas por su valor ecológico, y las zonas urbanas densamente pobladas, donde la instalación podría interferir con otros usos del espacio. Esta información constituye un insumo fundamental para determinar las áreas aptas para la instalación de paneles solares. Al delimitar las zonas de exclusión, se pueden focalizar los análisis hacia aquellos territorios donde las condiciones legales, espaciales y ambientales

permitan el desarrollo de proyectos solares. De este modo, se optimizan los recursos y se asegura el cumplimiento de las normativas vigentes.

Figura 5.

Clasificación del Territorio



Nota. Se diferencian los tipos de territorio en el municipio de Neiva. Tomado de: Elaboración Propia.

- **Pendientes**

El análisis de pendientes es un factor crítico en la evaluación de la idoneidad del terreno para la instalación de paneles solares, ya que la inclinación influye tanto en la viabilidad constructiva como en la eficiencia en la captación de radiación solar. En este estudio, se

emplearon Modelos de Elevación Digital (DEM) obtenidos a partir de los datos proporcionados por la NASA. Mediante el software Global Mapper, se extrajeron los valores de elevación relevantes para el área de estudio, utilizando la fuente de datos NASA DEM Elevation Data (1 arc-second resolution SRTM/ASTER GDEM), con una resolución espacial de aproximadamente 38 metros por píxel. Posteriormente, estos datos fueron procesados en un entorno SIG para generar un mapa de pendientes detallado del municipio de Neiva, proporcionando insumos clave para la planificación del proyecto.

El análisis de pendientes reveló que el área central del municipio presenta un relieve predominantemente plano o ligeramente inclinado, con valores inferiores al 7 %. Estas condiciones resultan óptimas para la instalación de paneles solares, ya que facilitan la construcción de la infraestructura requerida y reducen la necesidad de ajustes en la nivelación y orientación de los módulos fotovoltaicos.

En contraste, en las zonas periféricas del municipio, las pendientes se incrementan y se han clasificado según la adaptación de la tabla de clases de pendiente del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (*Descripción y Muestreo de Suelos, 2021*), de la siguiente manera:

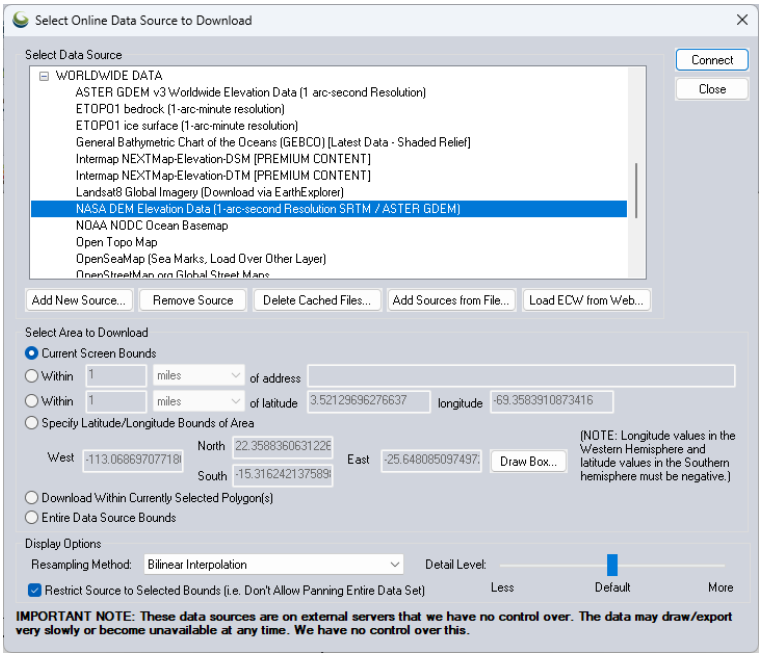
- **Moderadamente inclinado:** pendiente inferior al 12 %.
- **Fuertemente inclinado:** pendiente inferior al 25 %.
- **Ligeramente escarpado o inclinado:** pendiente inferior al 50 %.
- **Moderadamente escarpado o inclinado:** pendiente inferior al 75 %

Las áreas con inclinaciones más pronunciadas presentan desafíos significativos para la instalación de paneles solares, como la necesidad de estructuras de soporte especializadas y mayores costos de construcción. Además, estas zonas pueden estar más expuestas a riesgos de erosión y requerir estrategias adicionales de estabilización.

Se ingresó a Global Mapper y se cargaron los datos de elevación digital (DEM) proporcionados por la NASA, que ofrecen información precisa sobre la topografía.

Figura 6.

Datos Global Mapper



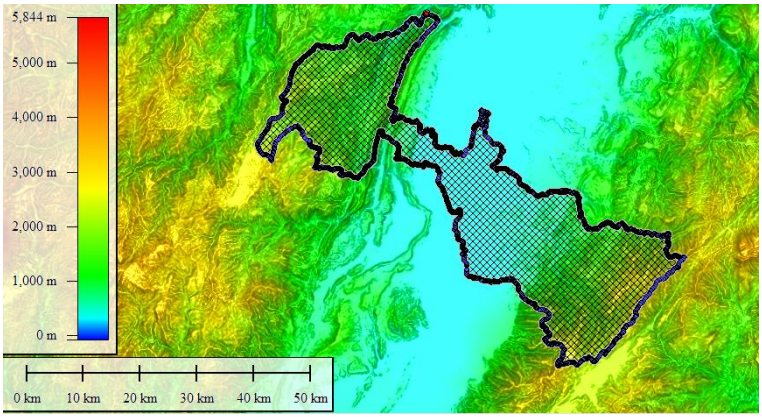
Nota. Software GIS para procesamiento de datos geoespaciales. Tomado de: Global Mapper Software

Posteriormente, se añadió el shapefile (SHP) que delimita el área de estudio, en este caso, el municipio de Neiva.

Se seleccionó el área de interés utilizando el shapefile y, a continuación, se exportó la capa raster en formato GeoTIFF, empleando la opción “Crop to Selected Area Feature”

Figura 7.

Área de estudió

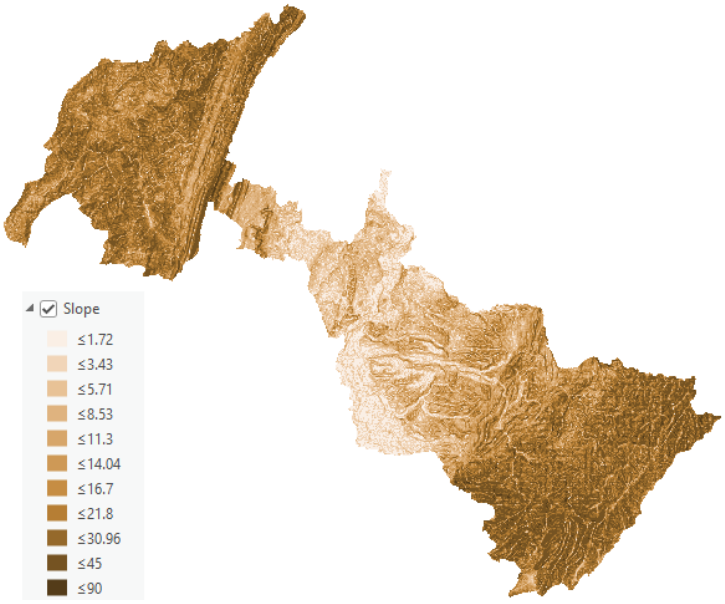


Nota. Polígono de interés en relaciona el rango altitudinal. Tomado de: Elaboración propia

Posteriormente, el DEM obtenido fue importado en ArcGIS Pro, donde se aplicó la herramienta Slope del módulo Spatial Analyst, configurada para calcular la inclinación del terreno en grados (Degree). Esto permitió obtener un mapa detallado donde cada celda del ráster representa la inclinación del terreno en unidades angulares, facilitando la identificación de áreas con pendientes adecuadas para la instalación de paneles solares.

Figura 8.

DEM



Nota. Reclasificación del mapa altitudinal para obtener el modelo de elevación digital. Tomado de: Elaboración propia.

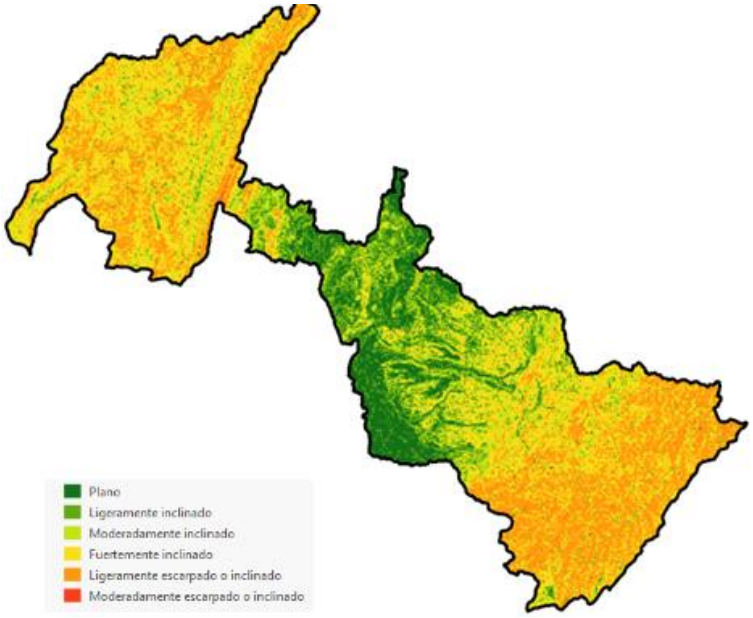
Para una mejor interpretación del análisis de pendientes y su impacto en la instalación de paneles solares, se realizó una reclasificación del modelo de pendientes en seis categorías, de acuerdo con los siguientes rangos:

- Plano: 0 - 3%
- Ligeramente inclinado: 3 - 7%
- Moderadamente inclinado: 7 - 12%
- Fuertemente inclinado: 12 - 25%
- Ligeramente escarpado o inclinado: 25 - 50%
- Moderadamente escarpado o inclinado: 50 - 75%

La figura adjunta a continuación, presenta el mapa de pendientes generado, que muestra la distribución espacial de las inclinaciones dentro del municipio. Este mapa, basado en los datos DEM de la NASA, es una herramienta esencial para la planificación y selección de sitios óptimos para proyectos solares en Neiva.

Figura 9.

Mapa de Pendientes



Nota. Diferenciación altitudinal del municipio de Neiva. Tomado de: Elaboración propia.

- **Red Vial**

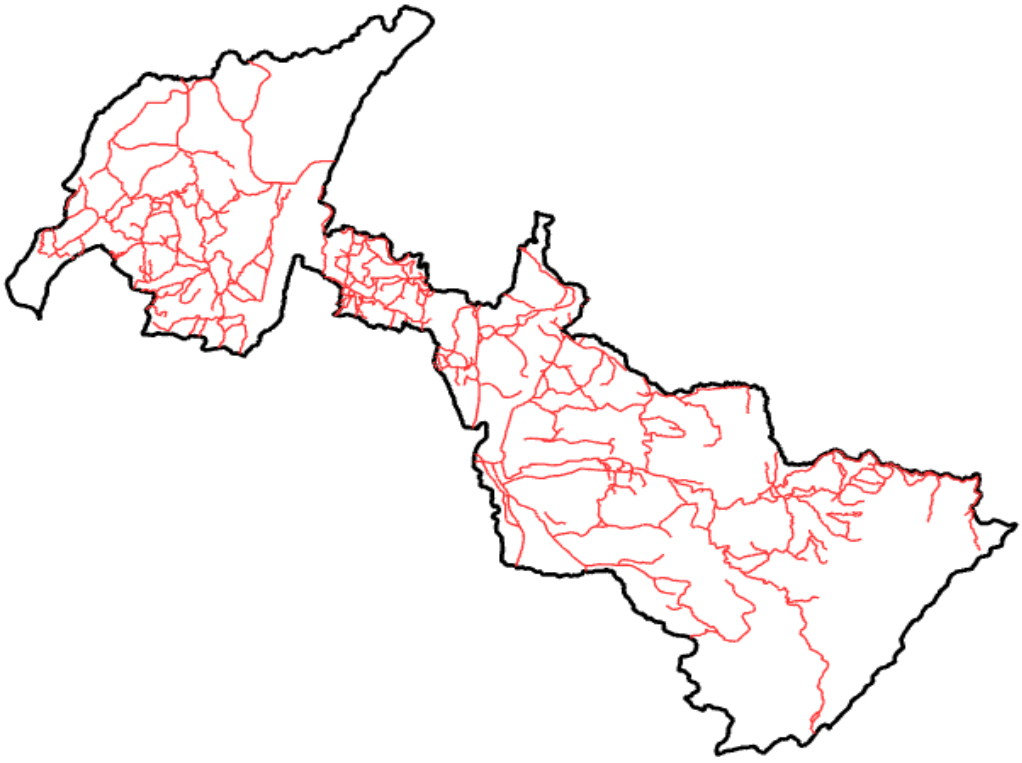
Como parte del análisis territorial, se integraron los datos de la red vial obtenidos de la Base de Datos Básica de Colombia, a escala 1:100.000. Estos datos fueron extraídos de la plataforma *Colombia en Mapas*, desarrollada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). La incorporación de esta información permitió evaluar la accesibilidad a las áreas de interés, un factor clave en la planificación logística y operativa de proyectos de energía solar.

La cercanía a vías principales y secundarias se evaluó como un criterio positivo, ya que facilita el transporte de materiales y equipos hacia los sitios de instalación.

Aunque los datos incluyen la ubicación de las vías, no se dispone de información sobre su estado actual (pavimentación, accesibilidad en temporada de lluvias, etc.), lo que representa una limitación para evaluar plenamente su idoneidad.

Figura 10.

Red Vial



Nota. Infraestructura vial conformada por vías primarias. Tomado de: Elaboración propia.

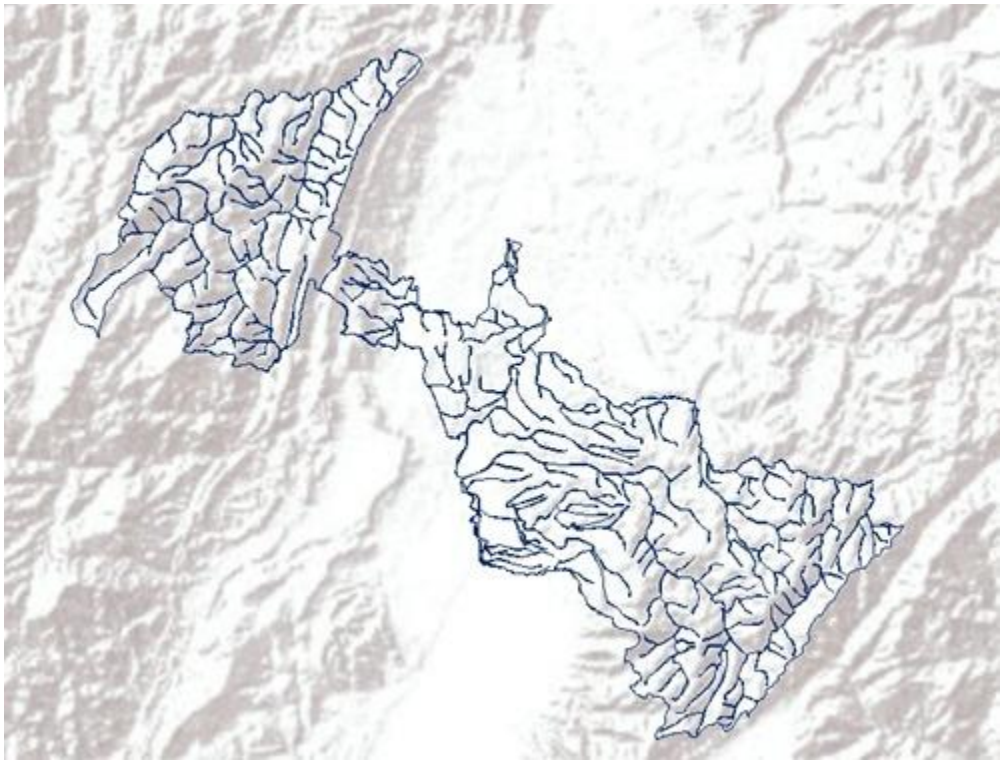
- **Hidrografía**

El municipio de Neiva está rodeado por diversas cuencas hídricas, cuya principal ronda deriva del río Magdalena, que lo atraviesa de sur a norte. De las cordilleras descienden al Magdalena numerosos afluentes. Cordillera Central: Los ríos Baché, Yaya, Aipe, Chiquilá y Cachichi con sus afluentes Las Lajas, Ávila, Órganos, Turbina y Aguache. En el caso de la implementación de proyectos de energía fotovoltaica no existe una reglamentación estricta referente a las restricciones respecto a los cuerpos de agua y rondas hídricas, de acuerdo con la normatividad existente, se destaca La Ley 1715 de 2014 se creó con el fin de reglamentar la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, el Ministerio de Minas y Energía por medio de la Resolución 40042 de 2024, estableció lineamientos de política pública para garantizar la continuidad de los proyectos de generación con Energías Renovables.

Por otra parte, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece Resolución 1312 de 11 agosto de 2016, la cual establece los términos de referencia para los estudios de impacto ambiental en proyectos de uso de energía fotovoltaica, este promueve el uso de energías renovables al tiempo que se minimicen los impactos negativos sobre el medio ambiente y las comunidades. Sin embargo, no se nombran las restricciones respecto a la ubicación de proyectos solares en las zonas rondas hídricas, sin embargo, se aplica el Decreto 2811 de 1974 en su artículo 83 establece que las rondas hídricas protectoras deben tener un aislamiento de un máximo de hasta treinta (30) metros, definiéndola así: “una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta (30) metros de ancho.

Figura 11.

Hidrografía del municipio de Neiva



Nota. Drenajes primarios y secundarios del municipio de Neiva. Tomado de: Colombia en mapas. https://www.colombiaenmapas.gov.co/

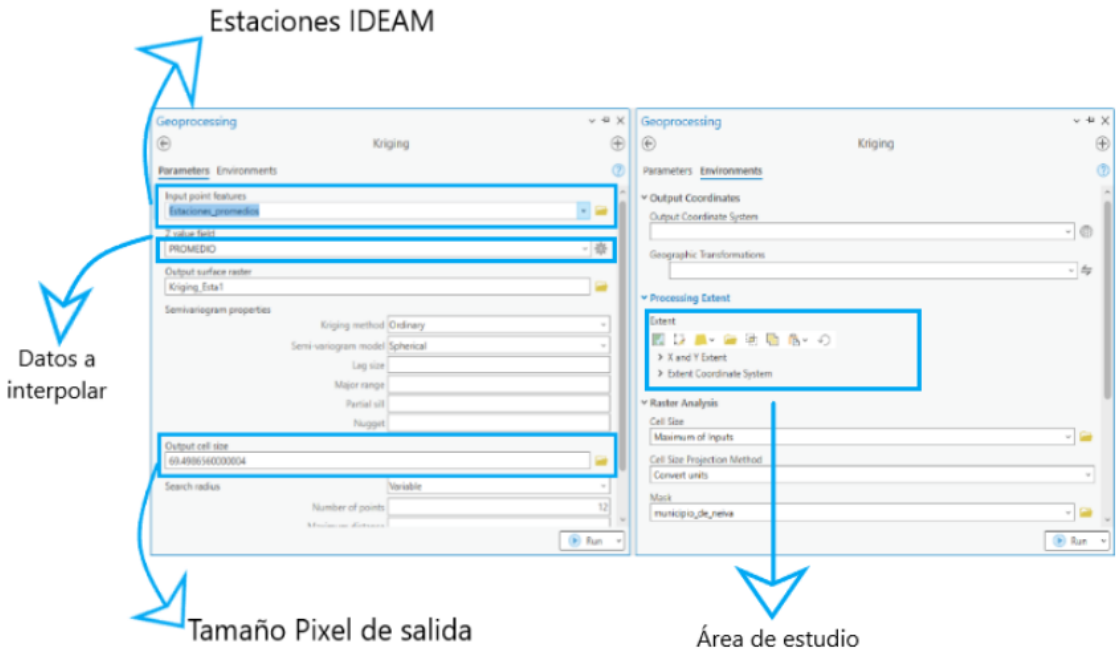
- **Limitaciones atmosféricas**

Para evaluar las limitaciones atmosféricas en el área de estudio, se analizaron variables climáticas clave como radiación solar, nubosidad, temperatura y precipitación. Este análisis se llevó a cabo mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que no solo permiten procesar y analizar grandes volúmenes de datos, sino también visualizarlos de manera efectiva, facilitando la interpretación de cada variable.

Los datos climáticos fueron obtenidos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), a partir de las estaciones más cercanas al área de estudio. Posteriormente, se aplicaron métodos de interpolación espacial en *ArcGIS Pro* para generar superficies continuas de las variables analizadas. Para la nubosidad, se utilizó *kriging*, un método geoestadístico que optimiza la estimación de valores en función de la estructura espacial de los datos. n el caso de la precipitación, se empleó el método de *Inverse Distance Weighting* (IDW), el cual estima valores con base en la proximidad de los puntos de muestreo, asignando mayor peso a los más cercanos.

Figura 12.

Repositorio IDEAM

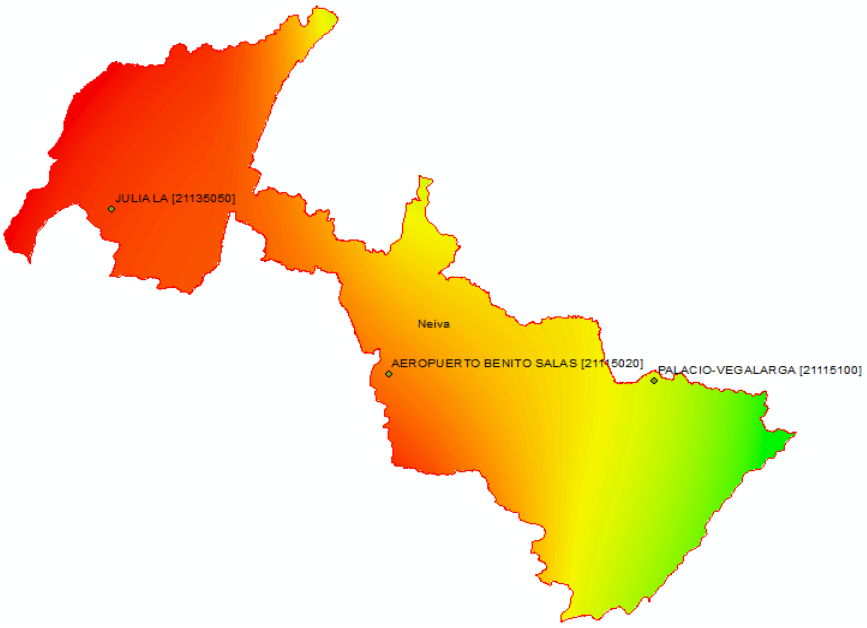


Nota. Página del repositorio oficial del IDEAM donde se tomó la información de las variables climáticas para el desarrollo de las salidas gráficas.

- **Nubosidad**

Figura 13.

Nubosidad Neiva



Nota. Salida grafica donde se visualiza el porcentaje de nubosidad del municipio de Neiva

Tomado de: elaboración propia a partir de datos del IDEAM.

De acuerdo con los datos de las estaciones del IDEAM para los años 2020 a 2024 (Aeropuerto Benito Salas, estación Julia La, y estación Palacio Vegalarga), revela una variabilidad espacial significativa en los niveles de nubosidad en la región. Los promedios obtenidos para cada una de las estaciones muestran que el noroeste de Neiva presenta los índices más altos de nubosidad, mientras que la estación Palacios Vegalarga, ubicada al noreste de la ciudad, registra índices bajos, sugiriendo condiciones más favorables para la radiación solar directa y con está beneficiando la instalación de paneles solares, por otro lado, la estación Aeropuerto Benito Salas, al norte de Neiva, reporta niveles medios a altos de nubosidad.

Estas distribuciones de nubosidad están influenciadas por la interacción entre el flujo de viento y la complicada orografía de la zona. Un factor clave es el efecto Föhn, que impacta de manera significativa las condiciones atmosféricas, derivando, la disponibilidad de radiación solar en Neiva. En las áreas de barlovento, donde el aire se eleva al encontrarse con las montañas, ocurre un enfriamiento adiabático que promueve la formación de nubes y precipitación, reduciendo la irradiancia efectiva y limitando el potencial de generación solar. Por otro lado, en las zonas de sotavento, el aire desciende, creando un medio más cálido y seco con menos nubosidad, lo que mejora las condiciones para la captación solar.

Considerando que Neiva se encuentra en una región que puede aprovechar los beneficios de las condiciones de sotavento, el análisis detallado de estas variaciones permite una planificación más precisa, optimizando el potencial solar disponible en el área y asegurando que las instalaciones solares se coloquen en ubicaciones con condiciones óptimas para la captación de radiación solar.

- **Precipitación**

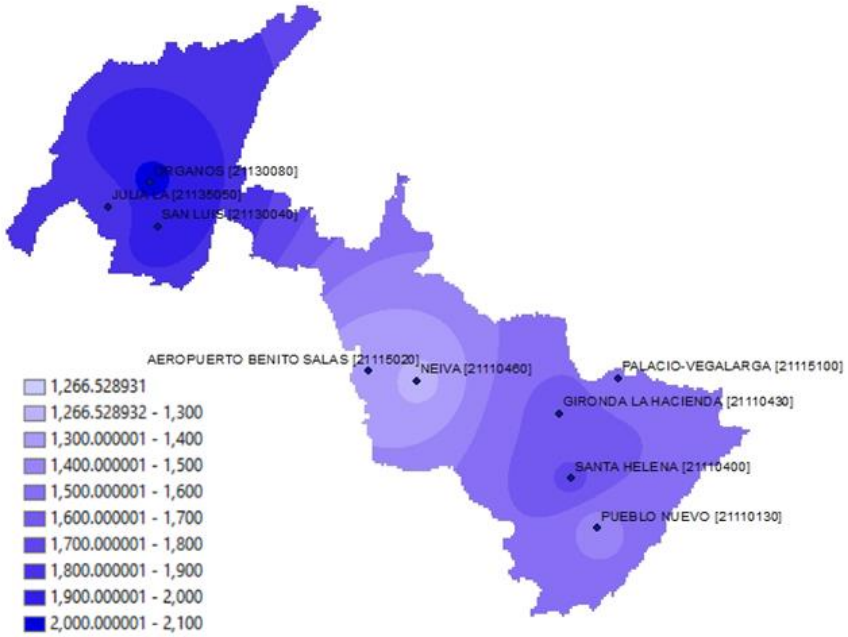
La precipitación es un fenómeno meteorológico que forma parte del ciclo del agua, es una condición necesaria para la vida y cumple importantes funciones en los ciclos naturales; en referencia a la producción de energía fotovoltaica la lluvia no afecta directamente la estructura física del panel solar, ya que estos están fabricados para resistir las condiciones adversas, estos pueden generar energía en menor medida, además los paneles están diseñados con materiales que favorecen el deslazamiento de las gotas de lluvia lo que facilita la limpieza de polvo y residuos, lo que puede aumentar la captación de la energía fotovoltaica, sin embargo las lluvias excesivas pueden contribuir a la afectación debido al incremento de la nubosidad y humedad relativa,

factores que afectan la eficiencia entre el 20 al 25% de la producción energética. (EDP Energía, 2023).

Para la elaboración del presente análisis, se tomaron datos de la plataforma del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), donde se seleccionaron las estaciones meteorológicas que contaban con la información histórica de la precipitación en el municipio, tomando datos a partir del año 2000 hasta el año anterior 2023, donde se procesaron los datos, cuyo análisis fue realizado con el método de interpolación espacial mediante la herramienta de ponderación inversa de la distancia (IDW), con ayudad ArcGIS Pro, lo que permitió identificar patrones geográficos de precipitación en el municipio, los cuales son insumos para la elaboración de un análisis de viabilidad instalación de proyecto fotovoltaicos.

Figura 14.

Precipitación histórica del municipio de Neiva.



Nota. Rangos de precipitación anual a partir del año 2000 hasta el 2023. Tomado de: Elaboración propia

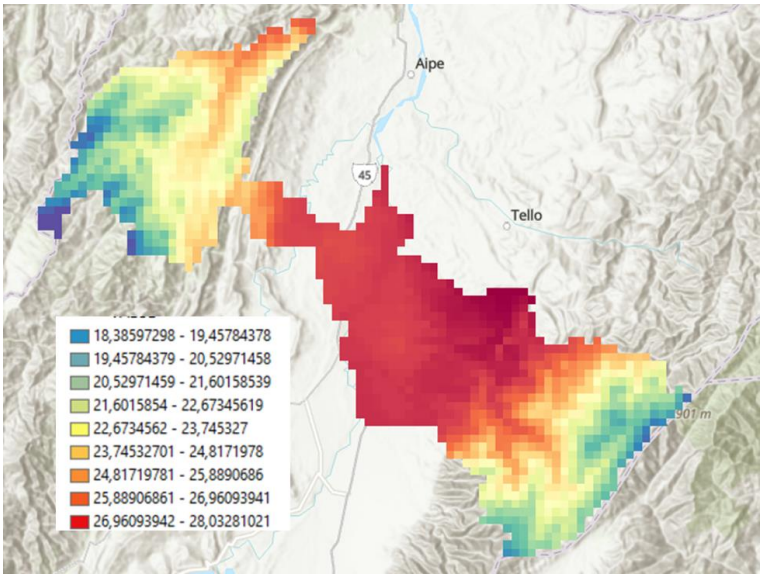
Para la elaboración del análisis de precipitación se tomaron 17 estaciones de las cuales 12 poseían información pluviométrica, se calculó el promedio histórico a partir de los valores máximos y mínimos cada estación, se fijaron 10 rangos de diferencia de 250 mm. Los resultados del análisis de los datos de precipitación histórica mostraron que las estaciones: órganos posee la mayor intensidad de precipitación anual promedio de 2036 mm año, seguida por las estaciones la Julia y san Luis ubicadas en el noroccidente del municipio, por otra parte, el centro y el sur del país presenta menores precipitación con valores que oscilan 1200 a los 1700, la estación con menor cantidad de precipitación fue la ubicada en centro poblado del municipio.

- **Temperatura**

La capa de temperatura (TEMP) se obtuvo en formato raster del Global Solar Atlas, presentando valores que varían desde menos de 20 °C hasta 28,5 °C en el municipio de Neiva. Esta capa proporciona una representación directa y homogénea de la distribución térmica en el área de estudio, facilitando el análisis de su impacto en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.

Figura 15.

Temperatura Neiva



Nota. Rangos de la temperatura anual del municipio de Neiva, Tomado de: Elaboración propia.

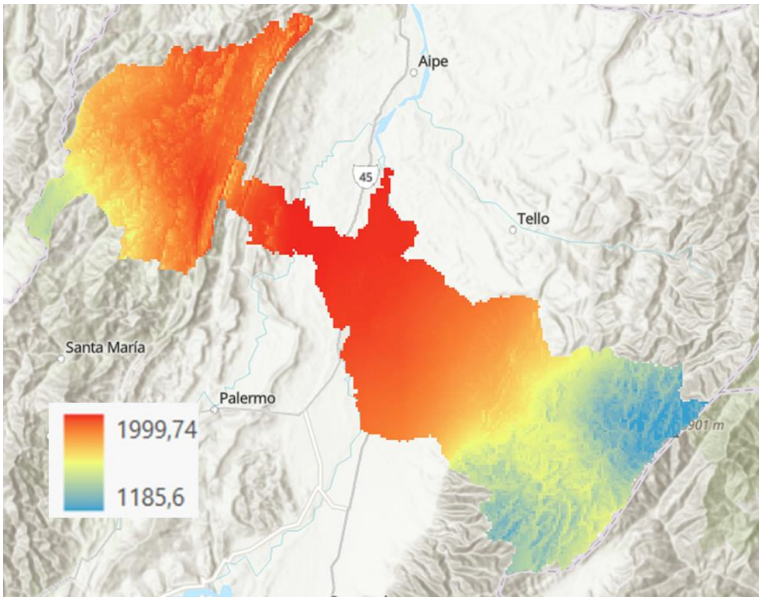
De acuerdo a (Herrera Galicia et al., 2023), la temperatura optima de un panle solar es de 20 a 25º c, no obstante despues de los 40ºc la eficiencia de un panel solar fotovoltaico disminuye aproximadamente entre 0.4 y 0.5%, por cada grado que aumenta la temperatura, por lo que es recomendable que la temperatura este templada, y contrario a lo que se piensa la nubosidad no llega afectar de manera significativa, puesto que las nubes no evitan que la radiacion llegue al panel solar. De acuerdo a los datos encontrados, se tendria que la mayoria del territorio mubicipal se encuentra en condiciones optimas para el funcionamiento de paneles solares, ya que a pesar de que se encuentran temperaturas menores a 20 esto no hace los paneles inviables sino solo menos eficientes, por otro lado todas las temperaturas estan por debajo de los 40º, evitando

que se tenga un riesgo por sobrecalentamiento en las placas, la mayoria del territorio estra entre los 20 y 25º c, lo que hace que las condiciones sean optimas.

- **Radiación Solar (GHI)**

Figura 16.

Radiación Solar



Nota. Rangos de radiación solar anual en el municipio de Neiva. Tomado de: Elaboración propia.

La capa de radiación solar (GHI) se obtuvo en formato raster del Global Solar Atlas y representa la irradiancia global horizontal en kWh/m². Esta capa cuantifica la cantidad de energía solar que incide sobre una superficie horizontal, lo que resulta esencial para evaluar el potencial solar del territorio. Los valores de esta capa oscilan entre 1185.6 y 1999.74 kW/m²/año, permitiendo identificar áreas con alta irradiación que se traducen en un mayor rendimiento y eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.

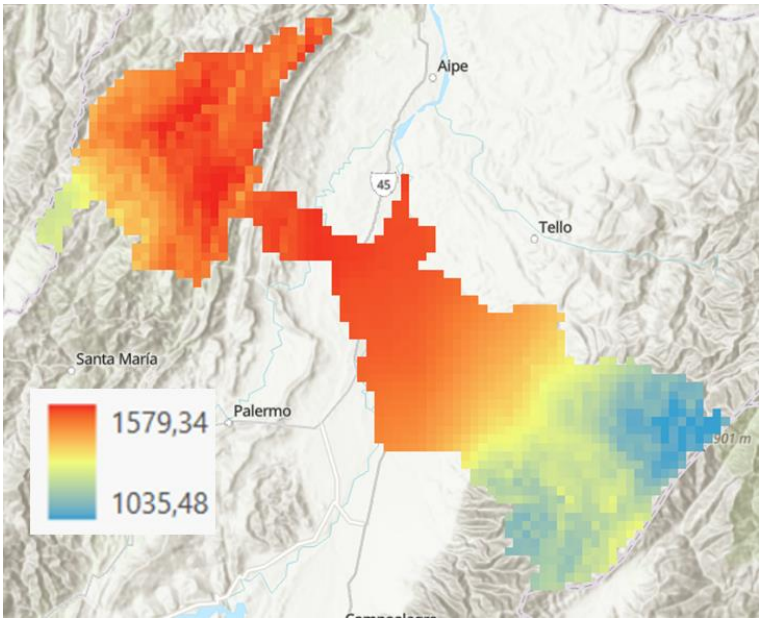
- **Producción Fotovoltaica (PVOUT)**

La capa de Producción Fotovoltaica (PVOUT) se obtuvo en formato raster del Global Solar Atlas y representa una estimación del potencial de generación fotovoltaica en función de la disponibilidad del recurso solar y las condiciones ambientales del área de estudio. Esta capa presenta valores que oscilan entre 1035.48 y 1579.34, lo cual indica la capacidad teórica de producción energética en distintos sectores del territorio.

La importancia de esta capa radica en su capacidad para identificar las áreas con mayor potencial productivo, permitiendo evaluar la viabilidad técnica y económica de la instalación de sistemas fotovoltaicos.

Figura 17.

Producción fotovoltaica



Nota. Desarrollo de salida grafica de producción fotovoltaica potencial. Tomado de: Elaboración propia.

7.3.2 Fase 2: Limpieza y Estandarización de Datos

Una vez reunida la información, se realiza la limpieza y estandarización de los datos. Este proceso comprende:

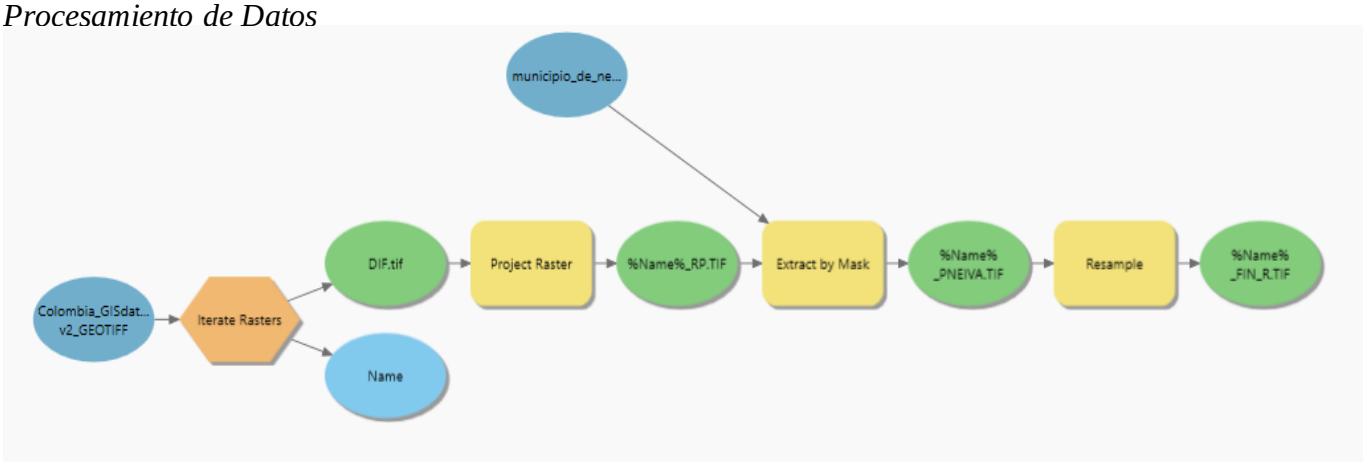
Extract by Mask: para recortar las capas raster de interés al área específica del municipio de Neiva.

Project Raster: para unificar el sistema de referencia espacial a Magna SIRGAS origen unico NACIONAL y así asegurar la coherencia geográfica de todas las capas.

Resampleo: para homogeneizar la resolución espacial de los datos (en este caso, 10×10 metros), garantizando la compatibilidad en la etapa de análisis.

Figura 18.

Procesamiento de Datos



Nota. Diagrama de procesos del desarrollo de salidas gráficas. Tomado de: Elaboración propia

7.3.3 Fase 3: Reclasificación y ponderación

En esta fase, cada capa ráster se reclasifica en tres categorías de aptitud: "No apto" (1), "Aceptable" (2) y "Óptimo" (3), según los umbrales establecidos para cada variable (por ejemplo, producción fotovoltaica, rangos de temperatura, pendiente del terreno, entre otros).

Posteriormente, se asignan pesos de importancia a cada variable de acuerdo con su influencia en la idoneidad del territorio para la instalación de paneles solares. Estos pesos se aplican conforme a la fórmula definida, en la que cada capa contribuye con un porcentaje específico a la generación de la capa final de idoneidad.

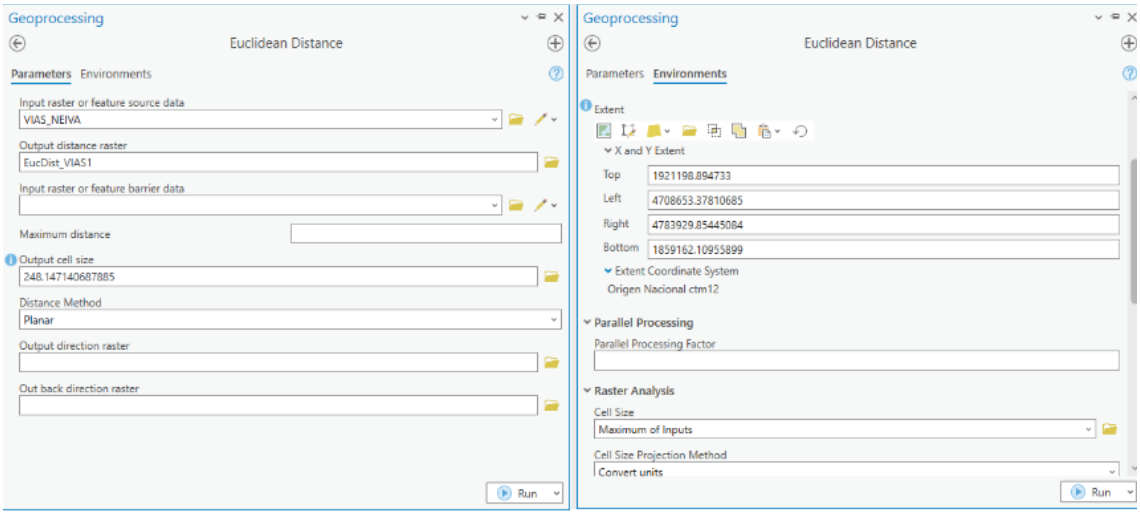
El resultado es un ráster con valores agregados que reflejan la aptitud relativa del territorio, facilitando la identificación de las áreas más adecuadas para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos.

- **Accesibilidad Vial**

La capa de accesibilidad vial se generó a partir de la red vial existente mediante el uso de herramientas de análisis espacial en ArcGIS Pro. Se empleó la función Distancia Euclidiana (Spatial Analyst), la cual calcula, para cada celda del ráster, la distancia más corta hasta la infraestructura vial más cercana.

Figura 19.

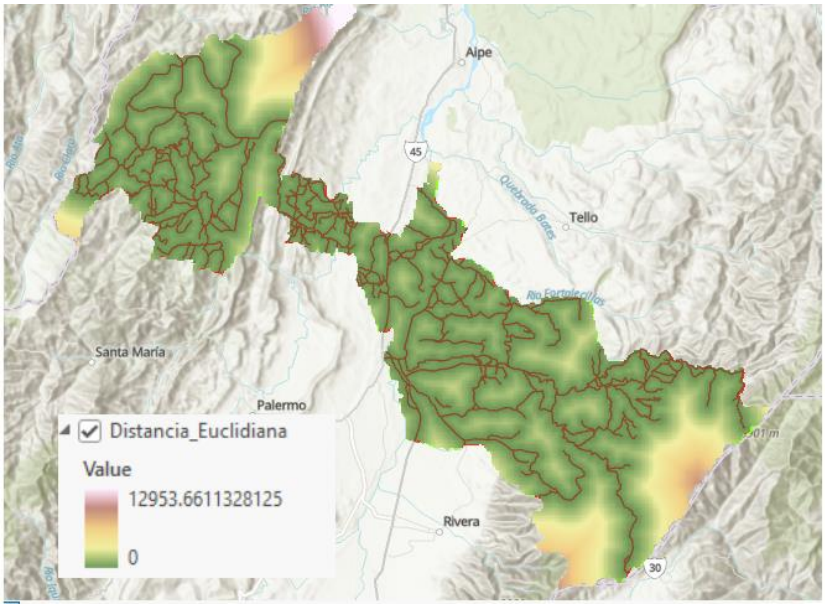
Geoprocesamiento de análisis espacial en ArcgisPro



Nota. uso de software GIS para el procesamiento de información geoespacial. Tomado de: Elaboración propia a partir del ArcgisPro.

Figura 20.

Vías del municipio de Neiva



Nota. Procesamiento de las vías por el método de distancia euclidiana con el software ArcgisPro. Tomado de: elaboración propia.

Una vez obtenida la superficie de distancias, se procedió a reclasificar los valores según los siguientes rangos:

Tabla 1.

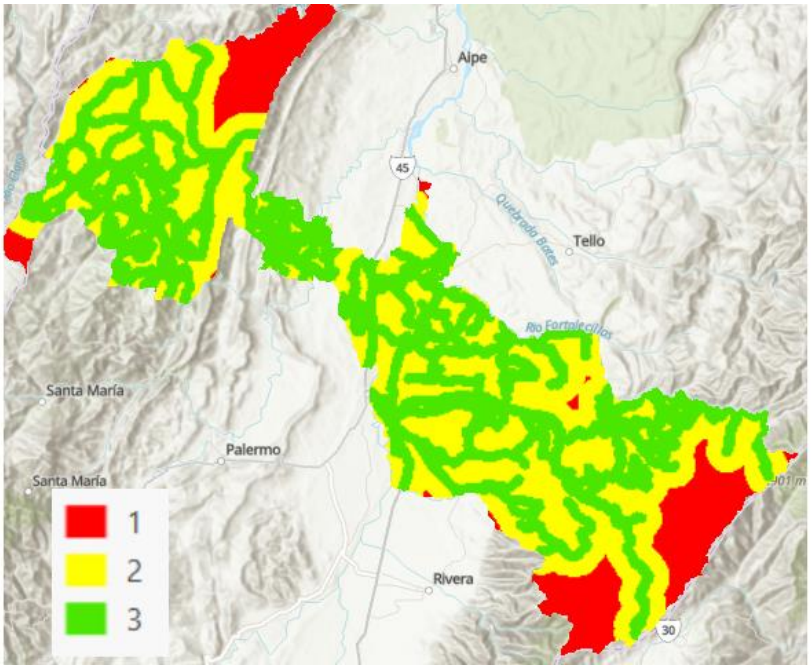
Rangos de proximidad a la red vial

Proximidad a la red vial (m)	Valor	Tipo de Ubicación
0 – 500	3	Óptimo
501 – 2000	2	Aceptable
> 2001	1	No apto

Una vez realizada la reclasificación, se generó el siguiente mapa de accesibilidad vial, en el cual se visualizan las áreas clasificadas según su proximidad a la red vial existente.

Figura 21.

Reclasificación de accesibilidad vial



Nota. Salida grafica de las zonas optimas referentes a la distancia en torno a la accesibilidad vial. Tomado de: Elaboración propia

La proximidad a la infraestructura vial es crucial para la logística (transporte, construcción y mantenimiento); sin embargo, su influencia en la eficiencia energética es indirecta, por lo que se asigna un peso de **5 %**.

- **Producción Fotovoltaica (PVOUT)**

Describe la producción fotovoltaica estimada en kWh/año, base fundamental para determinar la viabilidad energética de cada área.

Se procedió a reclasificar los valores según los siguientes rangos:

Tabla 2.

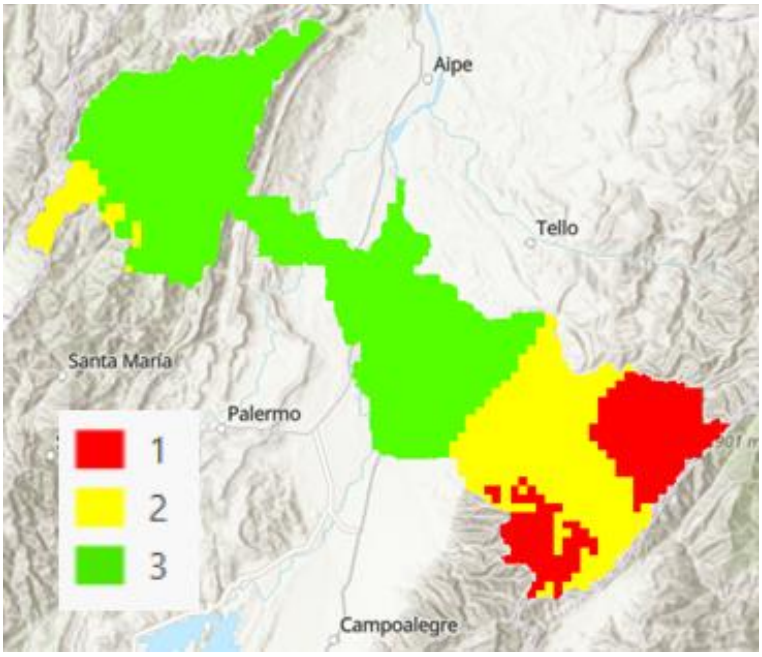
Producción Fotovoltaica kWh/año

Producción Fotovoltaica kWh/año	**Valor**	**Tipo de Ubicación**
> 1400	3	Óptimo
1200 – 1400	2	Aceptable
< 1200	1	No apto

Tras completar la reclasificación, se generó un mapa de producción fotovoltaica que muestra la distribución espacial de las áreas según su potencial de generación en kWh/año. En este mapa, las zonas se categorizan en función de su idoneidad para la producción de energía solar, permitiendo identificar visualmente las áreas óptimas, aceptables y no aptas para la instalación de paneles fotovoltaicos.

Figura 22.

Reclasificación de áreas con potencial energético



Nota. Salida grafica donde se observa el rango de áreas con potencial para la producción de energía fotovoltaica. Tomado de: Elaboración propia.

Es la variable más crítica, ya que determina directamente la cantidad de energía que se puede generar en el sitio. Un mayor potencial de producción se traduce en una mayor rentabilidad y eficiencia del proyecto por lo que se le asigna un ponderado de **35 %**.

- **Temperatura Reclasificada (TEMP)**

Se estableció el rango óptimo de 20–25 °C para maximizar la eficiencia de los paneles solares. Según Sunfields Europe, temperaturas inferiores a 20 °C limitan la producción energética, y aunque los módulos pueden soportar altas temperaturas, su eficiencia disminuye a razón de -0.4% a 0.65% cuando se aumenta su temperatura por encima de 25 °C.

Tabla 3.

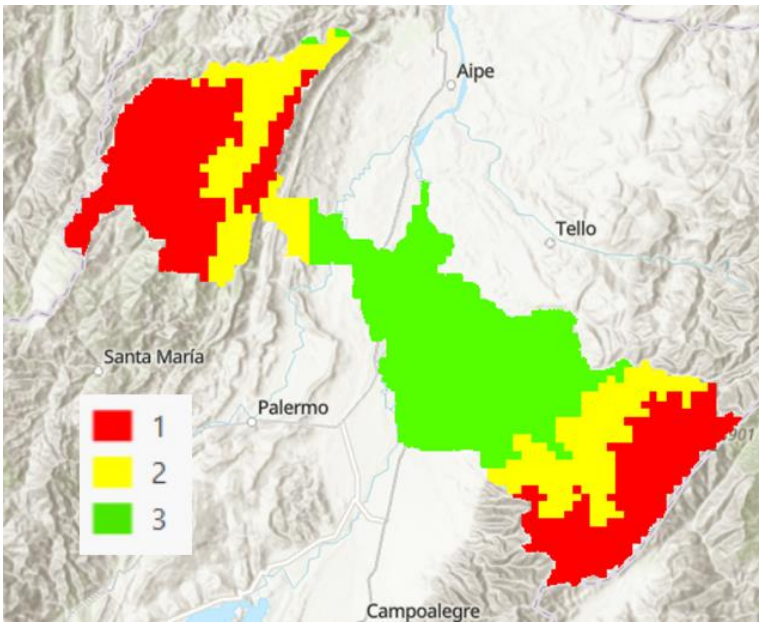
Temperatura Reclasificada (TEMP)

Temperatura (°C)	Valor	Tipo de Ubicación
20 – 25	3	Óptimo
26 - 30	2	Aceptable
< 20	1	No apto

Tras completar la reclasificación, se generó un mapa de temperatura que representa la distribución espacial de las áreas según sus calores térmicos. Se identificó que el intervalo de 20 – 25 °C corresponde a las zonas más optimas, ya que estas condiciones favorecen el rendimiento eficiente de los paneles solares al minimizar perdidas térmicas y garantizar una conversión energética estable.

Figura 23.

Mapa de temperatura



Nota. Reclasificación de área optimas de acuerdo a la temperatura. Tomado de: Elaboración propia

La temperatura influye en el rendimiento de los paneles fotovoltaicos, ya que temperaturas extremas pueden reducir su eficiencia. Se le asigna un peso moderado de **15 %**, equilibrando su impacto con otras variables.

- **Radiación Solar (GHI)**

La irradiancia global horizontal (Global Horizontal Irradiance - GHI) es un factor clave en la generación de energía fotovoltaica, ya que determina la cantidad de radiación solar disponible en una superficie horizontal.

Para la clasificación de esta variable, se tomó como referencia la información disponible en Energypedia (SPIS Toolbox - Solar Irradiation - Energypedia), que establece que valores superiores a 1400 kWh/m²/año son favorables para la producción fotovoltaica. Sin embargo, considerando que en el municipio de Neiva los valores registrados comienzan en 1185 kWh/m²/año, se definió 1400 kWh/m²/año como el umbral mínimo dentro de la categoría "aceptable".

Por otro lado, se estableció la categoría "óptimo" para aquellas áreas con irradiancias superiores a 1700 kWh/m²/año, ya que estos niveles favorecen un mayor rendimiento y eficiencia en la generación de energía solar, reduciendo la necesidad de ajustes en la inclinación y orientación de los paneles.

Tabla 4.

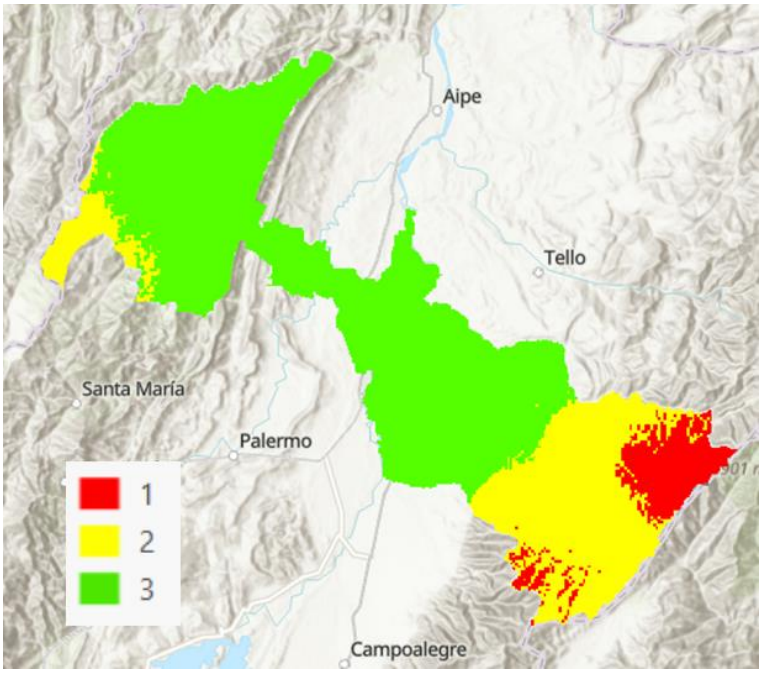
Radiación solar (kW/m²/Año)

Radiación solar (kW/m²/Año)	Valor	Tipo de Ubicación
> 1700	3	Óptimo
1400 – 1700	2	Aceptable
< 1400	1	No apto

Una vez completada la reclasificación con los valores asignados, se generó el mapa de radiación solar GHI, donde las áreas se categorizan en tres niveles: 1 (Óptimo), 2 (Aceptable) y 3 (No apto). Este mapa permite visualizar de manera clara la distribución espacial de la irradiancia en el municipio, facilitando la identificación de las zonas con mayor potencial para la generación de energía fotovoltaica.

Figura 24.

Mapa de radiación solar



Nota. Reclasificación donde se observan el mapa de radiación solar. Tomado de: Elaboración propia.

Este factor indica la cantidad de energía solar que incide en el área, afectando directamente el rendimiento de los paneles. Su peso elevado refleja la importancia de contar con una fuente energética abundante por lo que se le asigna un ponderado del **25 %**.

- **Nubosidad**

La nubosidad es un factor determinante en la disponibilidad de radiación solar, ya que afecta directamente la irradiancia efectiva sobre la superficie terrestre. En este análisis, se considera que índices elevados de nubosidad reducen significativamente la eficiencia de generación fotovoltaica, al disminuir la cantidad de radiación solar que alcanza los paneles.

Sin embargo, valores moderados de nubosidad no necesariamente comprometen la producción de energía de manera crítica, ya que la radiación difusa aún puede contribuir a la generación solar. Por esta razón, la reclasificación de esta variable distingue entre zonas con nubosidad baja (óptimas para la generación fotovoltaica), nubosidad moderada (aceptable) y nubosidad alta (no apta), asegurando un análisis más preciso en la identificación de áreas viables para la instalación de paneles solares, los datos de nubosidad suelen medirse en octas (octavos del cielo cubierto) o términos descriptivos, como se puede ver a continuación:

Tabla 5. *Rangos de Nubosidad*

Rango	**Nubosidad (octas)**
0 - 1	Despejado
1 – 2	Mayormente despejado
2 – 3	Parcialmente nublado
4 - 7	Mayormente cubierto
8	Nublado completamente

De acuerdo a los datos registrados en las estaciones del IDEAM en el municipio en su mayoría se registran datos de 0 a 3, por lo cual se realizó la reclasificación definiendo la nubosidad entre 0 -1 como optimas y dándoles un valor de 3, puesto que son zonas que en su mayoría tienen un cielo despejado, así mismo para valores de nubosidad entre 1 – 2 se establecieron como zonas aceptables, puesto que corresponden a zonas mayormente despejadas y por último los valores de nubosidad de 2 – 3 son aquellas zonas parcialmente nubladas y se les da un valor de 1 siendo no aptas.

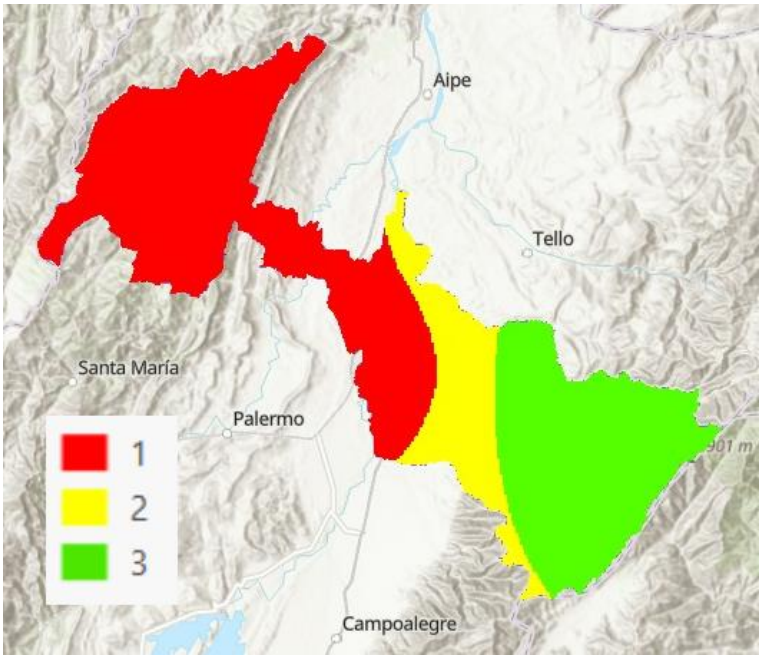
Tabla 6. *Reclasificación de nubosidad*

Nubosidad (Octas)	**Valor**	**Tipo de Ubicación**
0 - 1	3	Óptimo
1 – 2	2	Aceptable
2 – 3	1	No apto

Después de realizar la reclasificación, se observa una distribución diferenciada de la nubosidad en el municipio, se resalta que en los datos obtenidos solo se registraron datos de 1, 2 y 3 octas, lo que hace que Neiva tenga en su mayoría una nubosidad óptima para el uso de paneles solares y en menor medida nubes aceptables, no obstante, al tener condiciones adecuadas para su uso la nubosidad no es un factor de gran influencia. De acuerdo con los resultados, al oeste, los niveles de nubosidad son más altos, lo que podría afectar la generación de energía solar, mientras que, al este, la nubosidad es menor, favoreciendo una mayor disponibilidad de irradiancia. Esta distribución se refleja en el siguiente mapa, donde se clasifican las áreas según su nivel de nubosidad y su impacto en la viabilidad de proyectos fotovoltaicos.

Figura 25.

Mapa de nubosidad



Nota. Reclasificación de parámetros de nubosidad donde se observa la diferenciación de las áreas aptas. Tomado de: Elaboración propia.

La presencia de nubes afecta la cantidad de radiación solar directa. Aunque importante, su efecto es relativamente menor comparado con la irradiancia directa, por consiguiente, se le asigna un peso del **10 %**.

- **Precipitación**

La precipitación influye directamente en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, ya que niveles excesivos pueden incrementar la nubosidad y la humedad, reduciendo la radiación efectiva. Sin embargo, una cantidad moderada de lluvia puede ser beneficiosa al limpiar los paneles y mejorar su rendimiento. Por esta razón, la clasificación de esta variable debe equilibrar

ambos efectos, asegurando que las zonas identificadas como óptimas favorezcan la generación solar sin verse afectadas por condiciones climáticas adversas.

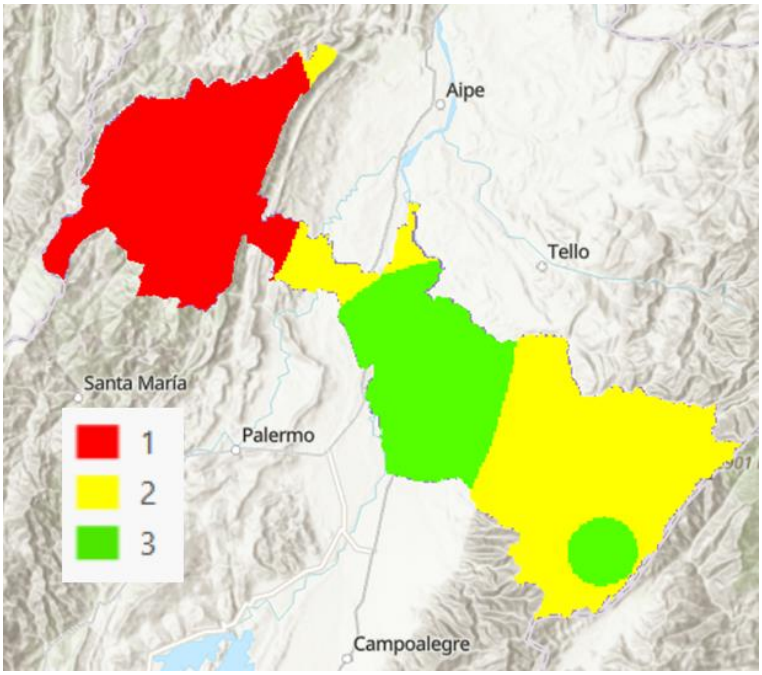
Tabla 7. *Precipitación*

Precipitación (mm)	Valor	Tipo de Ubicación
1266-1400	3	Óptimo
1400-1600	2	Aceptable
1600-2100	1	No apto

El mapa presentado a continuación evidencia una mayor intensidad de precipitación en el oeste del municipio, mientras que en el este los niveles son moderados. En la zona central, las condiciones son óptimas, ya que la precipitación es menor y no representa una limitación significativa para la generación fotovoltaica.

Figura 26.

Mapa de precipitación



Nota. Reclasificación de la precipitación donde se observan las zonas optas. Tomado de: Elaboración propia.

La precipitación puede afectar las condiciones ambientales y los costos de mantenimiento, pero su impacto es menor frente a los factores directamente relacionados con la captación de energía solar por lo que se le asigna un ponderado del 5 %.

- **Pendiente Reclasificada (Slope)**

La pendiente del terreno es un factor clave en la viabilidad de los proyectos fotovoltaicos, ya que afecta tanto la estabilidad estructural como la eficiencia en la instalación de los paneles. Pendientes moderadas pueden ser manejables con ajustes en la cimentación, mientras que inclinaciones más pronunciadas pueden representar desafíos técnicos y costos adicionales.

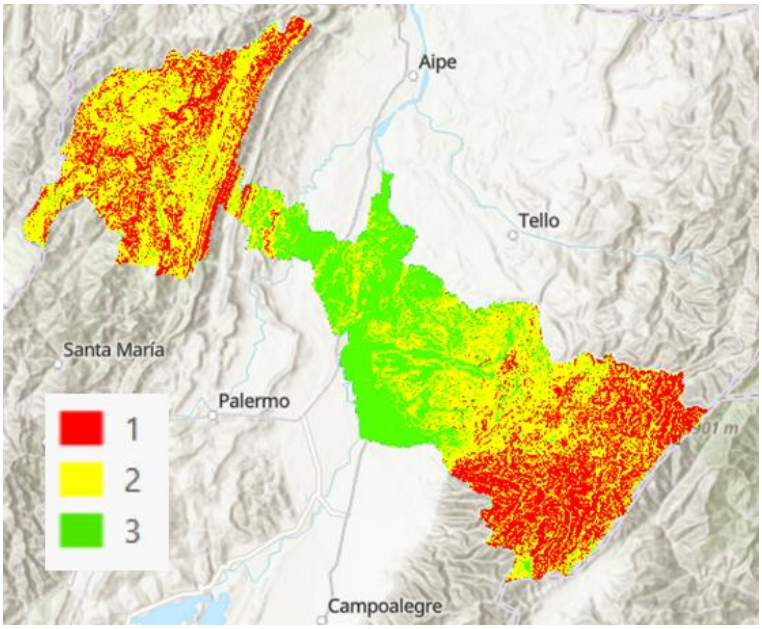
Tabla 8. *Pendiente reclasificada*

Pendiente (%)	Valor	Tipo de Ubicación
0 - 7	3	Óptimo
7-25	2	Aceptable
> 25	1	No apto

El siguiente mapa muestra la reclasificación de las pendientes en el área de estudio. En el centro del municipio predominan terrenos con una inclinación menor al 7%, lo que los hace ideales para la instalación de granjas solares. Hacia los costados, el terreno se vuelve más irregular, con pendientes mayores, lo que podría dificultar la implementación de infraestructura fotovoltaica.

Figura 27.

Mapa de pendientes



Nota. Reclasificación de las de áreas con diversos tipos de pendiente donde se observan las zonas aptas.

La inclinación del terreno influye en la instalación y el costo de la infraestructura. Se le asigna un peso bajo ya que, aunque relevante, las dificultades topográficas pueden mitigarse mediante técnicas de construcción adecuadas por lo que se le asigna un valor del **5%**.

Como resultado del análisis, se obtuvo la ponderación final de cada capa, la cual se presenta en la siguiente tabla. Estos valores reflejan la importancia relativa de cada variable en la determinación de las áreas más aptas para la instalación de proyectos fotovoltaicos.

Tabla 9. *Porcentajes por capa*

CAPA	%
PRODUCCIÓN FOTOVOLTAICA	35
TEMPERATURA RECLASIFICADA	15
RADIACIÓN SOLAR	25
NUBOSIDAD	10
ACCESIBILIDAD VIAL	5
PRECIPITACIÓN	5
PENDIENTE RECLASIFICADO	5
Total	100

7.3.4 Fase 4: Integración y delimitación final

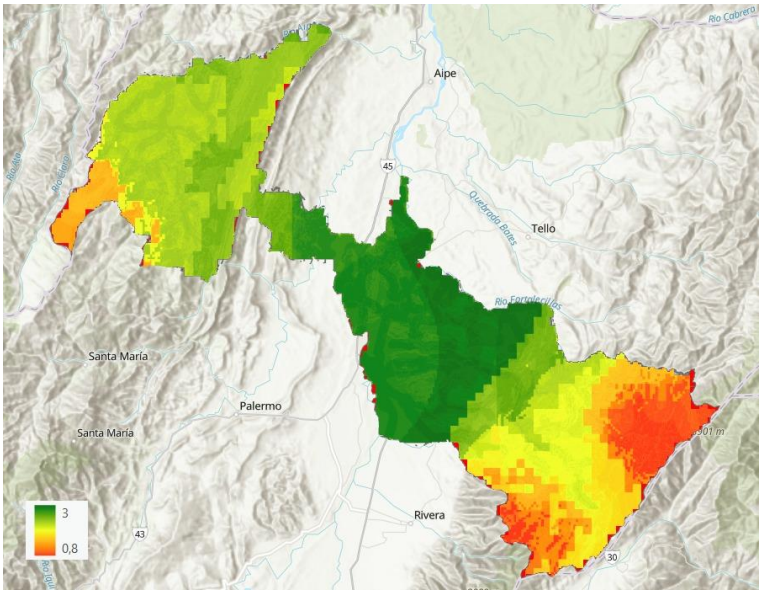
En esta fase, se integraron las siete capas ponderadas utilizando la herramienta *Raster Calculator* en ArcGIS Pro. A través de este análisis multicriterio, se aplicó la siguiente fórmula:

("PVOUT_RP_F_RPRS_F.TIF" * 0.35) + ("TEMP_RP_F_RPRS_F.TIF" * 0.10) + ("GHI_RP_F_RPRS_F.TIF" * 0.25) + ("Nubosidad_10pixeles_RP_F_RPRS_F.TIF" * 0.10) + ("Accesibilidad_vial_RPRS_F.TIF" * 0.05) + ("Precipitacion_reclasificada_RP_F_RPRS_F.TIF" * 0.05) + ("Slope_reclasificado_RPRS_F.TIF" * 0.05) + ("Humedad_reclasificada_RPRS_F.TIF" * 0.05)

Como resultado, se generó un mapa que muestra los valores obtenidos del análisis raster, con un rango de 0.8 a 3, donde 0.8 representa las áreas menos óptimas y 3 las más favorables para la instalación de proyectos fotovoltaicos.

Figura 28.

Áreas óptimas para la instalación de paneles solares



Nota. Salida grafica con donde se observan las zonas con mayor afinidad a la instalación de paneles solares. Tomado de: Elaboración Propia

Posteriormente se realizó una reclasificación para proporcionar un marco más claro y práctico para la selección de áreas. Los valores obtenidos del análisis raster inicial (0.8 a 3) reflejan el grado de factibilidad acumulado, considerando todas las capas y ponderaciones aplicadas. Sin embargo, al aplicar estos rangos más específicos, se garantizó un análisis más riguroso que ayuda a identificar con precisión las áreas más viables para la implementación del proyecto.

Una vez obtenida la capa de idoneidad, se procedió a su reclasificación en tres categorías:

1. No Apto: Zonas con valores acumulados bajos, derivados de condiciones desfavorables (por ejemplo, escasa radiación, elevada nubosidad y pendientes pronunciadas).

2. Aceptable: Áreas con condiciones moderadamente favorables, aunque presenten restricciones parciales (como temperaturas fuera del rango ideal o mayor distancia a la red vial).
3. Óptimo: Terrenos que reúnen altos niveles de producción fotovoltaica (PVOUT), irradiancia (GHI) y condiciones ambientales idóneas (baja pendiente, temperatura entre 20–25 °C y nubosidad moderada).

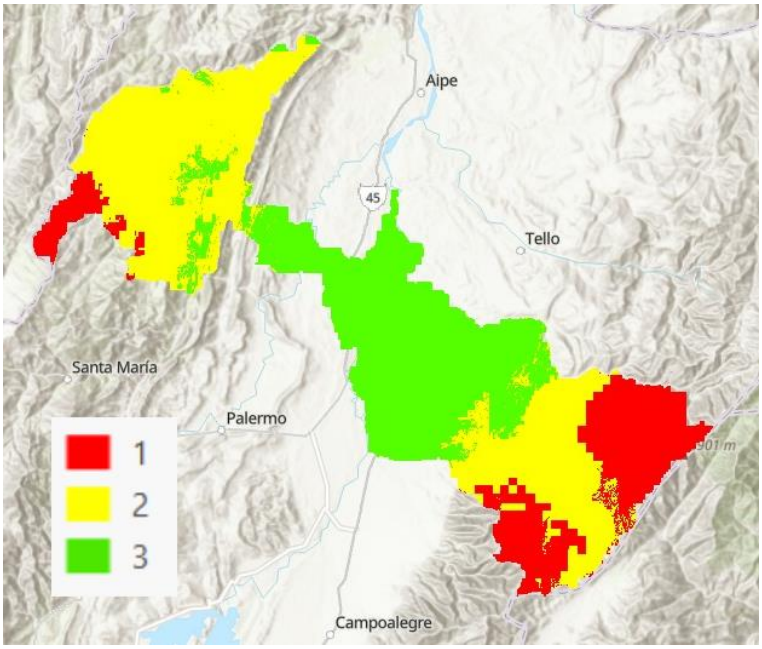
Tabla 10. *Reclasificación por pendiente*

Pendiente (%)	**Valor**	**Tipo de Ubicación**
2.5 - 3	3	Óptimo
1.9 – 2.5	2	Aceptable
0.8 – 1.9	1	No apto

Tras la reclasificación, se identificaron y mapearon las áreas óptimas, aceptables y no aptas para la instalación de paneles solares en el municipio de Neiva, permitiendo una visualización clara de las zonas con mayor potencial para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos.

Figura 29.

Mapa de las áreas óptimas para la producción de energía fotovoltaica

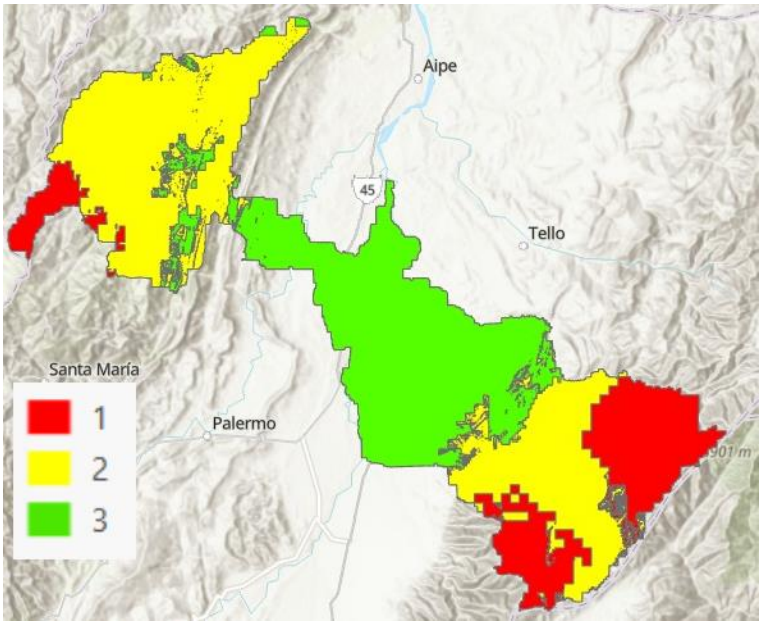


Nota. Diferenciación del grado de aptitud para la instalación de paneles solares. Tomado de: Elaboración propia.

El ráster obtenido en la fase anterior se convirtió a formato vectorial con el objetivo de facilitar su integración con otras capas vectoriales que, si bien no fueron ponderadas en el análisis, desempeñan un papel clave al restringir o modificar la aptitud del territorio para la instalación de proyectos fotovoltaicos. Esta conversión permite una mejor interacción con elementos geoespaciales adicionales y facilita la toma de decisiones en el proceso de delimitación final.

Figura 30.

Mapa de las áreas óptimas para la producción de energía fotovoltaica formato vectorial



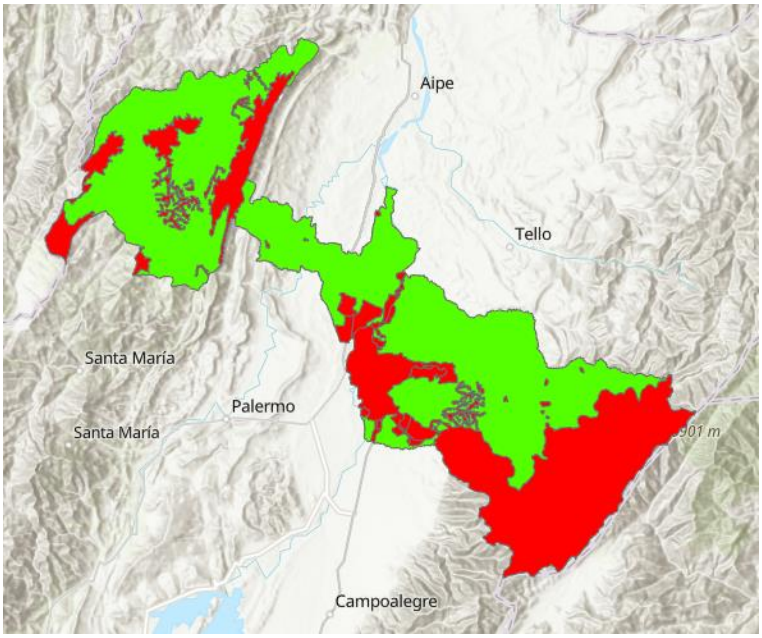
Nota. Diferenciación del grado de aptitud para la instalación de paneles solares. Tomado de: Elaboración propia.

Se incorporaron capas adicionales para refinar la delimitación de las áreas aptas para la instalación de paneles solares:

- **Clasificación territorial**: Se priorizó la zona rural como el único sector potencialmente apto, excluyendo áreas urbanas, industriales y otras categorías de uso del suelo.

Figura 31.

Mapa de las áreas óptimas para la producción de energía fotovoltaica respecto al uso del suelo

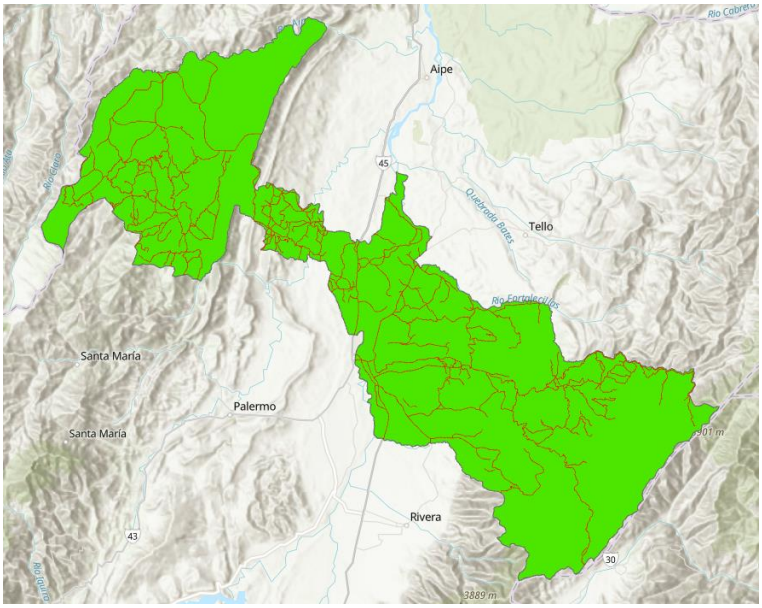


Nota. Zonas óptimas para instalación de paneles solares respecto al uso del suelo. Tomado de: Elaboración propia.

- **Buffer Vial**: Se aplicó un buffer de 30 metros a la capa de vías para identificar y excluir las áreas en las inmediaciones de la infraestructura vial. Estas zonas, consideradas críticas para la servidumbre y el mantenimiento de la red de transporte, se marcaron como "no aptas" para la instalación de paneles solares.

Figura 32.

Mapa de restricción de acuerdo con la ocupación de la red vial

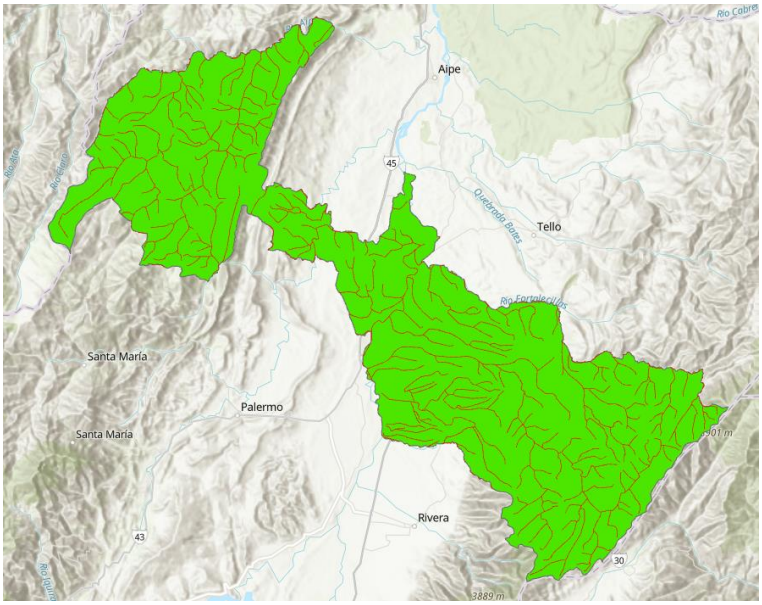


Nota. Geo proceso de buffer para descartar las zonas ocupadas por la red vial. Tomado de: Elaboración propia.

- **Buffer de Hidrografía:** De manera similar, se generó un buffer de 30 metros alrededor de los cuerpos de agua, a fin de delimitar las zonas de protección ambiental. Las áreas incluidas dentro de este buffer se excluyeron del análisis, asegurando el cumplimiento de la normativa ambiental y la preservación de los recursos hídricos.

Figura 33.

Mapa de restricción de área respecto a la hidrografía del municipio



Nota. Geo proceso de buffer para descartar las zonas ocupadas por la hidrografía del municipio. Tomado de: Elaboración propia.

El resultado final de esta fase es un conjunto de polígonos que delimitan las zonas óptimas para la instalación de paneles solares. Estas áreas fueron definidas a partir de la integración de la ponderación de variables ambientales con las restricciones territoriales e infraestructurales, asegurando así una selección precisa y adecuada del territorio.

8. Resultados

Para determinar las áreas más adecuadas para la instalación de paneles solares en Neiva, se emplearon 10 capas geoespaciales que abarcan variables ambientales, de infraestructura y criterios de exclusión. Siete de estas capas (PVOUT, Temperatura, GHI, Nubosidad, Accesibilidad Vial, Precipitación y Pendiente) se integraron en un modelo de suma ponderada para calcular la idoneidad del territorio. Por otro lado, tres capas (Clasificación Territorial, Buffer de Vías y Buffer de Hidrografía) se utilizaron como restricciones, con el fin de descartar zonas que no cumplan con los requisitos legales o ambientales.

Posteriormente, se superpusieron las capas de Clasificación Territorial, Buffer de Vías y Buffer de Hidrografía para excluir aquellas áreas que, por restricciones legales y ambientales, no resultan aptas para la instalación de paneles solares. De esta forma, las zonas clasificadas como "Óptimo" se limitaron a aquellas que, además de cumplir con los requisitos biofísicos y climáticos, se encuentran fuera de las zonas protegidas y pertenecen a la zona rural del municipio.

Finalmente, se realizó un cruce con las veredas de Neiva, lo que permitió identificar y cuantificar la extensión de las áreas aptas según cada división. Este análisis desagregado facilita la interpretación y orientación para la planificación de proyectos, ya que se determina la distribución de la superficie apta (en hectáreas) por vereda. La siguiente tabla resume la distribución final de las áreas:

Tabla 11.

Distribución de áreas clasificadas por nivel de factibilidad

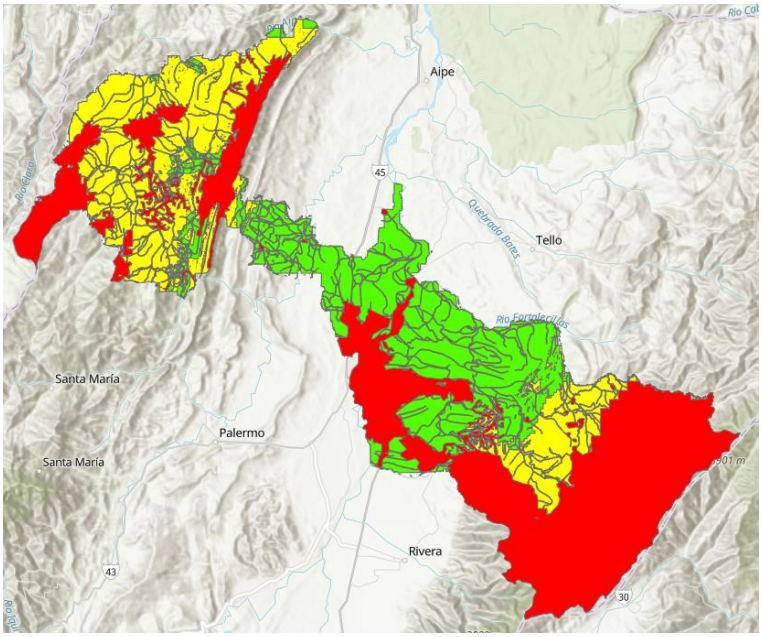
Área (Ha)	Valor	Tipo de Ubicación
31576	1	Óptimo
31894	2	Aceptable
61563	3	No apto

8.1 Ubicación Óptima

El modelo final permitió identificar las áreas más adecuadas para la instalación de paneles solares en Neiva. Estas áreas se concentran principalmente en terrenos rurales planos o ligeramente inclinados, con buena accesibilidad vial, temperaturas favorables (20 a 25 °C), y niveles altos de radiación solar. Las zonas no factibles incluyen áreas urbanas, zonas de protección, zonas con alta pendiente y regiones afectadas por canales o condiciones climáticas adversas.

Figura 34.

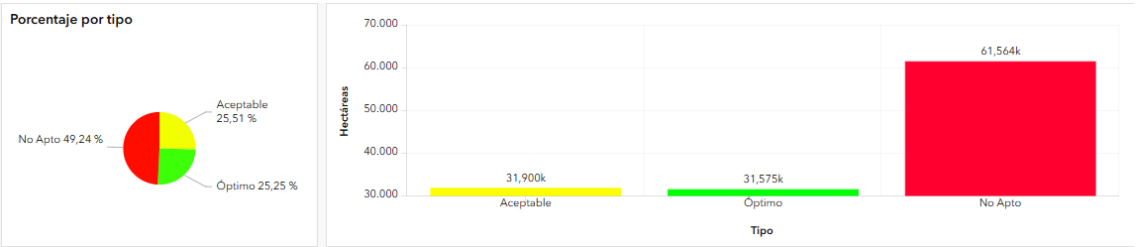
Mapa final de las áreas óptimas para la instalación de paneles solares en Neiva, Huila



Nota. Salida grafica que contiene la versión final de la ubicación de las áreas óptimas para instalación de paneles solares. Tomado de: Elaboración propia.

Figura 35.

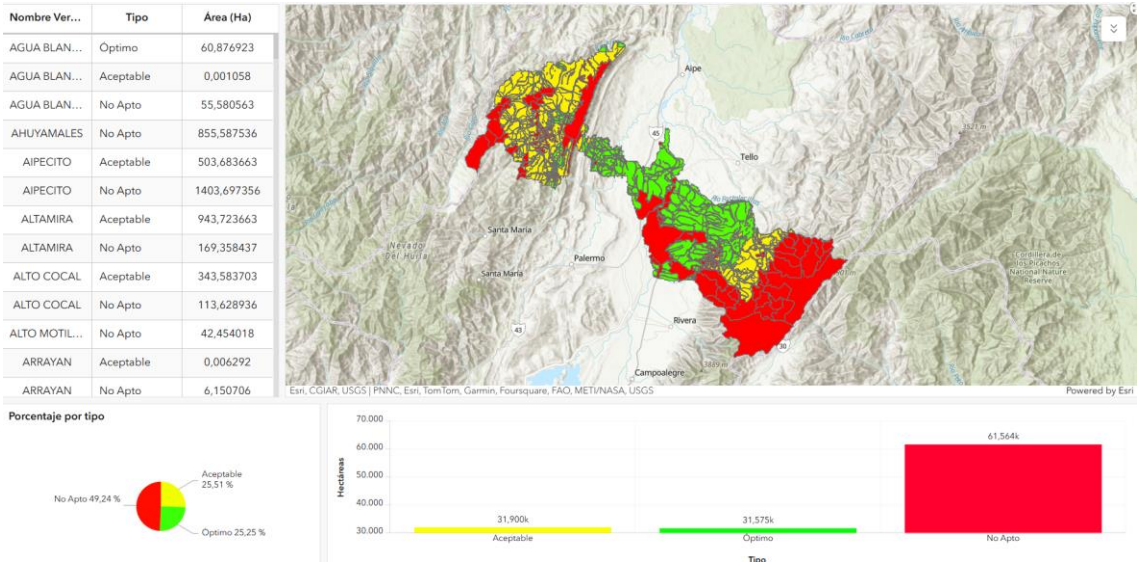
Grafica del área total del municipio de acuerdo con la aptitud del suelo



Nota. Las gráficas muestran el área total del municipio respecto a la aptitud. Tomado de: Elaboración propia.

Figura 36.

Mapa de las áreas óptimas para la producción de energía fotovoltaica respecto a su distribución política



Nota. Salida grafica que contiene la información de las veredas y corregimientos de las áreas óptimas para instalación de paneles solares. Tomado de: Elaboración propia.

Se diseñó un dashboard utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), el cual está disponible en el siguiente enlace:

INSTALACIÓN ÓPTIMA PANELES SOLARES - NEIVA

9. Conclusiones

1. El presente estudio logró identificar de manera precisa las áreas óptimas para la instalación de paneles solares en el municipio de Neiva, Huila, mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Este enfoque permitió integrar y analizar diversas variables físicas, atmosféricas y de infraestructura que inciden directamente en la viabilidad de los proyectos fotovoltaicos. Herramientas como el análisis de pendiente, la clasificación territorial, los modelos de radiación solar y los métodos de interpolación espacial fueron fundamentales para establecer un modelo robusto que prioriza las zonas con mayor potencial. Como resultado, se determinó que el 25.25% del territorio estudiado es óptimo para la instalación de paneles solares, mientras que el 25.51% se clasifica como medianamente factible y el 49.24% resulta no apto. Estos hallazgos subrayan la importancia de llevar a cabo un análisis riguroso antes de realizar inversiones en áreas desfavorables.
2. El uso de SIG se ha demostrado como una herramienta esencial para realizar análisis geoespaciales confiables y detallados. La capacidad de integrar múltiples fuentes de datos y realizar evaluaciones multicriterio posibilita la elaboración de estudios de pre factibilidad precisos, lo que respalda la planificación y el desarrollo de proyectos de energía renovable sin afectar negativamente los recursos naturales. Este enfoque no solo optimiza la selección de áreas aptas, sino que también respalda el avance de nuevas tecnologías que contribuyen al desarrollo socioeconómico sostenible.
3. Se cumplió con el objetivo de desarrollar un mapa de ubicación óptima para paneles solares en Neiva – Huila, integrando las condiciones analizadas

previamente mediante SIG. El producto final se presentó a través de una interfaz de dashboard que cruza la información obtenida con la delimitación de las veredas del municipio, permitiendo identificar y cuantificar la extensión de las áreas aptas (en hectáreas) por división territorial. Este análisis desagregado facilita la interpretación y proporciona una herramienta de gran utilidad para la planificación de futuros proyectos fotovoltaicos, garantizando que las decisiones se basen en datos precisos y contextualizados.

4. La metodología aplicada en este estudio resalta el potencial de Neiva para desempeñar un papel crucial en la transición hacia fuentes de energía renovable. Al identificar de manera precisa las zonas óptimas para la instalación de paneles solares, se sientan las bases para la implementación de proyectos que contribuyan a una matriz energética más limpia y sostenible. Además, la aplicación de esta metodología puede ser replicada en otros territorios con características similares, impulsando el desarrollo de tecnologías limpias y respaldando el avance socioeconómico sin comprometer el medio ambiente.

10.Recomendaciones

1. Se recomienda realizar un análisis exhaustivo de la nubosidad tanto estacional como diaria, teniendo en cuenta los patrones climáticos locales. Es importante evaluar la orientación y altitud del terreno en relación con las formaciones montañosas cercanas, ya que las áreas en sotavento suelen experimentar menores niveles de nubosidad y, por ende, una mayor irradiancia. Asimismo, se sugiere llevar a cabo mediciones in situ de radiación solar y nubosidad, especialmente durante los periodos de mayor variabilidad climática, para ajustar de manera óptima la ubicación y orientación de los paneles solares.
2. La planificación de futuros proyectos de instalación de paneles solares debe incluir un análisis detallado de la red eléctrica. La disponibilidad de información precisa sobre la infraestructura eléctrica como ubicaciones exactas, capacidad y alcance es fundamental para el diseño eficiente y estratégico de la instalación. La limitada cantidad de datos sobre la red eléctrica detectada en este estudio destaca la necesidad de mejorar la recopilación y el acceso a dicha información para apoyar la planificación energética sostenible.
3. Se recomienda emplear modelos de elevación y otros datos raster con una resolución espacial más alta, ya que el tamaño del píxel influye directamente en la precisión y el nivel de detalle del análisis. Una resolución más fina permitirá capturar con exactitud las variaciones locales en las pendientes y otras variables, lo que mejora significativamente la identificación de las áreas óptimas para la instalación de paneles solares. Además, contar con datos de mayor precisión facilita clasificar las zonas como óptimas, aceptables o no aptas. Para lograrlo, se pueden utilizar técnicas avanzadas como vuelos LiDAR y fotogrametría, seguidos de un proceso de digitalización detallado que identifique todos los

elementos en el terreno, garantizando así la mayor precisión en el diseño e implementación de proyectos fotovoltaicos.

4. Se recomienda utilizar el dashboard generado en este estudio como una herramienta clave para la planificación y ejecución de proyectos de energía solar en Neiva. La capacidad de visualizar la distribución de áreas óptimas a nivel de veredas permite identificar con mayor precisión los sitios más adecuados para la instalación de paneles solares o el desarrollo de granjas solares. Esta información puede servir como insumo para la toma de decisiones en proyectos de inversión dirigidos a comunidades locales, facilitando la implementación de soluciones energéticas sostenibles que mejoren su calidad de vida y garanticen el acceso a la electricidad en zonas con limitaciones en la cobertura del servicio.
5. Para futuros proyectos se recomienda el uso de la automatización utilizando herramientas como modelo builder o programación con Python, para optimizar el analisis de información, abarcando zonas más extensas, y permitiendo el analisis multitemporal de manera ágil y eficiente

11.Referencias

ANLA. (2017). *Términos De Referencia Para La Elaboración Del Estudio De Impacto Ambiental – EIA En Proyectos De Uso De Energía Solar Fotovoltaica*. https://www.anla.gov.co/images/documentos/terminos_referencia/anexo_tdr_solar_ajustado_26072017vf.pdf

Bitar, S., & Chamas, F. (2017). *Estudio De Factibilidad Para La Implementacion De Sistemas Fotovoltaicos Como Fuente De Energía En El Sector Industrial De Colombia*. https://repository.cesa.edu.co/bitstream/handle/10726/1572/MBA2017-00499.pdf?sequence=10&isAllowed=y

Checa, F., & Cruz, O. F. D. L. (2015). *Potencial Natural para el Desarrollo Fotovoltaico en Colombia*. https://www.semanticscholar.org/paper/Potencial-Natural-para-el-Desarrollo-Fotovoltaico-Checa-Cruz/d0d78d1cd40ac7d9960504c25d07941f954a700e

Documento Diagnostico Alcaldia De Neiva POT. (n.d.). Retrieved August 3, 2024, from https://serviciosgeovisor.igac.gov.co:8080/Geovisor/descargas?cmd=download&token=eyJhbGciOiJIUzUxMiJ9.eyJzdWIiOiIxMzY1MzciLCJleHAiOjE3MjI5MTEyOTYsImp0aSI6ImRvY3VtZW50by0yNDc2NCJ9.3sy5WatyWssMPMl7pMqIXxyYQQOPN1iBihTM_u75NSbcCRm__PuOziCBpdkG3k03snXiG3jRIDVzQiRPdbK3tw

ElectroHuila. (2023). *Reporte Integrado 2023*. https://www.electrohuila.com.co/wp-content/uploads/2023/07/Reporte-integrado-EH-2023.pdf

Francisco, S., & Arzola De La Peña, A. (2024). *Viabilidad del uso de energías renovables en Cundinamarca bajo la Estrategia Nacional de Transición Energética*.

Gandullo, P. (2022). *Estudio de localización de una central fotovoltaica de 50 MW en Andalucía occidental mediante un SIG*. https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/142251/TFM2450_Gandullo%20Romero.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gastelbondo, D. (2019). *Evaluación técnica y económica de Parques Solares fotovoltaicos en Colombia*. https://core.ac.uk/download/pdf/286653954.pdf

Gastelbondo. David. (2019). *Evaluación Técnica y Económica de Parques Solares Fotovoltaicos en Colombia*. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/13183/1/PIA%2012556.pdf

Herrera Galicia, R., Sánchez Alegría, A., Velázquez Moreno, K., Judith Vázquez González, P., & Leonardo Jiménez Pérez, J. (2023). STUDY OF A SOLAR PANEL BASED ON THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF THE CITY OF TUXTLA GUTIERREZ. In *Tecnológico Nacional de México en Celaya Pistas Educativas* (Vol. 44, Issue 144). http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas

Ley 1715 de 2014. (n.d.). Retrieved August 3, 2024, from https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=57353

Lozano, M., García, C., Lamata, T., Roca, L., & Meseguer-Valdenebro. (2014). *Analisis Mediante SIG Para Seleccionar Emplazamientos Optimos De Huertos Solares Fotovoltaicos, Caso De Estudio: Noroeste De La Región De Murcia*. www.gvSIG.org

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). *Resolución 627 de 2006*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-0627-de-2006.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016a). *Resolucion 1283 de 2016*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-1283-de-2016.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016b). *Resolución 2182 de 2016*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-2182-de-2016.pdf

Ministerio de Minas y Energia. (2024). *Resolución 40117 de 2024*. https://www.minenergia.gov.co/documents/11563/Resolución_40117_de_2024.pdf

Neita, L., & Restrepo, W. (2024). *¿La implementación de la tecnología de energía fotovoltaica en Colombia conduce al desarrollo energético sostenible?* https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/11652/La%20implementación%20de%20la%20tecnología.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026. (2023). www.dnp.gov.co

Rodriguez, L., Valderrama, M., García, H., & Ocampo, P. (2018). *La gestión para cadena de suministro de sistemas de energía solar fotovoltaica en Colombia y su situación actual*. *15*(1), 112–130.

Superintendencia delegada Para Energía Y Gas Combustible Dirección Técnica De Gestión De Energía. (2013). *Informe Ejecutivo De Gestión Empresa Electrificadora Del Huila S.A.E.S.P.* https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/2013informeejecutivodegestionempresaelectrificadoradelhuilasaesp.pdf

Tovar, A. (2014). *Evaluación De Impacto Ambiental De La Energía Solar Y Eólica En La Abiota De Colombia*. http://www.allpe.com/seccion_detalle.php?idseccion=268

Vargas, J., & Torres, J. (2020). Evaluación Técnico Ambiental Para La Implementación De Un Sistema Fotovoltaico. *Periodicidad: Semestral*, *14*(1), 2020.

Vélez, A. (2018). *Estudio de la Eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y su impacto socio económico en la zona rural del Cantón Chone, Manabí, Ecuador*. https://doi.org/https://doi.org/10.33936/riemat.v3i1.1420

Alonso, J. A. (2019, noviembre 14). ¿Cómo la temperatura afecta a las placas solares? | SunFields. SunFields | Expertos en Energía Fotovoltaica para Ahorro Energético en España. https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/efecto-de-la-temperatura-en-los-paneles-solares/

SPIS Toolbox—Solar Irradiation—Energypedia. https://energypedia.info/wiki/SPIS_Toolbox_-_Solar_Irradiation