DETERMINACIÓN DE LOS POTENCIALES GEOGRÁFICOS Y TÉCNICOS PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD SOLAR FOTOVOLTAICA EN EL DEPARTAMENTO DE CORDOBA, COLOMBIA

Jorge Alberto Mercado Zuluaga

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Director: Diego Samir Melo Solarte

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica.

Manizales, 2023

Resumen

La energía fotovoltaica permite minimizar el efecto invernadero por el uso de materiales fósiles. De allí que los equipos de suministro de energía con paneles fotovoltaicos, que mejorará la calidad de vida de los habitantes de este pueblo y el desarrollo económico porque es una inversión financiera inteligente ya que reduce significativamente los costos de energía, la energía solar es más estable, seguro y beneficioso para los consumidores y el medio ambiente que otras alternativas y combustibles fósiles. La energía solar fotovoltaica es una alternativa perfecta para concienciar a los habitantes de las regiones rurales de iniciar una independencia energética, en la que el sol es la fuente principal y es inagotable, teniendo en cuenta los diferentes factores socioeconómicos y ambientales.

La presente investigación tuvo por objetivo determinar las ubicaciones óptimas a través de un análisis multicriterio para aumentar la capacidad instalada del Sistema Interconectado Nacional - SIN a través de un sistema de energía fotovoltaico, para ello se identificaron las variables de evaluación y de exclusión para establecer los sitios adecuados que permitan el desarrollo de proyectos solares, para esto, se evaluaron las variables de los criterios de la metodología algebra de mapas, consiguiendo con ello, la implementación de una evaluación multicriterio para la identificación de las zonas optimas rurales del departamento de Córdoba.

Palabras clave: ***Algebra de mapas, , energía, Fotovoltaica, sistema eléctrico interconectado,.***

Abstract

Photovoltaic energy allows minimizing the greenhouse effect due to the use of fossil materials. Hence the power supply equipment with photovoltaic panels, which will improve the quality of life of the inhabitants of this town and economic development because it is a smart financial investment since it significantly reduces energy costs, solar energy is more stable, safe and beneficial to consumers and the environment than other alternatives and fossil fuels. Photovoltaic solar energy is a perfect alternative to make the inhabitants of rural regions aware of starting energy independence, in which the sun is the main source and is inexhaustible, considering the different socioeconomic and environmental factors.

The objective of this investigation was to determine the optimal locations through a multicriteria analysis to increase the installed capacity of the National Interconnected System - SIN through a photovoltaic energy system, for which the evaluation and exclusion variables were identified to establish the suitable sites that allow the development of solar projects, for this, the variables of the criteria of the algebra map methodology were evaluated, thus achieving the implementation of a multicriteria evaluation for the identification of optimal rural areas of the department of Córdoba.

Keywords: ***Algebra of maps, , energy, Photovoltaic, national interconnected system,.***

Contenido

Pág.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN 11

1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA 14

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 15

1.3 JUSTIFICACIÓN 16

2. OBJETIVOS 20

2.1 OBJETIVO GENERAL 20

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 20

3. ANTECEDENTES 21

3.1.1 Internacional 21

3.1.2 Nacional 25

3.1.3 Local 27

4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL 29

5. REFERENTE TEÓRICO 31

5.1.1 Fuentes alternativas de energía 32

5.1.2 Recursos de Radiación Solar en Colombia. 37

5.1.3 Evaluación multicriterio 40

5.1.4 Decisión multicriterio 43

5.1.5 Desarrollo sustentable 47

6. METODOLOGÍA 49

6.1 ENFOQUE METODOLÓGICO 49

6.2 TIPO DE ESTUDIO 50

6.3 PROCEDIMIENTO 50

7. RESULTADOS 52

7.1 VARIABLES DE EVALUACIÓN Y DE EXCLUSIÓN PARA ESTABLECER LOS SITIOS ADECUADOS QUE PERMITAN EL DESARROLLO DE PROYECTOS SOLARES FOTOVOLTAICOS. 52
7.2 VARIABLES DE ACUERDO CON LOS CRITERIOS ESTABLECIDOS BAJO LA METODOLOGÍA ALGEBRA DE MAPAS 63
8. CONCLUSIONES 73
9. RECOMENDACIONES 75
10. REFERENCIAS 77

Lista de figuras

Pág.

Figura 1 *Balance Energético Colombiano BECO* 11
Figura 2 *Esquema de las células fotovoltaicas*.....34
Figura 3 *Ubicación geográfica de Colombia.* 39
Figura 6 *Mapa de recursos hídricos*.....54
Figura 7 *Cartografía tomada instituto geográfico Agustín Codazzi, IGAC*.....55
Figura 8 *Mapa de corriente eléctrica* 56
Figura 9 *Mapa área protegida*.....57
Figura 10 *Mapa zona de radiación solar Córdoba.* 58
Figura 11 *Mapa de modelo digital de elevación*.....59
Figura 12 *Mapa de pendiente*.....60
Figura 13 *Mapa de susceptibilidad de inundación* 61
Figura 14 *Mapa vial, a partir del IGAC y base Agustín Codazzi.* 62
Figura 15 *Relaciones espaciales.* 64
Figura 16 Mapa con buffer o área de influencia de 1 km.....69
Figura 17 *Mapa a 5 kms.* 70
Figura 18 *Mapa de influencia de 3 0 mts de las vías*.....71
Figura 19 *Mapa cartográfico para localización de zonas óptimas*.....72

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1 *Condiciones ideales para el cálculo del Potencial de Generación de Energía Solar Fotovoltaica de SolarGIS* 36
Tabla 5 Procedimiento. 50
Tabla 6 *Criterios de localización restrictivos* 53

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
r_i	ri		Ecuación 1
w_i	Peso del criterio j		Ecuación 1
v_{ij}	Valor ponderado de la alternativa		Ecuación 1
A_s	Área transversal de la carga a granel	m^2	Ec. 3.6
a	Coeficiente	1	Tabla 3-1

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
□□□□	Factor de superficie	$\frac{m^2}{g}$	$(w_{F,waf})(A_{BET})$
□□	Grado de formación del componente i	1	$\frac{m_j}{m_{bm\,0}}$
□	Wandhafreibwinkel (Stahlblech)	1	Sección 3.2
□	Porosidad de la partícula	1	$1-\frac{\rho_s}{\rho_W}$

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
□	mittlere Bettneigunswinkel (Stürzen)	1	Figura 3-1

Subíndices

Subíndice	Término
bm	Materia orgánica
DR	Dubinin-Radushkevich
E	Experimental

Superíndices

Superíndice	Término
n	Exponente, potencia

Abreviaturas

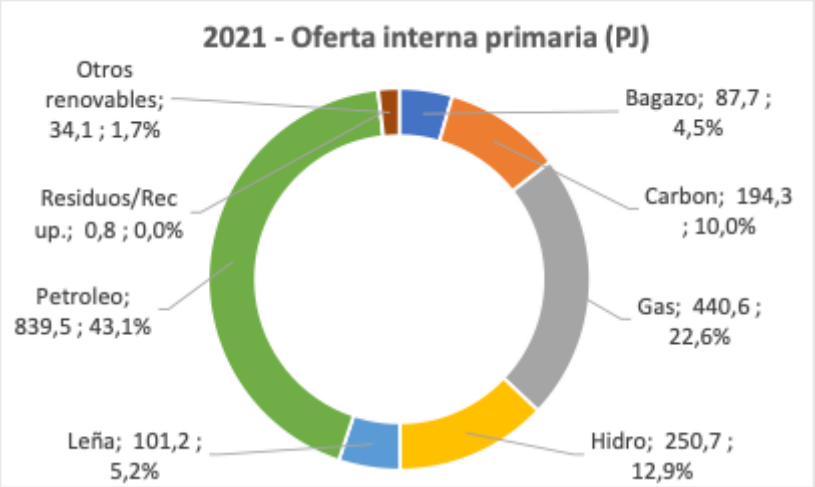
Abreviatura	**Término**
EMC	Evaluación Multicriterio
RUNAP	Registro Nacional de Áreas Protegidas
PVOUT	Potencial Solar Fotovoltaico
SIAC	Sistema de Información Ambiental
IDEAM	Sistema de Información Ambiental
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
USGS	Siglas en Ingles de Servicio Geológico de Estados Unidos

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

Según el documento Plan Energético Nacional 2020 - 2050 elaborado por la entidad colombiana Unidad de Planeación Minero-Energética - (UPME, 2019), la proyección de este informe manifiesta que para el año 2050 se consolide la transición energética que permita el desarrollo sostenible en el país.

Al año 2021 de acuerdo (UPME , 2021), la producción de energía primaria en Colombia está compuesta por combustibles fósiles provenientes como se muestra en la figura 1:

Figura 1 *Balance Energético Colombiano BECO*



Nota: Tomado de (UPME , 2021).

Según cifras del Balance Energético Colombiano -BECO (UPME , 2021), el consumo final de energía de todos los sectores estuvo alrededor de 1.309 petajoule[1] - PJ/año para el 2019 y

[1] Un petajoule es una unidad de medida de calor y energía que se utiliza para cuantificar grandes cantidades de energía. Equivale a poco más de 277 millones de kilowatts hora (KWh)

se espera que para el año 2050 este consumo aumente a 1.935 PJ/año motivo por el cual se debe ampliar la oferta de energéticos en el país.

Con el aumento poblacional y de la economía, el incremento de la demanda de energía contribuye a un aumento de alrededor de 30 Gigagramos (Gg) /año de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, razón por la cual la descentralización de las soluciones para el mismo problema (UNESCO, 2020), más participación de otros actores, la descarbonización y sustitución de las fuentes de energía más contaminante por tecnologías más limpias es crucial para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los compromisos adquiridos por el Estado en el Acuerdo de París COP21 (Comisión Europea, 2019).

La descarbonización en el contexto de una demanda y población creciente implica la sustitución de los combustibles que tienen mayor participación en la matriz energética: los combustibles fósiles. La integración de energías no convencionales es la oportunidad de diversificar la matriz energética, disminuyendo el uso de estos combustibles fósiles (MinMineria, 2021).

Es por lo anterior, que ante la iniciativa nacional de transición energética que se enfoca en establecer los puntos geográficos con características físicas ambientales específicas como la composición del suelo y su uso, los componentes sociales y ambientales, los cuales se caracterizan para el establecimiento de proyectos de producción de energía solar, siendo este objetivo de vital importancia para el crecimiento económico del país, la diversificación de fuentes de energía y el uso de fuentes energéticas que generen menos contaminación al planeta – Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2022).

En tal sentido, las condiciones geográficas y físicas de las regiones de Colombia proporcionan oportunidades para adoptar estrategias energéticas que les permitan a las

comunidades tener diferentes opciones de fuentes energéticas que les ayuden a suplir sus necesidades básicas, una de esas regiones es la costa colombiana teniendo en cuenta el potencial eólico, solar y demás condiciones climáticas que tienen mayor capacidad de generación energética.

Así pues, para el departamento del Córdoba se encuentra la empresa Afinia quien ejerce funciones de operador de red en Transmisión y Distribución de energía eléctrica (MinMinas, 2018); dicha organización pertenece a Empresas Públicas de Medellín y opera en el departamento desde el año 2020 por disposición del Ministerio de Minas y Energía en reemplazo de la empresa Electricaribe.

Así mismo, el informe presentado por (Correa, 2020), advierte sobre las metodologías para mejorar el comisionamiento de plantas nuevas integrando las normas ISO, de igual forma, para el año 2019 el grupo Enel inauguró la operación del Parque Solar El Paso, ubicado en el departamento, con una capacidad instalada de 86.2 MW generando con esto la energía que consumen 100 mil hogares (ENel, 2023).

Diferentes estudios indican que el departamento del Córdoba y los departamentos vecinos del norte del país tienen alto potencial para la generación de parques de energía solar a gran escala (Agronet.gov, 2017). SolarGIS, empresa eslovaca conformada por un grupo de científicos, programadores y cartógrafos ha desarrollado un mapa mundial donde se puede apreciar que, en efecto, el departamento del Córdoba tiene alto potencial para la generación de energía solar en el contexto nacional. (Agencia de Noticias UNAL., 2021)

1.1 Descripción del área problemática

De acuerdo con la revista Espacios, la investigación presentada por (Vanegas, et al., 2016), el potencial solar del departamento del Córdoba, ubicado en la Costa Caribe colombiana, presenta irradiaciones totales promedio que van desde los " 6,2 kWh/m2día en atmósferas muy turbias hasta los 6,8 kWh/m2 día en atmósferas extremadamente limpias" , lo que la convierte en una de las regiones con mayores valores de irradiación en Colombia. Este panorama permite visualizar el gran potencial que existe en la región para la implementación de proyectos tanto con tecnologías solares térmicas y fotovoltaicas.

En el contexto donde se ubica la presente investigación se caracteriza por sus características geofísicas, las cuales están acorde con la necesidad de implementar nuevos sistemas de energías renovables, las cuales han aumentado rápidamente en todo el mundo en los últimos tiempos, es por ello que la energía solar se considera la opción energética más exitosa debido a su universalidad y a que evita el agotamiento de los recursos naturales para mantener un equilibrio ecológico. El crecimiento sustancial de los requisitos de energía, el creciente declive de los combustibles fósiles y los problemas ambientales en todo el mundo, han llevado a la necesidad de producir energía solar fotovoltaica a gran escala.

El éxito de tal transición depende en gran medida de la implementación exitosa de proyectos de energía renovable, que a su vez depende de la aceptabilidad pública de esos proyectos. De allí que esta aceptabilidad de proyectos de energías renovables como la medida en que las personas evalúan esos proyectos (des)favorablemente , de hecho, los proyectos de energía renovable pueden retrasarse o cancelarse si existe una fuerte resistencia pública.

Por tanto, la integración temprana de las consideraciones de energía solar en la planificación/diseño urbano o rural es necesaria para garantizar que las ciudades y regiones

futuras no solo consuman sino que también produzcan energía localmente a través de la energía solar. Sin embargo, las estrategias para esta integración siguen siendo un desafío clave para los planificadores y los administradores de las regiones.

De acuerdo con Mejia (2021), el departamento del Córdoba posee caracteristicas geográficas especiales que lo hacen candidato a construir parques y plantas de energia solar, en relacion con ello, en este mismo documento, se establece que esta region sobresale en cuanto a la transmitancia debido al vapor de agua esto se debe a los niveles de humedad relativa (HR) que se presenta en el departamento, mientras que los departamentos de La Guajira y Magdalena presenta una variación de la transmitancia debido al vapor de agua muy similar esto es posible ya que el índice de evapotranspiración en la zona estudiada es muy parecido (De la Cruz y Mejia, 2022).

Con base en las condiciones físicas y geográficas del Departamento, es necesario determinar cuáles son los sitios ideales para el establecimiento de granjas solares por métodos de análisis espacial teniendo en cuenta criterios hallados en la literatura que sean aplicables al contexto local.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo utilizar el análisis multicriterio para determinar las ubicaciones óptimas y establecer un sistema de energía fotovoltaico que permita aumentar la capacidad instalada del Sistema Interconectado Nacional?

1.3 Justificación

La importancia de las granjas solares se enfoca en el empleo y uso de la energía fotovoltaica como fuente de energía renovable con menor impacto al medio ambiente, con menores costos económicos (EyL, 2017), de igual forma, la revista empresarial hace énfasis en el impacto de la energía solar, que ha sido catalogada como energía renovable más utilizada, esto de acuerdo a datos de la Agencia Internacional de las Energías Renovables IRENA. Por el auge de este tipo de generación de energía, por la inversión económica que recibe y por la necesidad imperiosa de modificar la matriz energética, una adecuada ubicación espacial es clave para que este tipo de proyectos funcionen con todo su potencial de generación.

Entre tanto, a medida que aumenta la demanda de energía, muchas entidades del sector público buscan formas de satisfacer esta demanda con energía limpia, segura y rentable de fuentes renovables. Afortunadamente, el precio de la tecnología solar sigue bajando, lo que permite a los gobiernos centrales y locales descubrir nuevas formas de mejorar la eficiencia operativa y gestionar el consumo de energía. La transición energética está encaminada a cumplir con la legislación y la regulación, los cuales son dos herramientas principales que se utilizan para lograr objetivos de interés público. Un régimen legal proporciona las bases para que se lleven a cabo las transacciones comerciales (ONU, 2019).

La legislación puede ayudar a eliminar las barreras legales, económicas y sociales para las inversiones en nuevas tecnologías y las inversiones en sectores de mercado específicos. Puede proporcionar un marco para la propiedad y el financiamiento de mejoras de infraestructura y puede proporcionar incentivos para fomentar una mayor inversión y uso de bienes con beneficios de interés público. Las pautas legales y regulatorias claras contribuyen a un mercado estable y

predecible dentro del cual la comunidad financiera, tanto nacional como internacional, se siente cómoda para invertir. (DPN, 2022).

Es de comprender que las transformaciones geopolíticas generadas por el auge de las energías renovables y el declive de los combustibles fósiles no han dado espera, esto se debe a que existe un propósito para minimizar la contaminación y los efectos invernadero, lo cual conducirá a cambios estructurales fundamentales en las economías y la sociedad. Es importante también destacar que el mundo de la transición hacia las energías renovables será muy diferente al basado en los combustibles fósiles, puesto que la transformación energética global puede generar un dividendo de paz, ya que el mundo se está alejando de los combustibles fósiles, que a menudo son un factor agravante en los conflictos armados dentro de los estados.

Por otra parte, estos cambios están inmersos en una nueva perspectiva global, la demanda mundial de energía, estimulada en gran medida por Asia; políticas climáticas “de arriba hacia abajo” que contribuyan a la descarbonización de la economía global; tecnología ascendente y digitalización impulsada por el mercado que favorezca nuevos enfoques energéticos y también un sistema energético más descentralizado; la innovación tecnológica que impulsa la industria energética tanto en el campo de las energías renovables y los vehículos bajos en carbono, como también en la producción no convencional de petróleo y gas.

Es de recordar que, en el año 2015, se realizó un acuerdo climático mundial para reducir en dos grados Celsius en el presente siglo el nivel de la temperatura mundial, por tanto, las energías renovables combinadas con la eficiencia energética son la respuesta para una solución climática viable. Entre tanto, con base en dicho acuerdo ambiental, se han creado estrategias que están desarrollando actualmente los diferentes países/bloques principales del mundo y argumentan, por ejemplo, que Europa, al ser un importante importador de energía, tiene un incentivo mucho mayor

para impulsar políticas de descarbonización que brinden el beneficio colateral de una mayor seguridad energética en comparación con los Estados Unidos, que actualmente está experimentando un auge económico gracias a su revolución de petróleo y gas no convencional que le permite no solo tener acceso a energía barata sino incluso convertirse en un importante exportador de gas y posiblemente en un exportador neto de petróleo.

Al mismo tiempo, China con sus políticas impulsadas por el Estado, pero también Europa y Japón están invirtiendo fuertemente en el desarrollo de nuevas tecnologías bajas en carbono que deberían proporcionarles una ventaja tecnológica y económica en una descarbonización, de otro lado, Rusia y los países exportadores de hidrocarburos de Medio Oriente, enfrentan desafíos en la transformación energética de sus economías debido a la inercia de múltiples sistemas.

De allí, que las Fuentes de Energía Renovable No Convencionales (FNCER) son aquellos recursos energéticos disponibles a nivel mundial como biomasa, geotermia, hidroeléctrica, eólica, solar y energía marina (MinMineria, 2021). La energía del sol tiene varias ventajas, como su uso libre de contaminación, renovable e inagotable (Gonzales, 2015). Sin embargo, esta energía presenta algunas desventajas que incluyen la variabilidad, la baja potencia y los requisitos de alta tecnología. Estas desventajas conducen a la necesidad de utilizar equipos de gran superficie. La energía solar se puede transformar en electricidad, calor, eólica, o se puede utilizar para el secado y la destilación Pereira, et al (2020). La brecha entre la oferta y la demanda de energía es cada vez mayor, por lo que los precios de la energía también aumentan, lo que ha afectado gravemente el rápido desarrollo de la economía mundial. Por lo tanto, el desarrollo sostenible es el único camino para la supervivencia y el desarrollo humanos. En este siglo, las nuevas energías y las energías renovables están jugando cada vez más roles. Debido a esto, los recursos de ahorro de energía y respetuosos con el medio ambiente basados en el

desarrollo de nuevas energías y energías renovables han sido valorados por más y más países del mundo.

Es allí, que el desarrollo de energías limpias es imprescindible para combatir el cambio climático y sus efectos. Hoy el llamado es a enfrentar el insostenible consumo energético de origen fósil y a concientizar sobre la necesidad de trabajar en conjunto para la creación, implementación y promoción de proyectos tendientes a la conservación del medioambiente y los recursos naturales (Jimenez, 2018).

Se entiende que la energía es fundamental para el crecimiento económico, la equidad social y la sostenibilidad ambiental, sin embargo, su uso irracional ha conllevado a: el aumento de las temperaturas del planeta, subidas del nivel del mar, pérdida de la biodiversidad, empeoramiento de la calidad del aire, cambios en los ecosistemas por la extracción de hidrocarburos, la emisión de CO2 y otros gases contaminantes a la atmósfera, ocasionando la contaminación de suelos y cuerpos de agua que afectan la propia existencia en este planeta.

2. Objetivos

En el presente apartado se describen los objetivos que orientan la investigación y los propósitos de los mismos referentes a lo esperado en su cumplimiento, se conforma por el objetivo general y específicos respectivamente.

2.1 Objetivo general

Determinar las ubicaciones óptimas a través de un análisis multicriterio para instalaciones de granjas de energía fotovoltaico, que permita aumentar la capacidad instalada del Sistema Interconectado Nacional - SIN

2.2 Objetivos específicos

Identificar las variables de evaluación y de exclusión para establecer los sitios adecuados que permitan el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos.

Evaluar las variables de acuerdo con los criterios establecidos bajo la metodología algebra de mapas.

Implementar la evaluación multicriterio que permita la identificación de sitios óptimos para la instalación de plantas solares fotovoltaicos en el departamento del Córdoba.

3. Antecedentes

La construcción de este apartado se presentan el análisis de los diferentes documentos académicos consultados, sobre la implementación de energía fotovoltaica a través de paneles solares como alternativa de solución para abastecer de electricidad a edificios de entidades públicas, en la mayoría de los escritos se establece que en el territorio nacional se cuenta con un alto recurso solar, lo cual hace que estos proyectos sean viables, propiciando beneficios sociales y ambientales, como se ve expresado en las siguientes investigaciones:

3.1.1 Internacional

Arencibia (2016) en su investigación la importancia de la energía solar buscaba describir la importancia de este tipo de energía, mostrando los aspectos técnicos del ahorro energético y la austeridad en el consumo de combustible para la generación de energía eléctrica, mostrando las alternativas para optimizar los sistemas de alumbrados a través de paneles solares. En los apartes internos del documento se muestra la descripción de las celdas fotovoltaicas y su funcionamiento, de igual manera describe como en Cuba por ejemplo desde 1994 se fundó la sociedad cubana para la promoción de las fuentes renovables de energía, motivando que desde la investigación puede acelerarse la aplicación de estos temas.

Un documento presentado por (Celadyn y Pawel, 2020), describe una investigación sobre el uso efectivo de módulos fotovoltaicos en arquitectura, el objetivo del documento fue presentar una revisión ante la ausencia de publicaciones específicas, describiendo la problemática urbana a gran escala hasta llegar a la escala de las formas y los componentes de los edificios. Se consideran diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos (FV), en función de su eficiencia, relaciones con los tejidos de los edificios, potencial para la protección térmica de los

edificios y su impacto en los valores estéticos. La atención se centró principalmente en los módulos fotovoltaicos más populares, teniendo en cuenta los lineamiento en política pública de Polonia. La aplicación de estos sistemas requiere análisis profundos que deben ser llevados a cabo por los diseñadores en la etapa inicial y durante las siguientes etapas del diseño. Un método para analizar las regulaciones del plan de zonificación y la planificación del sitio en vista de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos es novedoso. La aplicación de sistemas fotovoltaicos se está convirtiendo en una característica dominante en los edificios contemporáneos.

Fuglestad (2021) en su investigación sobre energía fotovoltaica en edificios de Noruega, su objetivo estuvo enmarcado en describir las condiciones energéticas del país, en el marco del análisis de los desafíos y estándares relacionados con energía fotovoltaica integrada en edificios o sus siglas en inglés - BIPV en Noruega. La BIPV es una tecnología en evolución y la tesis mostró cómo puede volverse más convencional.

Entre tanto, (Effat & El-Zeiny, 2022), para determinar la localización más adecuada de paneles solares a gran escala es muy importante conocer profundamente los factores que intervienen en su funcionamiento. Es así como para el correcto funcionamiento de las celdas fotovoltaicas y el aprovechamiento de la energía solar se requiere un mínimo de radiación solar que equivale a 3,5 KWh/m2/día (pp. 628). Lo anterior pone de manifiesto la gran importancia que tiene la radiación solar para el potencial funcionamiento de los paneles solares. Sin embargo, Aly A. (citado en Ríos y Duarte, 2021) considera que esta radiación solar puede estar en 4,6 kWh/m2 el valor ideal medio diario anual mientras que Gialamaki M, establece en 4,9 kWh/m2 este valor ideal medio diario anual.

De igual forma, en una investigación de Argentina, se resalta la importancia de mapear los sitios que reciban un mínimo de radiación solar que permita la puesta en funcionamiento de los paneles solares requiere la utilización de varios métodos. Se recomienda contar con datos históricos medidos en tierra por estaciones meteorológicas que generan datos de gran precisión, pero los costos de instalación, mantenimiento y comunicación para centralizar los datos ha ocasionado que se generen otros mecanismos para la determinación de la radiación solar a partir de los datos disponibles. (Sarmiento et al., 2019).

Una vez se conozca el potencial del recurso solar en una determinada región, la ubicación de los sitios óptimos para la instalación de infraestructura fotovoltaica que permita aprovechar el recurso solar, es un tema crucial para la viabilidad económica, la disminución de los impactos ambientales y sociales de estos proyectos. (Garni et al., 2018). El uso de métodos empíricos basados en el cálculo de la irradiación mediante estimaciones de luz, temperatura, nubosidad, altitud y latitud. Los métodos basados en la luz solar proporcionan mejores resultados. (Sarmiento et al., 2019).

Para la elaboración de mapas de irradiación, el cálculo mediante interpolación/extrapolación, es un buen método que usa la estadística, pero, como fue mencionado anteriormente, se necesita una densa red de estaciones para disminuir el cálculo de error en las estimaciones cuando las estaciones se encuentran distantes unas de otras. Por último, la información de irradiación solar obtenida a partir de las imágenes satelitales ofrece mejor precisión que los modelos empíricos y estadísticos a distancias de más de treinta y cuatro kilómetros de las estaciones meteorológicas. La combinación del modelo empírico basado en la luz solar con el uso de imágenes satelitales y previa a una validación con estaciones de

referencias terrestres permite hacer una buena estimación teniendo en cuenta que se realiza para lugares específicos. (Sarmiento et al., 2019).

Existen pocos estudios en alta resolución que permitan caracterizar la radiación solar para estimar cuáles son los sitios que reciben mayor radiación en Argentina y, por consiguiente, que son aptos para la adecuación de infraestructura que aproveche el recurso solar. Por consiguiente, mediante un modelo digital de elevación DEM y datos diarios y mensuales de irradiación solar de cinco estaciones meteorológicas se consolidó la información en una base de datos. Se descargaron imágenes del satélite MSG por LSA SAF con una resolución espacial de 4,8 kilómetros para la zona de estudio, Salta, provincia de Argentina.(Sarmiento et al., 2019)

Se presenta una mayor radiación en estaciones meteorológicas ubicadas en zonas de mayor altitud al estimarse valores anuales de radiación solar entre los 1600 a 2300 kWh/m2. (Sarmiento et al., 2019).

Otra investigación, realizada por Middelhauve et al., 2021, referente al potencial de paneles fotovoltaicos en envolventes de edificios para sistemas de energía distritales descentralizados, tuvo como propósito combinar un modelado relativamente detallado del potencial de generación fotovoltaica en la envolvente del edificio, manteniendo el enfoque de optimización del sistema de energía. El enfoque propuesto se aplicó a un distrito residencial típico en Suiza, cuyos resultados de la aplicación del método propuesto mostraron que el distrito puede lograr la neutralidad en carbono basándose únicamente en la energía fotovoltaica. De igual forma, los autores propusieron que para lograr la autosuficiencia a escala de distrito es un desafío: se puede lograr cubriendo aproximadamente del 42 al 100 % de la superficie disponible cuando la eficiencia de ida y vuelta disminuye del 100 al 50 %. Los resultados subrayaron la importancia del almacenamiento para lograr la autosuficiencia: incluso con una eficiencia de ida

y vuelta del 100% para el almacenamiento, se requieren capacidades muy grandes. Sin embargo, la reducción de la demanda de energía a través de la renovación permitiría alcanzar la autosuficiencia con la mitad de la capacidad fotovoltaica y de almacenamiento requerida.

Con base en lo anterior, se puede inferir que el uso y aprovechamiento de nuevas fuentes de energías renovables orientadas a implementar el sistema fotovoltaico, ha estado en desarrollo en los últimos veinte años, esto como consecuencia del impacto antrópico sobre los ecosistemas y el medio ambiente.

España y Alemania han generado iniciativas para el fomento de energía renovable a partir de paneles solares, sus resultados han sido exitosos y sustituir un porcentaje importante de la generación energética (Pacheco, 2018). De acuerdo con la European Photovoltaic Industry Association (2018) los paneles fotovoltaicos a nivel mundial se encuentran en estos países, con un 52%, seguidos por Japón con un 9% y Estados Unidos con un 6,8%.

En términos regionales, en América Latina hay países que se han ubicado dentro de los pioneros en el desarrollo de macroproyectos para la instalación de plantas fotovoltaicas con potencias especiales, uno de esos casos es Ecuador, con 998 MW, representado a través del Parque fotovoltaico en Tacna, de igual forma Perú con 20 MW con su planta en Sonora, otro país México con 650 MW (Castellanos A. , 2018).

3.1.2 Nacional

En Colombia, (Gaitán y Vargas, 2019), realizaron una investigación sobre la propuesta para la implementación de un sistema fotovoltaico en proyectos de vivienda de interés social en Cundinamarca, sus resultados establecieron que la radiación solar en la zona es variada y se

condiciona sobre factores meteorológicos como la nubosidad, la inclinación, la posición geográfica, la humedad y demás características que pueden influir en los datos.

Entre tanto, (Castro, 2021), realizó una investigación sobre la evaluación para proyectos de implementación de sistemas solares fotovoltaicos en la infraestructura gubernamental de Sabana Centro, la autora identificó y seleccionó los factores legales, técnicos y financieros que deben ser considerados en su implementación para realizar la evaluación financiera, a través de una herramienta que permite conocer el dimensionamiento estimado del sistema, el valor estimado de la inversión y el tiempo de retorno de la inversión.

Muñoz y Acebedo (2019), evaluaron el potencial solar de Santander por medio de una distribución nodal a través de la construcción de una malla, establecieron los municipios con mayor potencial y calcularon los factores que determinan el rendimiento de un sistema solar fotovoltaico.

Espitia (2017) diseñó una guía metodológica para la implementación de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala en Colombia, con el fin de estimar la producción de energía con base en las especificaciones del sitio, incluyendo irradiación solar, ángulo de inclinación y orientación entre otras.

Ríatiga (2016) en su investigación sobre aprovechamiento energético de los residuos sólidos y radiación solar en el colegio Técnico Vicente Azuero de Floridablanca, su objetivo estuvo enmarcado en analizar la viabilidad económica y ambiental de producción de energía mediante un Biodigestor para generar biogás y abono orgánico a partir de los desechos orgánicos del restaurante escolar y el uso de la radiación solar.

3.1.3 Local

En el departamento del Córdoba se han desarrollado diferentes proyectos de energía fotovoltaica , es el caso del documento publicado por (Campo y Rivera, 2020), se establece una panoramica geografica del departamento del Córdoba, teniendo en cuenta la vocacion agropecuaria de la region y las caracteristicas actuales para las energias altenativas en el departamento. De alli que la puesta en marcha del proyecto energetico El paso, parque solar construido por el grupo Enel, tiene una extension de 250 mil paneles que actualmente se considera el mas grande del pais. Su capacidad instalada es de ochenta y seis punto dos Mw, el cual podria generar 176 GWh por año, es decir el cubrimiento aproximadamente de mas de cien mil hogares.

De igual forma, (Cardenas, etr al., 2020),en su publicaciónocla en la energia solar en la operación del acueducto municipal de gonzalez - departamento del Córdoba, establecieron las dificultades energeticas que ha sufrido el departamento, por tanto lo han impulsado a actualizar las alternativas de solucion de esta problemática, teniendo en cuenta que los mayores valores de brillo solar medio diario están en la región Caribe y la Orinoquia. Por tal motivo el municipio de González, del departamento de Córdoba, promovió la construcción del primer acueducto en Colombia que operara únicamente con energía hidráulica y solar.

Esto ha permitido garantizar la continuidad en el servicio de agua potable, y la contribución con la disminución de las emisiones de CO2, teniendo en cuenta que ya no se requeriría combustible para su operación, la investigacion describe el uso del modelo matemático seleccionado para la temática inicial del proyecto es de tipo empírico y fue propuesto por Bristow-Campbell, para el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico se utilizó una metodología fundamentada en el potencial de radiación disponible en la zona, el requerimiento

energético en la operación de la planta de tratamiento de agua potable, las instalaciones administrativas y de laboratorio del acueducto municipal y el dimensionamiento del subsistema de generación, de acumulación y del regulador inversor.

Los resultados de su investigacion establecieron que el potencial de radiación para el municipio de González estimado en un rango entre (4,5 y 6) KWH/m2/día, es suficiente para suplir el consumo promedio, así mismo, el dimensionamiento propuesto tiene la capacidad para suministrar electricidad en la operación de la planta de tratamiento de agua potable, las instalaciones administrativas y el laboratorio del acueducto.

4. Referente normativo y legal

La construcción de este apartado tiene fundamento normativo en cuanto a las leyes y decretos, convenios y acuerdos que se hayan suscitado y firmado para la protección, manejo y adopción de sistemas de energías alternativas que permitan a las comunidades minimizar el efecto invernadero de los consumos energéticos convencionales que haya lugar.

Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante, orientado a que todos los países tengan una causa común para emprender esfuerzos ambiciosos para combatir el cambio climático y sus efectos, con un mayor apoyo a los países en desarrollo.

(Constitucion Politica de Colombia, 1991), establece en el artículo 80:

"El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución (…)", en el artículo 339 "(…) Las entidades territoriales elaborarán y adoptarán de manera concertada entre ellaou8

s y el gobierno nacional, planes de desarrollo, con el objeto de asegurar el uso eficiente de sus recursos y el desempeño adecuado de las funciones que les hayan sido asignadas por la Constitución y la ley" y en el artículo 365 "(…) Los servicios públicos estarán sometidos al régimen jurídico que fije la ley (…). En todo caso, el Estado mantendrá la regulación, el control y la vigilancia de dichos servicios (…)".

La (Ley 143, 1994) establece:

> El régimen de las actividades de generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad, que en lo sucesivo se denominarán actividades del sector, en concordancia con las funciones constitucionales y legales que le corresponden al Ministerio de Minas y Energía. (p 1)

La (Ley 697, 2001) reglamentada por el Decreto Nacional 3683 de 2003, impulsa el uso racional y eficiente de la energía, se motiva la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.

La (Ley 1715 , 2014) normaliza la composición de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, para emprender el desarrollo y manejo de las mismas, para dominar las emisiones de gases de efecto invernadero y garantizar la seguridad en el abastecimiento energético.

La (Ley 2099 , 2021) cuyo objeto:

> "es modernizar la legislación vigente y dictar otras disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético a través de la utilización, desarrollo y promoción de fuentes no convencionales de energía, la reactivación económica del país y, en general dictar normas para el fortalecimiento de los servicios públicos de energía eléctrica y gas combustible". (p 2).

La (Ley 2169 , 2021), establece:

> "metas y medidas mínimas para alcanzar la carbono neutralidad, la resiliencia climática y el desarrollo bajo en carbono en el país en el corto, mediano y largo plazo, en el marco de los compromisos internacionales asumidos por Colombia sobre la materia". (p 1).

5. Referente teórico

Es de reconocer, que la construcción de este aparte es fundamental para toda investigación, máxime que en él se reúne y sintetiza la teoría que permite fundamental la relevancia de los temas propuestos para ser analizados, puesto que de allí se discute la pertinencia de adoptar sistemas alternativos de energía.

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos que enfrenta el planeta y amenaza el futuro de la seguridad económica y socioeconómica. La transición lejos de los combustibles fósiles será una característica importante en cualquier plan de mitigación del cambio climático, y el consumo de energía residencial muestra un gran potencial para reducir el uso de combustibles fósiles (Damette, et al, 2017). A los investigadores les ha resultado difícil separar el consumo de energía de los edificios del consumo agregado, pero se estima que hasta el 40 % del uso de energía global puede atribuirse a la iluminación, la calefacción y la refrigeración de los edificios.

Existe un amplio consenso en que una transición energética baja en carbono es imperativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático (Hal & Orvis, 2018). El mejor camino para seguir es menos claro, con expertos que proponen todo, incluyendo solar, nuclear, eólica, biomasa, geotérmica y “todas las anteriores” como soluciones finales (IAEA, 2022). Los gobiernos locales y las corporaciones privadas también encuentran que la energía limpia y sostenible es fundamental para sus electores y clientes.

De acuerdo con (EZOIC, 2019):

> “la energía solar, es un tipo de energía renovable, que trata de aprovechar todo el sistema de radiación del sol, pues la energía contenida en el sol es tan abundante que se

considera inagotable. El Sol lleva 5 mil millones de años emitiendo radiación solar y se calcula que todavía no ha llegado al 50% de su existencia" (p 2).

5.1.1 Fuentes alternativas de energía

A medida que la demanda de energía aumenta con el tiempo en muchos lugares, los países de todo el mundo y los gobiernos locales diversifican la inversión en una variedad de fuentes de energía para satisfacer la demanda.

Los combustibles fósiles, como el petróleo y el gas natural, son fuentes de energía confiables, pero no son sostenibles y causan daños significativos e irreversibles al medio ambiente a largo plazo, además de sus daños inmediatos, como las emisiones de polvo fino debido a la quema de petróleo y las emisiones de mercurio causadas por combustión de carbón. Las alternativas de energía renovable, como la solar y la eólica, están ampliamente disponibles y pueden explorarse para satisfacer parte de la demanda. Además, mejorar la eficiencia energética de las aplicaciones existentes es una forma rentable de ayudar a satisfacer la demanda sin un aumento significativo en la producción de energía.

El desarrollo de energías alternativas a los combustibles fósiles enfrenta una serie de desafíos. En primer lugar, existen varias alternativas disponibles, como la nuclear, la biomasa, la solar, la eólica y la hidroeléctrica. Un municipio tiene recursos limitados y no puede invertir en todas las alternativas simultáneamente y por igual (Carli et al., 2018). Es difícil predecir qué alternativas energéticas serán más beneficiosas a largo plazo y determinar en qué alternativas se debe invertir y el monto de la inversión. En segundo lugar, el desarrollo de alternativas energéticas depende de muchos factores, como las condiciones geográficas, la población, las

necesidades sociales y la política. Una alternativa de energía que se adapta bien a una ciudad puede ser la peor opción para otra ciudad. En tercer lugar, existen muchos criterios, como el costo y la seguridad, que dictan la selección de alternativas energéticas. Es necesario analizar qué criterios deben incluirse en el proceso de decisión para comparar alternativas energéticas y cómo sopesar los diferentes criterios.

La energía hidroeléctrica es la tecnología de energía renovable líder en la mayoría de las regiones. Sin embargo, en los próximos años, las energías solar y eólica serán los tipos de energía alternativa preferidos. En 2018, muchos países invirtieron en proyectos de energía renovable, y China invirtió la cantidad más importante, habiendo invertido en proyectos de casi 696 gigavatios.

A China le siguen países como Estados Unidos, Brasil, Alemania e India. China domina la industria en tres tecnologías, a saber, energía eólica, hidroeléctrica y solar. Brasil, por su parte, tiene la mayor capacidad instalada de bioenergía, mientras que Estados Unidos es el país líder en tecnología geotérmica (Hanna y McGuigan, 2016).

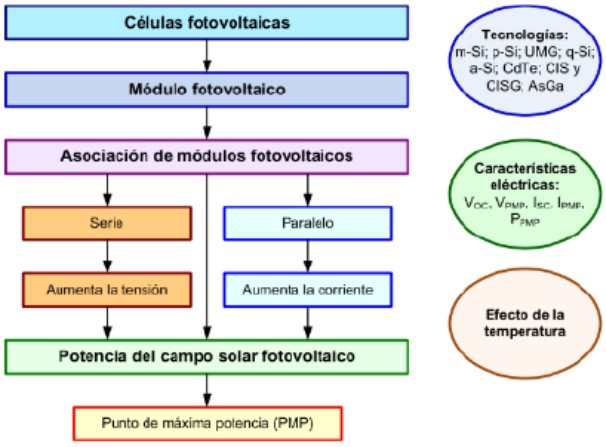
Según la revista Energías renovables para todos (Pep, 2007), la obtención directa de electricidad a partir de la luz se conoce como efecto fotovoltaico y para lograr este fenómeno se requiere un material que sea capaz de absorber la luz del sol y transformarla en energía eléctrica. Las células fotovoltaicas logran este cometido al generar corriente eléctrica al producirse una diferencia de potencial y un flujo de electrones. Algunos materiales, por sus características fisicoquímicas tienen electrones con energía elevada que permiten establecer lo que se denomina banda de conducción lo que permite, como su nombre lo dice, la conducción de la corriente eléctrica. Esta generación de electricidad sólo se cumple al existir tres condiciones: a)

Modificación del número de cargas positivas y negativas. Alcanzada cuando se agrega a un material semiconductor unas pequeñas dosis de átomos capaces de ceder o recibir electrones. b) Creación de cargas que permiten la aparición de una corriente.

Para esto es necesario exponer la célula fotovoltaica a una radiación luminosa aprovechando la energía que contienen las partículas de luz (fotones). Si se presenta una energía conveniente, el fotón cede su energía a un electrón de la banda de valencia conduciendo luego a la banda que no tiene ninguna carga eléctrica con la energía correspondiente. Con la creación de las cargas se puede establecer una corriente eléctrica si se cierra el circuito. c) Es necesario que se genere una diferencia de potencial que produzca el flujo de electrones.

Al recibir los fotones, la célula se carga positiva y negativamente generando una diferencia de potencial o campo eléctrico entre las regiones de la unión. Las células solares o células fotovoltaicas son un dispositivo constituido por esta unión que han recibido una radiación luminosa, creándose un campo eléctrico que separa las cargas negativas y positivas y, al estar cerrado el circuito entre los dos elementos que conforman la unión, se genera la corriente eléctrica.

Figura 2 *Esquema de las células fotovoltaicas*



Fuente: Sales, G., Grau, O., (2011)

Las características de una célula solar fotovoltaica incluyen la potencia, la tensión y la corriente, como se ve en la Figura 1., y dependen del número de células solares asociadas y de las características de radiación solar, viento, inclinación, así como radiación incidente, temperatura para conseguir el punto máximo de potencia (PMP) definido como el punto de campo solar fotovoltaico donde se genera la máxima cantidad de energía. (Gómez, et al., 2017 pp. 3).

El silicio es un buen semiconductor y siendo además uno de los elementos más abundantes en la tierra razón por la cual compuestos a base de este elemento son ampliamente utilizados en la industria de las células fotovoltaicas.

El Potencial de Energía Solar Fotovoltaica es una medida de la capacidad a largo plazo de la producción potencial de electricidad anual/diaria de una planta de energía solar fotovoltaica (PV) conectada a la red de 1 kW de pico. (SolarGIS).

Se calcula la producción potencial de electricidad bajo condiciones conectada a la red de 1 kW de pico. Para el cálculo de este promedio se tuvo en cuenta ciertas condiciones ideales

supuestas dentro del terreno. En la tabla X. Condiciones ideales para el cálculo del Potencial de Generación de Energía Solar Fotovoltaica de SolarGIS se aprecia las condiciones del modelo que desarrolló SolarGIS para ofrecer información del Potencial Fotovoltaico a nivel global.

El modelo tiene en cuenta la radiación solar, la temperatura del aire y el terreno para simular la conversión de energía y las pérdidas en los módulos fotovoltaicos y otros componentes de una planta de energía fotovoltaica. El efecto acumulativo de otras pérdidas por suciedad, nieve y hielo en los módulos fotovoltaicos, y las pérdidas de cables, inversores y transformadores, es del 9%. La disponibilidad de la central eléctrica se considera del 100%. Los efectos del terreno se consideran a la resolución espacial de 250 metros.

Tabla 1 *Condiciones ideales para el cálculo del Potencial de Generación de Energía Solar Fotovoltaica de SolarGIS*

	POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA (PV) SOLARGIS
	PROMEDIO DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ANUAL/DIARIA DE UNA PLANTA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA. CONDICIONES IDEALES
1	Estructuras independientes del suelo
2	Módulos fotovoltaicos de silicio cristalino
3	Módulos fotovoltaicos montados en posición fija
4	Módulos fotovoltaicos ubicados en posición óptima para maximización de rendimiento
5	Se asume el uso de inversores de alta eficiencia
6	Se estima en un 3,5% las pérdidas en los módulos fotovoltaicos por suciedad
7	Se estima en 7,5% las pérdidas por sombreado de filas, desajuste, inversores, cables, transformadores, etc.
8	Disponibilidad al 100% de centrales eléctricas

Nota: Elaboración propia a partir de Especificaciones Técnicas de SolarGIS

5.1.2 Recursos de Radiación Solar en Colombia.

La preocupación mundial actualmente se centra en las estrategias para mitigar el cambio climático y sus efectos, las cuales están enmarcadas en la forma en que los países generan, transportan y consumen sus recursos energéticos, ya que el sector energético produce una gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (ONU, 2022). Actualmente, la conciencia mundial se centra en las estrategias para mitigar el cambio climático y sus efectos, las cuales se enmarcan en la forma en que los países generan, transportan y consumen sus recursos energéticos, ya que el sector energético produce una gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, así como la demanda de energía está aumentando aproximadamente un 5% por año en los países en desarrollo, como Colombia.

La ineficacia de las megas centrales hidroeléctricas para satisfacer las necesidades de las ciudades en tiempos de escasez de energía, sumado a los cambios dinámicos en los precios del petróleo, como es el caso de Floridablanca en Colombia, ha centrado varios estudios sobre la evaluación del recurso eólico como suministro energético, bajo criterios de viabilidad económica para la toma de decisiones en los mercados eléctricos (CODS, 2019). Considerando los principios que inciden en el impacto variable sobre el desarrollo del sector eléctrico, a través de modelos de inversión que garanticen la viabilidad de los proyectos, y considerando los múltiples factores que introducen incertidumbre en el cálculo para estimar la generación de energía a partir de recursos eólicos y solares, permite afrontar nuevos retos energéticos que permiten controlar las limitaciones de los métodos tradicionales de valoración de inversiones en el sector eléctrico, adaptándose así al cambio ambiental (UPME, 2019), y explorando métodos reales en los que se consideran los intangibles y la flexibilidad operativa como elementos que puede alterar la

decisión de llevar a cabo un proyecto de energía renovable ofreciendo renovabilidad y limpieza como dos ventajas frente a la energía convencional.

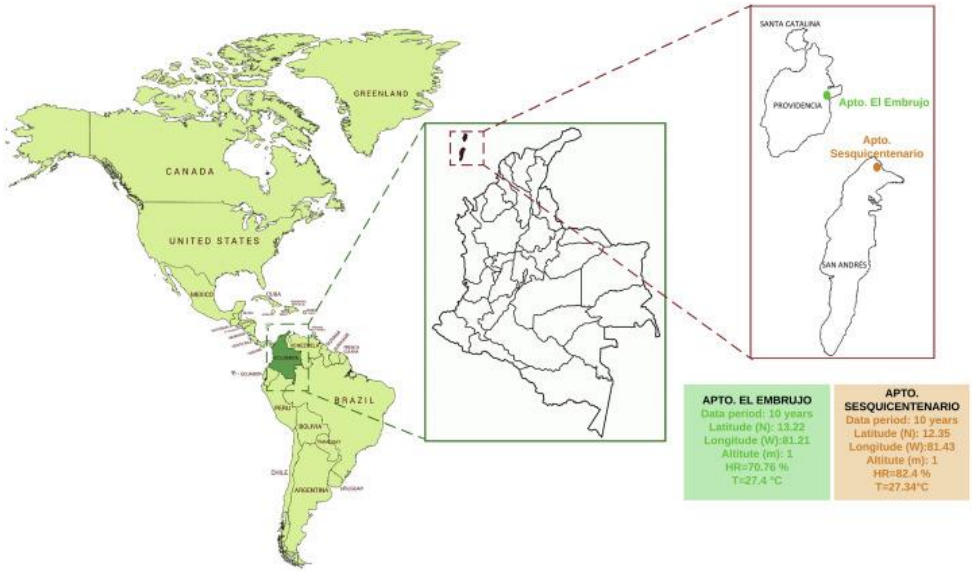
Colombia, país ubicado en América del Sur, cuenta con una excelente ubicación geográfica para el uso, desarrollo y generalización de tecnologías asociadas a las energías renovables. Por ejemplo, la alta tasa de radiación solar en muchas regiones significa que el país tiene un gran potencial para utilizar la energía solar. Sin embargo, la realidad es bastante diferente ya que presenta un importante déficit en el desarrollo de este sector (Celsia, 2021).

En Colombia, la región Caribe es considerada actualmente una de las mayores fuentes de potencial eólico y solar a nivel nacional, debido al avance que ha tenido esta región en las últimas décadas en cuanto a la implementación de fuentes de energía renovables considerando la creciente importancia que la energía solar y eólica han ido adquiriendo en la matriz energética nacional y mundial. Esto ha despertado el interés de diferentes sectores enfocados en desarrollar proyectos que permitan al país aprovechar al máximo sus recursos energéticos, convirtiendo al Caribe colombiano en un sector atractivo para inversionistas locales y extranjeros (Buendía, 2014).

Colombia cuenta con quinientas cincuenta estaciones satelitales automatizadas y digitales, en diferentes puntos de cálculo de variables atmosféricas situadas a lo largo del país, de las cuales el 13% realizan mediciones directas, 69% realizan mediciones rutinarias de las horas solares promedio y el 18% restante se dedican a realizar mediciones de humedad relativa y temperatura. mediciones. En el caso de la radiación solar a nivel país se recolecta información de todas las estaciones meteorológicas, y en el caso del brillo solar se recolectan datos de 479 estaciones. La UPME ha establecido niveles promedios mensuales y anuales de radiación e

irradiancia desde 1981; estos valores se expresan en kilovatios-hora por metro cuadrado (kWh/m2) (UPME, 2019).

Figura 3 *Ubicación geográfica de Colombia.*



Nota: Ubicación geográfica del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Sanandres.gov, 2021).

De acuerdo con (Gómez et al., 2018), las condiciones naturales en Colombia son favorables para la generación de energía eléctrica mediante sistemas solares fotovoltaicos ya que los niveles de radiación durante todo el año se consideran convenientes. La mayoría de las ZNI del país tienen un recurso de irradiación solar promedio de 194 W/m2 y una radiación solar promedio diaria de 4,5 kWh/m2. Estos valores superan el promedio mundial de 3,9 kWh/m2 por día. Con base en ello, Colombia, aunque lejos de los países que mejor aprovechan la energía solar, ha avanzado en cuanto a la implementación de proyectos de energías renovables en los últimos diez años, especialmente sobre el servicio y aprovechamiento de la energía solar, según un estudio presentado por UPME al 30 de septiembre de 2020.

5.1.3 Evaluación multicriterio

El método de Evaluación Multicriterio que vamos a aplicar en este trabajo está fundamentado en la obra Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la Ordenación del Territorio (Gómez y Barredo, 2006), también es definida como un conjunto de técnicas bajo la presencia de múltiples criterios y objetivos que entran en conflicto para la toma de decisiones.

Existe, bajo el concepto de Evaluación Multicriterio, una serie de conceptos, modelos y métodos para auxiliar a los tomadores de decisiones de acuerdo con varios criterios. Esto hace parte de la decisión multidimensional y los modelos de evaluación que utiliza una estructura matemática basada en la teoría de la optimización multiobjetivo donde los objetivos que entran en conflicto y los que se complementan son tomados como un problema a resolver con múltiples objetivos (Rodriguez y Oidor, 2014).

Existen dos enfoques en el ámbito de la teoría de la decisión: el positivo, que hace referencia al campo de la lógica, la psicología y la sociología centrándose en detallar las razones por las que se toman las decisiones de un modo en concreto, y el segundo, el normativo, se basa en la evaluación objetiva o subjetiva del criterio de decisión comprendiendo aproximaciones representadas en cantidades, ponderaciones, limitantes, y metas. (Bonome, 2009).

Los componentes de la Evaluación Multicriterio en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica incluyen los objetivos, las alternativas, los criterios, la regla de decisión, la evaluación y las matrices. Los componentes se explican a continuación: El objetivo es la

función por desarrollar, la finalidad del desarrollo de la regla de decisión motivado por un fin. En un procedimiento de Evaluación Multicriterio puede existir un objetivo en particular o múltiples objetivos presentados en problemas de planificación, decisión o localización de actividades en un territorio (Posada, 2015).

La búsqueda de satisfacer la consecución de los objetivos se da sobre unas alternativas que se tratan de las partes del territorio que serán evaluadas y a las cuales se les aplicará la regla de decisión; las alternativas serán presentadas mediante objetos en formato raster o vectorial. Los criterios son los puntos de referencia para tomar decisiones; dentro de la evaluación multicriterio es uno de los aspectos más importantes, y se debe tener especial cuidado en la forma en que pueda ser medido ya que de esto se obtiene el resultado final del proceso de evaluación. Existen dos tipos de criterios, los factores y los limitantes. Los primeros realzan o dan menos valor a una alternativa para el objetivo que se encuentra en consideración, mientras que los limitantes circunscriben las capas analizadas en una capa binaria donde con una codificación se establece la disponibilidad o no del área para el establecimiento de una actividad (MinAmbiente, 2020).

Luego de que se obtienen las capas temáticas de acuerdo con los criterios se puede aplicar la regla de decisión para llegar a la evaluación. Esta selecciona la alternativa más adecuada de acuerdo con el criterio sea simple, cuando se pretende aplicar un principio en base a un criterio simple, o complejo, cuando se pretende integrar una serie de criterios realizándose una evaluación multicriterio y es aquí cuando los métodos de la Evaluación Multicriterio permiten integrar de manera ordenada y lógica los criterios implicados en la toma de una decisión a través de decisiones específicas (Grajales, et al, 2013).

El proceso de aplicar la regla de decisión sobre las capas criterio se llama Evaluación y será el que construya finalmente el modelo de decisión. Según el autor, la mejor forma de

relacionar los criterios y las alternativas de una Evaluación Multicriterio es mediante el uso de matrices donde en la columna principal se incluyen los criterios (j) y en la fila inicial las alternativas (i) y los valores internos se conocen como puntuaciones dados a los criterios que se realzan o limitan (xij), es aquí donde es importante asignar de valores cuantitativos a las categorías de cada criterio según la consideración del equipo evaluador.

Las alternativas que se determinen deben tener diferentes valores de acuerdo con los criterios asignándose una puntuación a este criterio a cada alternativa. Con esto se obtiene la matriz de evaluación y se conoce cuál será ese punto ideal donde se combinan los valores más altos de cada criterio (Garces, 2015). La valoración de las alternativas se da a partir de una puntuación de criterio dada por los evaluadores, cuanto más favorezca una condición de un objeto espacial, mayor puntuación tendrá.

Con la estructuración de la matriz de evaluación es posible determinar el punto ideal, es decir un vector que tenga los valores más altos de cada uno de los criterios empleados, pudiendo ser utilizado como referencia.

Con la matriz de evaluación se puede jerarquizar cada criterio en caso de que uno tenga mayor relevancia sobre otro por lo que se requiere asignar un valor a cada criterio de acuerdo a su nivel de importancia. El valor otorgado se llama peso o ponderación *(wj)* cuando tiene un valor cuantitativo o jerarquía cuando tiene una valoración cualitativa. Asignados los pesos de los criterios es posible incluirlos en la matriz de prioridades donde cada punto de vista de un equipo interdisciplinario ha otorgado los pesos de los criterios (Leon, 2011).

Con las matrices de evaluación y de prioridades se puede realizar la matriz de valoración cuyo propósito es el de asignar valores en función del número de criterios, las prioridades y las técnicas aplicadas a cada alternativa teniendo en cuenta los puntos de vista planteados.

5.1.4 Decisión multicriterio

Como se explicó anteriormente, dentro de la Evaluación Multicriterio de puede dar el caso de que se busque la consecución de un objetivo (simple), varios objetivos (múltiple) y uno o varios criterios que se complementan o conflictúan entre ellos. Esta situación posibilita cuatro posibles combinaciones de objetivos y criterios (Grajales, et al., 2013).

La combinación más simple se da cuando existe un solo objetivo y criterio; también existe la combinación de un solo objetivo y varios criterios, según el autor este tipo de evaluación es la más frecuente en los SIG. Con la integración de criterios se estructura la regla de decisión y la capa temática que sirve como modelo sirviendo al alcance del objetivo inicial. La combinación de múltiples objetivos y un solo criterio no es una relación lógica y la combinación de múltiples objetivos con múltiples criterios es compleja puesto que los objetivos pueden estar en contraposición y dificultar la solución, por lo que se requiere un tratamiento especial a los criterios y a la regla de decisión (Reyes, 2013).

La Decisión Multicriterio se desarrolla produciendo insumos en forma de modelos. Para el caso de la decisión multiobjetivo se puede jerarquizar los objetivos dándole pesos a estos. Los procedimientos para emplear son: extensión jerárquica, solución priorizada y solución compromiso (CEPAL, 1996).

Cuando los objetivos pueden ser complementarios entre sí, las alternativas pueden satisfacer a varios objetivos al mismo tiempo. Para resolver este tipo de problema se puede aplicar una extensión jerárquica del proceso asignando un peso para cada objetivo uniendo las capas de cada objetivo en una sola capa que satisfaga el índice de simple composición.

Cuando se presentan objetivos conflictivos, estos compiten por las alternativas posibles puesto que puede satisfacer a un objetivo o a otro, pero no a los dos, es aquí cuando se asigna un orden de prevalencia a los objetivos. Los objetivos con mayor jerarquía tienen prelación para satisfacer con respecto a los de menor jerarquía. Para establecer la jerarquía de los objetivos el método adecuado es el de Jerarquías Analíticas mediante el empleo de una solución compromiso.

Si se conoce el objetivo con mayor prioridad se establece una regla de decisión para los objetivos *(wk)* cómo se hace cuando se tienen múltiples criterios *(wj).* Cada objetivo deberá tratarse como un problema aparte junto con sus criterios para establecer una regla de decisión y una capa objetivo. La regla de decisión final debe ser la unión de las capas objetivos de cada objetivo para establecer un solo modelo de decisión (Arancibia, et al., 2016).

Cuando los objetivos son complementarios con jerarquías desconocidas se puede abordar el problema asignando igual peso a estos objetivos, aunque no es común hallar casos donde el peso de los objetivos complementarios se desconozca. Al hallarse casos en que los objetivos sean conflictivos y con jerarquías conocidas se debe abordar el problema generando una capa de capacidad para cada objetivo y, a su vez, establecerse jerarquías para cada objetivo que indique el orden en que van a ser satisfechos sus requerimientos. (Arancibia, et al., 2016)

Para la solución de problemas espaciales, los criterios están asociados a entidades geográficas por lo que se representan mediante capas temáticas. Los criterios deben cubrir todos los aspectos del problema, ser relevantes para ser tenidos en cuenta dentro del análisis y no deben ser redundantes por lo que se debe aplicar un coeficiente de correlación entre cada par de atributos (CEPAL, 1996).

Los criterios deben abarcar en mayor medida todos los factores que pueden incidir dentro de la evaluación. Sin embargo, es claro que los criterios a aplicar dependen también de la información existente, la calidad y la disponibilidad para ser usada. Otro factor importante es el software por utilizar puesto que se debe determinar si cuenta con la posibilidad de realizar un Estudio Multicriterio o no. Los criterios deben tener una ponderación que pueda llegar a expresar cuantitativamente la importancia de estos para emplearse o ser afectados por una decisión (Bonome, 2009).

5.1.3.1. Métodos de evaluación multicriterio

Existen distintos métodos para la Evaluación Multicriterio y su diferencia se basa en los métodos estadísticos y matemáticos que emplean sobre las matrices de prioridades y de evaluación y por lo cual se requiere una serie de características y propiedades para llevar a cabo la evaluación.

La clasificación dada por el autor divide los métodos para la Evaluación Multicriterio en tres grupos: Compensatorias, Borrosas y No compensatorias, explicando que los primeros requieren un mayor entendimiento porque requiere que el equipo evaluador conozca las prioridades y los pesos con valores cardinales, se subdivide en aditivas y de punto ideal; los no compensatorios necesitan un menor entendimiento pero requieren una jerarquización ordinal y una adjudicación de valores de acuerdo al juicio de los evaluadores. Por otra parte, el grupo Borrosos utiliza una escala no numérica que permite conocer la cualidad del criterio para evaluar las alternativas de acuerdo con una serie de atributos.

5.1.5 Método de Concordancia.

Mediante la comparación por pares se obtiene una relación organizada de los criterios para luego elegir la selección final.

El método consiste en realizar una medida de la concordancia y otra medida para la discordancia. La concordancia se puede entender como el predominio de una alternativa (i) sobre otra (i') para todos los criterios en que una alternativa es igual o mejor que la otra. La discordancia hace referencia al predominio de la alternativa (i') sobre la alternativa (i) en los casos en que (i') es mejor opción que (i).

Luego de realizar el cálculo para cada par de alternativas se establece la diferencia existente para finalmente calcular una puntuación final para cada alternativa. (Gómez y Barredo, 2006)

1. Método de Jerarquías Analíticas de Saaty

Este método está basado en la separación, juicio comparativo y síntesis de las prioridades del problema de decisión.

El juicio comparativo se da realizando una comparación entre pares de los elementos a analizar, la síntesis de las prioridades deberá tomar las prioridades resultantes en cada nivel de jerarquía y elaborar las prioridades globales para el último nivel de jerarquía.

Evaluación Multicriterio con Método de Jerarquía Analítica

Las fases de la Evaluación Multicriterio con el Método de Jerarquías Analíticas constan de los siguientes pasos:

Identificación de los criterios de decisión.

Desde lo más generales a lo más concretos, se debe organizar los factores identificados en grupos. Los factores generalmente son meta, objetivos, atributos y alternativas.

Se debe organizar los elementos de cada grupo estableciendo la importancia para cada uno de ellos.

Se asigna los pesos de los niveles en cada jerarquía obteniendo pesos compuestos y globales multiplicando los pesos relativos de la matriz inicial por los pesos relativos de la segunda matriz, hasta llegar al último nivel de jerarquía.

Ecuación 1

$$R_I = \sum_k w_k r_{ik}$$

Donde:

w_k es el vector de prioridades (pesos) asociado a cada elemento k de la estructura jerárquica de criterios, la suma de w_k es igual a 1 y r_{ik} es el vector de prioridades obtenido al comparar las alternativas con cada criterio.

Organizar las alternativas en función de la puntuación total. La alternativa más adecuada es aquella que consiga el mayor valor.

En un entorno SIG el procesamiento termina en el nivel de atributos. Es necesario usar la adición de todos los factores para obtener el valor R para adecuar cada alternativa y no por medio de la comparación entre alternativas. (Gómez & Barredo, 2006, pág. 98)

5.1.6 Desarrollo sustentable

El desarrollo sostenible puede definirse como un enfoque para el desarrollo económico de un país sin comprometer la calidad del medio ambiente para las generaciones futuras. En nombre del desarrollo económico, el precio del daño ambiental se paga en forma de degradación de la

tierra, erosión del suelo, contaminación del aire y del agua, deforestación, etc. Este daño puede superar las ventajas de tener una mayor calidad de productos y servicios.

Otra definición del desarrollo sostenible se observa como la interacción mutuamente beneficiosa entre el interés legal de un negocio y la economía, el gobierno y la política, y la sociedad civil y la cultura. Sin embargo, estas interacciones sociales no existen solas, por tanto, en el lado físico y material, la sociedad está obligada por la capacidad de carga de varios ecosistemas, ecología del paisaje y, finalmente, la biosfera de la tierra o la naturaleza. En el lado espiritual y psicológico, la diferenciación funcional de tres veces de la sociedad es inspeccionada por la capacidad de cuidado de un individuo. Por lo tanto, podemos decir que el desarrollo sostenible es un concepto multidimensional, que involucra no menos de cuatro dimensiones (CEPAL, 2021).

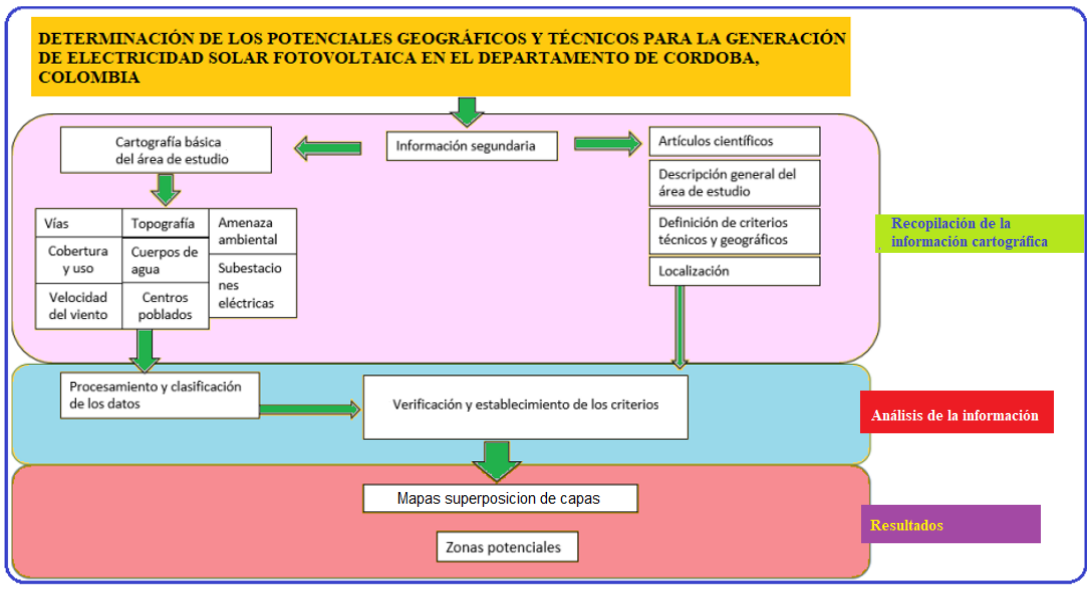
6. Metodología

Para la recopilación de la información, la investigación se estableció bajo un proceso de investigación descriptiva y aplicada con enfoque cuantitativo que incluye una propuesta de solución a una necesidad detectada, la cual se encuentra desarrollada a través de los estudios técnicos. Se aplicó el método inductivo, el cual hace referencia al análisis de los elementos o variables para llegar a un concepto o conclusión, en esta investigación, se realizó el análisis por medio de los objetivos específicos los cuales llevaron a determinar la viabilidad del estudio.

6.1 Enfoque metodológico

Los métodos mixtos representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada (metainferencias) y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio (Sampieri, et al, 2014).

Figura 1. *Metodología propuesta*



Fuente: Hernández et al. (2010)

6.2 Tipo de estudio

La investigación cualitativa es aquella que utiliza preferente o exclusivamente información de tipo cualitativo y cuyo análisis se dirige a lograr descripciones detalladas de los fenómenos estudiados. La investigación cuantitativa, en cambio, es aquella que utiliza preferentemente información cuantitativa o cuantificable (medible).

6.3 Procedimiento

Se describen las actividades que se ejecutaron para lograr el cumplimiento de los objetivos, agrupadas en fases.

Tabla 2 Procedimiento.

Fase	
Identificar las variables de evaluación y de exclusión para establecer los sitios adecuados que permitan el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos.	Vías Cartografía base, escala 1:100.000; Coberturas de la tierra del departamento de Córdoba, Cuerpos de agua; Topografía Modelo digital del departamento, Centros poblados; Velocidad del viento Cartografía sobre la velocidad del departamento de Córdoba. IDEAN; Subestaciones eléctricas, Amenaza ambiental Cartografía IGAC.
Evaluar las variables de acuerdo con los criterios establecidos bajo la metodología	Se utilizó algebra de mapas, el cual se aplicó en el resultado del mapa final, utilizando la metodología de multicriterio, estableciendo

de Jerarquías Analíticas a través de la separación del juicio comparativo y la síntesis. Implementar la evaluación multicriterio que permita la identificación de sitios óptimos para la instalación de plantas solares fotovoltaicos en el departamento del Córdoba.	con ello el uso del sistema de información geográfica (SIG), la cual es una poderosa herramienta para recopilar, almacenar, gestionar y analizar datos espaciales (Sosa-Franco, et al, 2023).

Elaboración propia.

Como afirman Vassilev et al. (2005), los problemas de toma de decisiones multicriterio se pueden dividir en dos clases distintas. En la primera clase, se da explícitamente un número finito de alternativas en forma de tabla. Estos problemas se denominan problemas de toma de decisiones multicriterio discretos o problemas de análisis multicriterio. En la segunda clase, un número finito de conjuntos explícitos de restricciones en forma de funciones definen un número infinito de alternativas factibles. Estos problemas se denominan problemas continuos de toma de decisiones multicriterio o problemas de optimización multicriterio. Los métodos utilizados en los diferentes enfoques de análisis de decisiones se denominan Métodos de Decisión Multicriterio.

Por lo anterior, el análisis espacial multicriterio requiere información sobre los valores de los criterios y las ubicaciones geográficas de las alternativas, y los resultados del análisis se representan visualmente en un mapa (Jankowski, 1995) digital, dos componentes importantes del análisis de decisiones espaciales multicriterio son el componente SIG y el componente de toma de decisiones multicriterio.

7. Resultados

7.1 Variables de evaluación y de exclusión para establecer los sitios adecuados que permitan el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos.

Para el desarrollo de este apartado se tuvo en cuenta la información suministrada por las entidades cartográficas y reguladoras de los indicadores ambientales en la región y a nivel nacional presentando las siguientes métricas, teniendo claro que se comprende todo el procesamiento de la información del área de estudio, las cuales se desarrollaron para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en este trabajo.

La energía solar generada por sistemas fotovoltaicos conectados a la red (GCPV) se considera una importante fuente de energía eléctrica alternativa debido a su sistema de producción de energía limpia, su fácil instalación y sus bajos costos de operación y mantenimiento. Sin embargo, encontrar sitios óptimos para la construcción de parques solares es una tarea compleja en la que hay que tener en cuenta muchos factores (ambientales, sociales, legales y políticos, técnico-económicos, etc.), que los modelos clásicos de selección de sitios no abordan de manera eficiente. Existen pocos estudios sobre los criterios que se deben utilizar a la hora de identificar emplazamientos para instalaciones de energía solar (grandes sistemas fotovoltaicos conectados a red que tengan más de 100 kWp de capacidad instalada).

Se aplicó una matriz de evaluación de criterios con base en las categorías de selección e indicadores de inclusión o exclusión teniendo en cuenta el algebra de mapas y cartografía con base a los siguientes criterios:

Tabla 3 *Criterios de localización restrictivos*

Criterio	Subcriterio	Referencia
Técnico	Pendiente (%)	(Jensen & Pedersen, 2017)
Técnico	Radiación (kWh/m^2 día)	(Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018; Aly *et al.*, 2017)
Económico	Vías de comunicación (km)	(Rediske *et al.*, 2020; Sánchez-Lozano *et al.*, 2014)
Económico	Conexión a redes eléctricas (km)	(Aydin *et al.*, 2013; Charabi & Gastli, 2011)
Ambientales	Hidrología (km)	((Aly, Jensen, & Pedersen, 2017); Sánchez-Lozano *et al.*, 2014)
Ambientales	Uso de suelo	(Rediske *et al.*, 2020; Sánchez-Lozano *et al.*, 2014)
Ambientales	Centros poblados (m)	((Sánchez-Lozano, Antunes, García-Cascales, & Días, 2014); Charabi & Gastli, 2011)
Ambientales	Áreas protegidas	((Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018); Aly *et al.*, 2017)

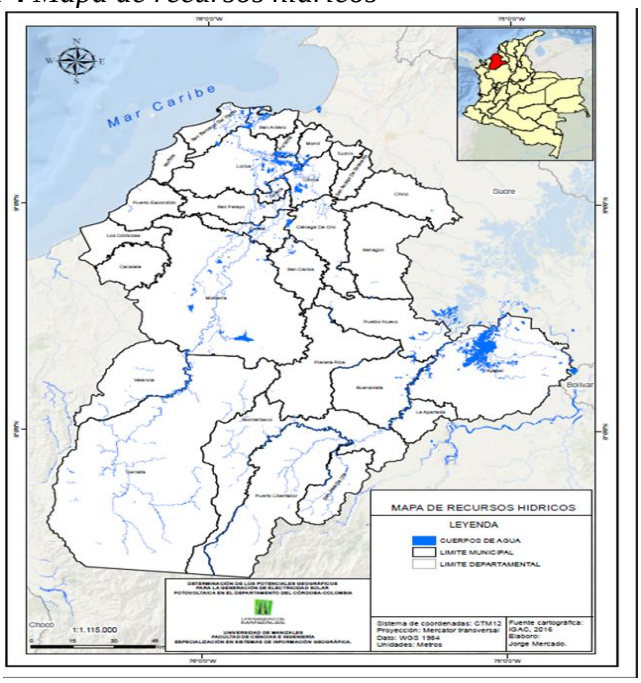
Estas capas se integraron mediante la asignación de pesos a cada subcriterio según su importancia mediante geoprocesamiento, se utilizó el algebra de mapas con la asignación de los valores y criterios, seleccionando a través de geolocalización los puntos de inclusión y exclusión, por tanto, cada asignación permitió generar un punto dentro del mapa para establecer las zonas optimas y representó cada área en el mapa multicriterio.

De allí la importancia de las definiciones de los criterios, las cuales fue producto de la revisión bibliográfica sobre proyectos fotovoltaicos para desarrollarlos a la escala departamental de Córdoba, esto brinda unos resultados más confiables y análisis de las variables de evaluación y exclusión, las cuales se tuvieron en cuenta así:

El conocimiento y la valoración del territorio son vitales para la planificación territorial, que es un proceso complejo, en primer lugar, porque deben tenerse en cuenta factores muy diversos relacionados con el objeto de la planificación, entre las variables se analizan algunas como:

- Variables de exclusión: Fuentes hídricas - cuerpos de agua protegidos.
- Zonas protegidas bosques de reserva, zonas urbanas por tanto se ven impactadas con proyecto solares, redes eléctricas, entre otras, como se catalogaron las siguientes capas de la zona de estudio.

Figura 4 *Mapa de recursos hídricos*

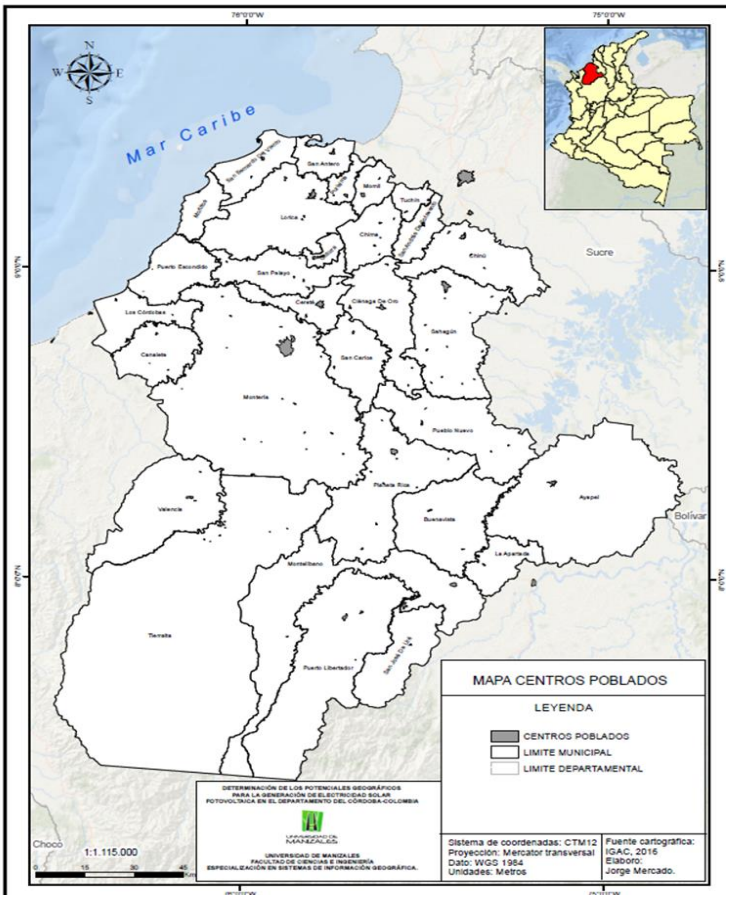


Fuente: (IDEAM, 2021)

El IDEAM instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales, instituto geográfico Agustín Codazzi, IGAC, en los protocolos de caracterización de los cuerpos de agua de Colombia,

ha generado las zonas que están protegidas y declaradas. Este es un mapa de exclusión esta zona no se puede implementar, dado que son los ríos y Ciénegas de Córdoba.

Figura 5 *Cartografía tomada instituto geográfico Agustín Codazzi, IGAC*

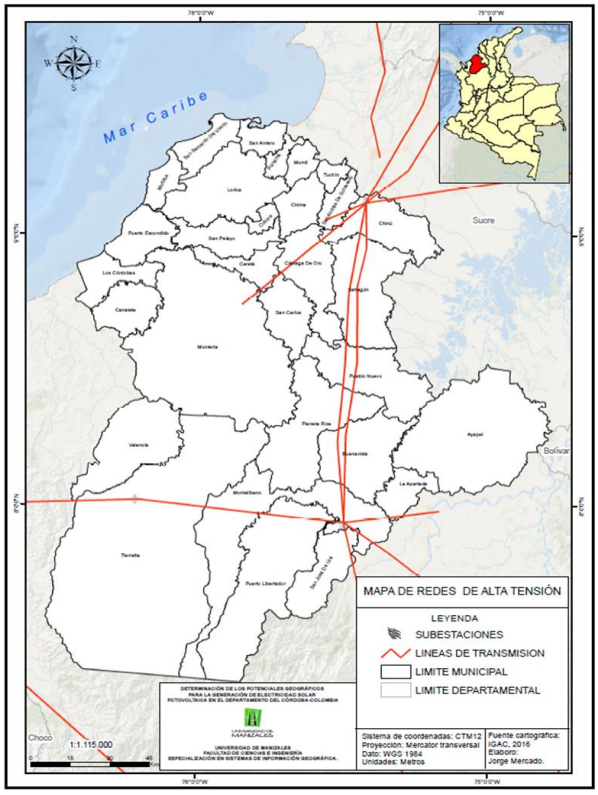


Fuente: Elaboración propia.

Este mapa de zonas urbanas se excluye dado que no se puede construir cerca de casco urbano, esto debido a que los costos de los sistemas fotovoltaicos han caído durante la última década, mientras que los precios de la energía han aumentado. Como resultado, el sistema fotovoltaico se propone como una opción rentable para la generación de energía en el entorno

construido. Sin embargo, algunos autores consideran que todavía se necesita un mejor apoyo regulatorio para desplegar el potencial fotovoltaico en las ciudades (Taylor, 2019).

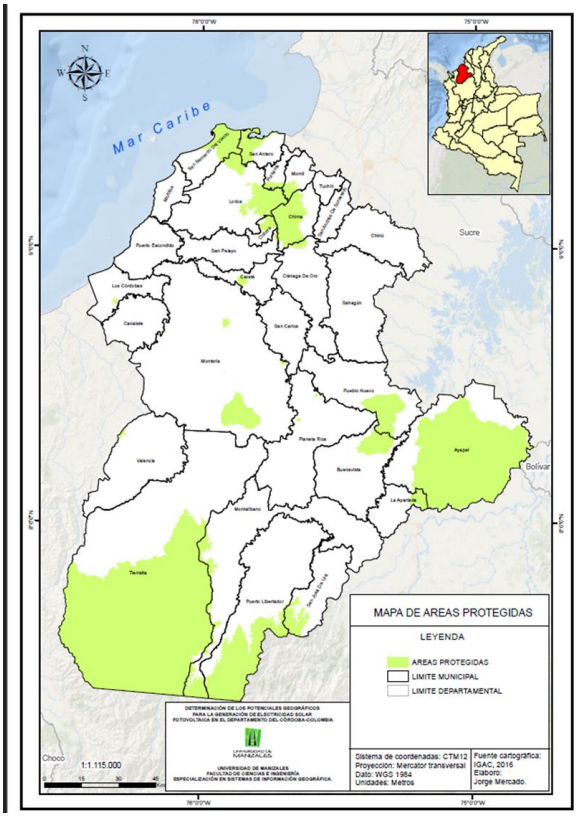
Figura 6 *Mapa de corriente eléctrica*



Fuente. Elaboración propia.

Mapas de redes eléctrica, este mapa es de inclusión, dado que se debe estar a 1 km a partir de estas redes, para tener mayor alcance. Las instalaciones de sistemas fotovoltaicos (PV) reducen efectivamente la carga del cliente y, durante condiciones de carga mínima, pueden exportar energía a la empresa de servicios públicos en una transacción conocida como “medición de energía neta” (MEN). Los integradores de sistemas fotovoltaicos utilizan estas directrices para ayudarles a diseñar sistemas fotovoltaicos que funcionen en paralelo con los sistemas de servicios públicos.

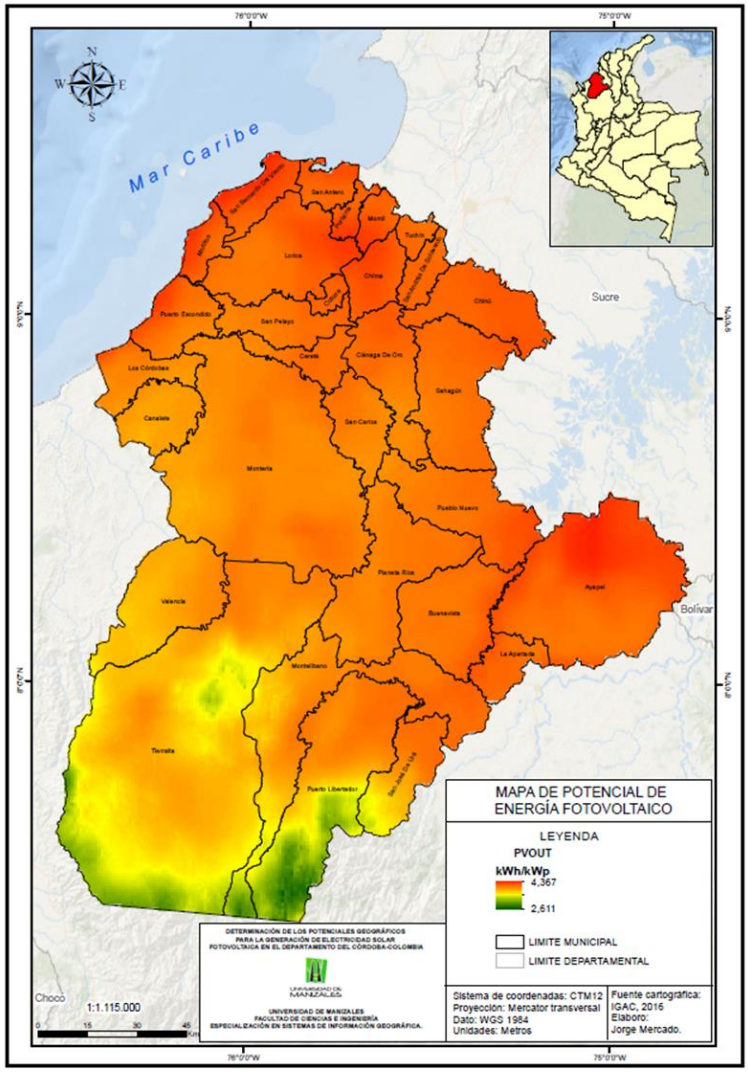
Figura 7 *Mapa área protegida*



Fuente: Elaboración propia.

Áreas protegidas, la información fue tomada por el Agustín Codazzi, información base Agustín Codazzi, aquí se excluye estas áreas, dada que son de protección. Es fundamental cambiar la forma de abordar los procesos de selección de sitios y buscar nuevas metodologías para el análisis de la ubicación. Un sistema de información geográfica (SIG) es una herramienta que puede dar una solución eficaz a este problema. Aquí se combinaron criterios legales, políticos y ambientales, que incluyen la intensidad de la radiación solar, el terreno físico local, el medio ambiente y el clima, así como criterios de ubicación como la distancia a las carreteras y a las subestaciones eléctricas más cercanas.

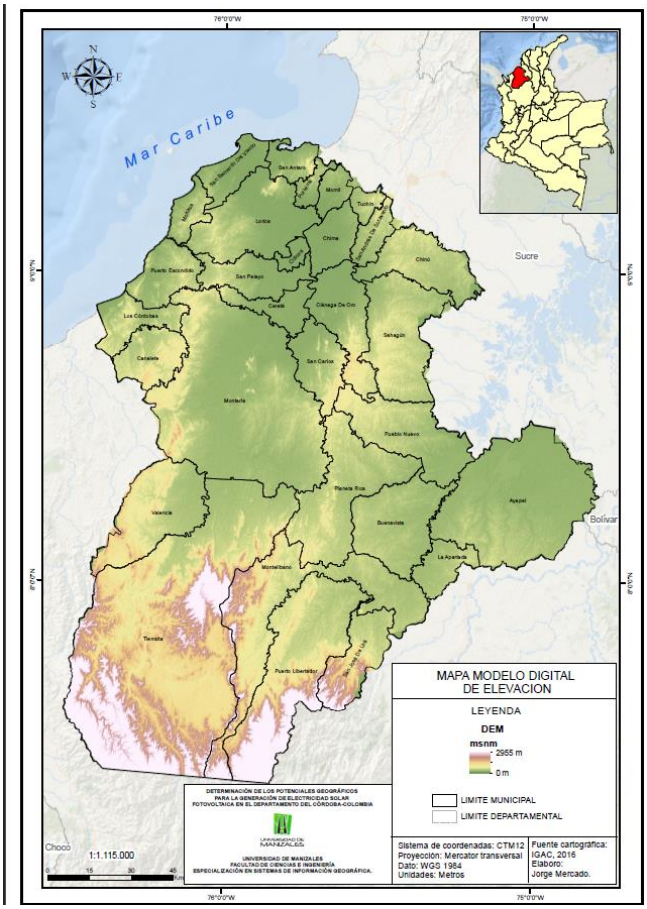
Figura 8 *Mapa zona de radiación solar Córdoba.*



Fuente: Información (SolarGis, 2023)

Mapa de inclusión radiación mayores, a 4,367 kwh/kwp lo que son menores se excluye ejemplo, los colores verdes. La estimación de la energía solar disponible es la clave para maximizar la generación de energía porque se deben seleccionar sitios con alta energía solar disponible. Los enfoques anteriores para la selección del sitio requirieron evitar sesgos subjetivos, a menudo basándose en estimaciones aproximadas donde la topografía no se consideraba completamente.

Figura 9 *Mapa de modelo digital de elevación*

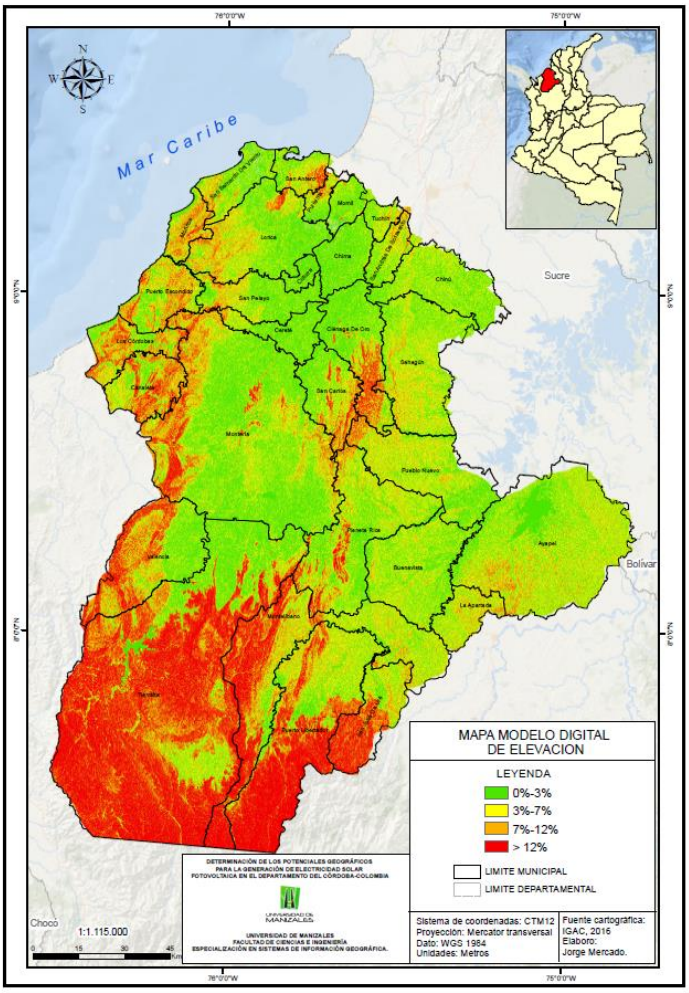


Fuente: Satélite ALOS PALSAR datos abierto, Agustín Codazzi.

En las últimas décadas se han propuesto diferentes técnicas de interpolación para derivar bases de datos espaciales a partir de mediciones de estaciones meteorológicas y climatológicas, como funciones spline. Los modelos puntuales pueden ser muy precisos para una ubicación determinada, pero no para un paisaje completo; simplemente no es posible construir un modelo específico para cada ubicación en un paisaje. en Se debe tener en cuenta que cada punto presenta diferentes posiciones relativas a la órbita del Sol y diferentes geometrías reportan diferentes horizontes artificiales. Por el contrario, los modelos basados en áreas calculan la insolación de un

área geográfica, calculando la orientación de la superficie y los efectos de sombra a partir de un modelo de elevación digital (Rivera, 2017).

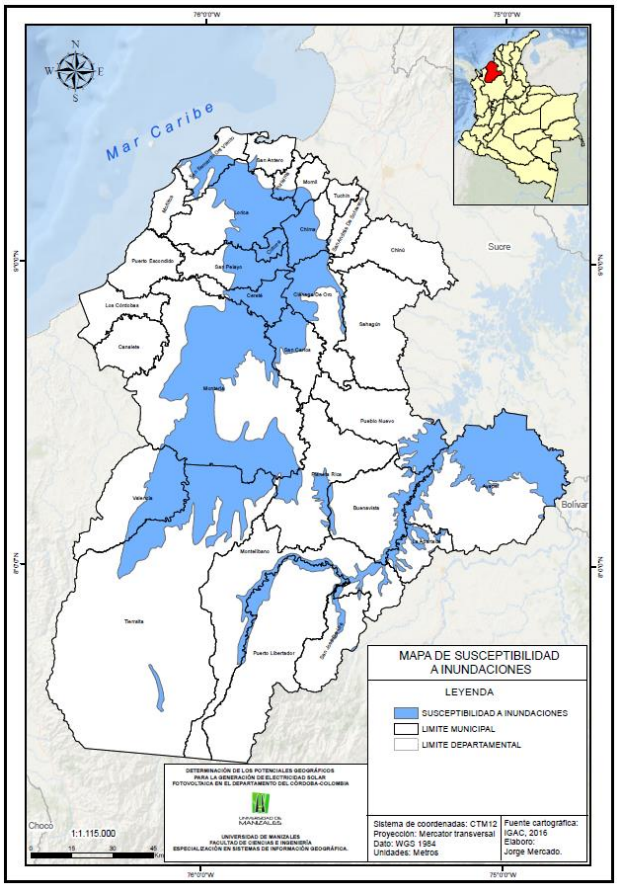
Figura 10 *Mapa de pendiente*



Mapa de pendiente, este se realizó el proceso a partir de la utilización del DEM, mapa anterior se sacaron mediante el software. Mapa de exclusión a partir de mayores a 12% se va a excluir. Por tanto, la variación espacial de la energía solar es crucial para la estimación del potencial regional y la selección del lugar de focalización. De allí que el uso de un mapa cuadriculado de radiación solar de alta resolución combinado con otros factores de restricción para

evaluar el análisis potencial integral de la generación solar fotovoltaica a escala regional, con el fin de presentar un marco de herramienta de apoyo a la toma de decisiones (Aguilera, 2018).

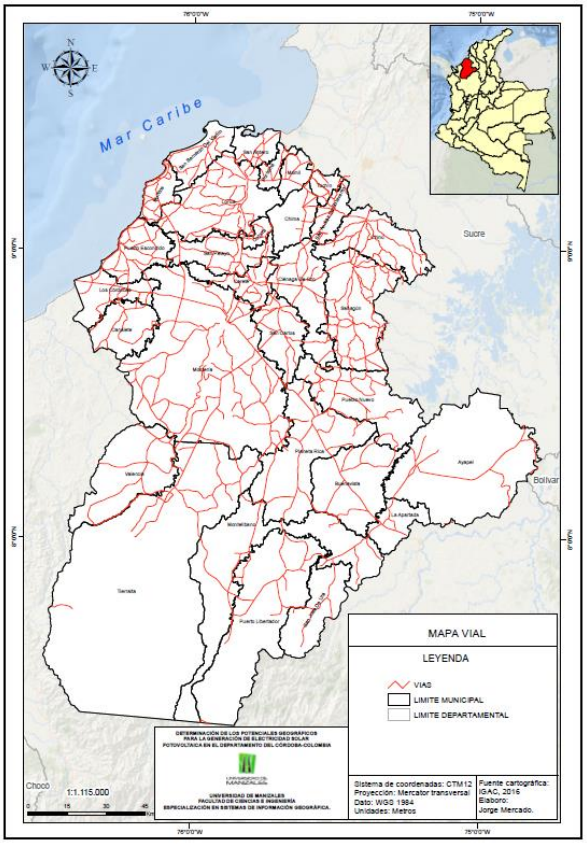
Figura 11 *Mapa de susceptibilidad de inundación*



Fuente: Datos descargado del IDEAM, mapa base IGAC.

Esta zona según la guía se excluye Las inundaciones son uno de los tipos más frecuentes de catástrofes naturales y pueden causar grandes daños a la infraestructura y al medio ambiente natural. El método principal de gestión del riesgo de inundaciones es el mapeo de susceptibilidad que proporciona una evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad de una región a las inundaciones.

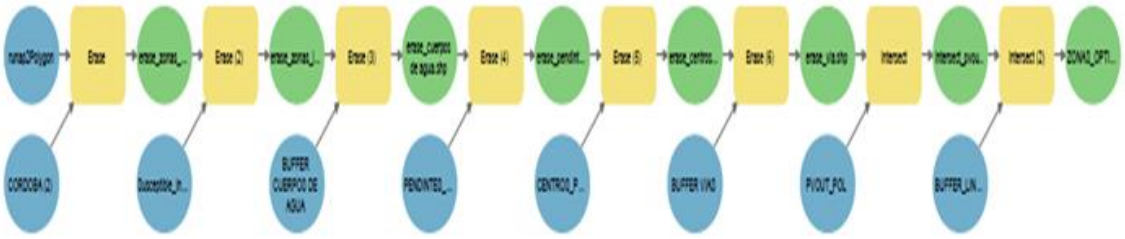
Figura 12 *Mapa vial, a partir del IGAC y base Agustín Codazzi.*



Se debe excluir de vías a menos de unos 500 metro. A medida que las ciudades están cada vez más densamente pobladas y demandan más energía, la tecnología fotovoltaica integrada en infraestructura ha ganado más interés por parte de investigadores, empresas e instituciones gubernamentales. Lo que ofrece, además de los sistemas fotovoltaicos convencionales, es la solución al problema de la limitación del terreno. De hecho, proporcionar energía con una densidad energética razonable a partir de la tecnología fotovoltaica requiere una gran cantidad de terreno en referencia, es allí donde se documenta la exclusión y las zonas que no poseen las características para ser ubicados en ellos paneles solares. A partir de tener toda esta base cada mapa se hizo un proceso, los mapas como ejemplo.

7.2 Variables de acuerdo con los criterios establecidos bajo la metodología algebra de mapas

El álgebra de mapas es un conjunto general de convenciones, capacidades y técnicas que han sido ampliamente adoptadas para su uso con sistemas de información geográfica (SIG), por tanto, el proceso de combinar y transformar información de diferentes capas ráster se llama álgebra de mapas.



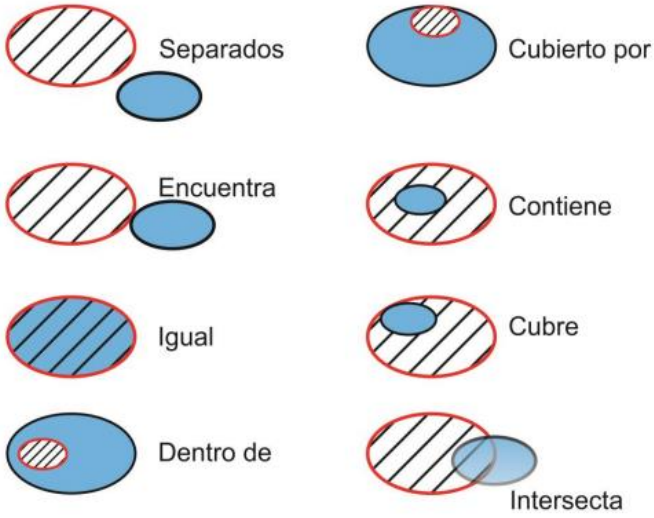
La variación espacial de la energía solar es crucial para la estimación del potencial regional y la selección del lugar de construcción. La información se puede utilizar de forma selectiva, p. combinando dos o más capas y luego creando una nueva capa. En su forma más simple implica sumar, restar, multiplicar o dividir información. Las expresiones más complejas pueden incluir el uso de paréntesis y múltiples operadores en la misma declaración, de allí, que la solución generalmente adoptada para mejorar el SIG en la toma de decisiones espaciales consiste en acoplarlo con otras herramientas informáticas y de investigación operativa. Entre estas herramientas, el análisis multicriterio es naturalmente la más adecuada. El análisis multicriterio (ACM) se define en términos generales como “una ayuda para la toma de decisiones y una herramienta matemática que permite comparar diferentes alternativas o escenarios según muchos criterios, a menudo contradictorios, con el fin de guiar a quien toma las decisiones hacia una elección precisa.

De allí, que la disponibilidad de datos geoespaciales ha aumentado significativamente en las últimas décadas. Como resultado, la cuestión de cómo actualizar los datos espaciales en diferentes escalas se ha convertido en un tema atractivo. Una estrategia prometedora es utilizar un conjunto de datos actualizado de mayor escala como referencia para detectar y actualizar objetos modificados representados en un conjunto de datos de menor escala

Sin embargo, es de comprender que la topografía de mapas es una aplicación útil a la psicometría porque un mapa es una abstracción de una variable. La variable implícita en una prueba puede representarse primero como una línea. Es una línea con dirección ilustrada por una flecha.

De allí que, el álgebra de mapas utiliza operaciones similares a las matemáticas. Por ejemplo, puede aplicar matemáticas simples como la suma o la multiplicación para actualizar los valores de las celdas ráster. El tipo más común de álgebra de mapas es una función celda por celda (Gomez, 2021). Este tipo tiene rásteres directamente apilados uno encima del otro (Camara, et al., 2005).

Figura 13 *Relaciones espaciales.*



Nota: (Castellanos, 2017).

Entonces, la función se aplica a las celdas alineadas entre sí. Pero también puedes cambiar la configuración para que no sea sólo celda por celda. Estos son los tipos de operaciones de álgebra de mapas que puede utilizar: Local; Focal; Zonal; Global.

Si las celdas ráster representan la temperatura, pueden ser restadas en diferentes períodos de tiempo. Al utilizar una operación local, puede encontrar la diferencia de temperatura para cada celda ver figura 10. En relación con la importancia de las capas, en el caso de la energía fotovoltaica la metodología de algebra maps, se centra en la radiación solar que es la consideración más importante al instalar plantas fotovoltaicas o CSP. Por lo tanto, es necesario identificar áreas donde la radiación solar es abundante y predecir la distribución espacial y temporal de la radiación solar para una utilización eficaz del recurso solar. Los SIG son muy útiles en análisis espaciales y temporales de recursos solares al implementar tecnologías específicas de ubicación.

El análisis de la radiación solar se puede realizar tanto para puntos como estaciones como para muchos píxeles en un área grande. También podrá realizarse para distritos administrativos específicos. Además del mapeo espacial de la radiación solar, se realizan análisis y visualización en el tiempo. Las consideraciones espaciales y temporales se resumen en la Tabla 1 con base en la literatura revisada.

Por tanto, la variable se define por elementos y personas, pero también se pueden incorporar al mapa otras características útiles. (Andersen y Schreuder, 2001) La mejora continua es irresistible. Los mapas invitan a realizar más correcciones. Cuanta más información se recopile sobre la variable, más precisa será nuestra representación. Finalmente, esta representación pictórica de la variable invita a más abstracciones que generalizan la comprensión.

Es por ello, que a medida que las regulaciones sobre la contaminación ambiental son cada vez más estrictas, existe una creciente necesidad de instalar plantas generadoras que utilicen energía solar. Para aumentar los efectos de la instalación de este tipo de plantas, es necesario priorizar y seleccionar ubicaciones adecuadas para maximizar la generación de electricidad y minimizar los daños que puedan ocurrir. Los resultados de este análisis del sitio pueden ayudar a las empresas de servicios solares, a las empresas de energía y a los responsables políticos a seleccionar sitios potenciales para la construcción de este tipo de instalaciones solares.

7.3 Implementar la evaluación multicriterio que permita la identificación de sitios óptimos para la instalación de plantas solares fotovoltaicos en el departamento del Córdoba.

Se han realizado varios estudios que analizan la información de energía solar en la zona utilizando el mapa de radiación solar existente. Estos estudios no realizan directamente mapas de radiación solar, sino que utilizan mapas de radiación solar existentes para predecir las horas de sol al año o para predecir y comparar la radiación solar regional.

Es preciso establecer, que algunos estudios han comparado los datos solares extraídos del mapa de radiación solar con los datos medidos en la superficie, como la irradiancia horizontal global (GHI), la irradiancia normal directa (DNI), la irradiancia horizontal difusa (DHI) y el índice de claridad promedio diario para verificar. la precisión y aplicabilidad de estos mapas de radiación solar. Los mapas de radiación solar construidos por diversas fuentes como Solargis (Eslovaquia), el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) de EE. UU. y el Programa de Asistencia a la Gestión del Sector Energético (ESMAP) del Banco Mundial se utilizan como base de datos espacial de la energía solar, han permitido utilizar herramientas con base en datos reales y con información precisa en cada zona a revisar.

Con base en las capas analizadas y estudiadas, los resultados de los análisis de los potenciales geográficos y técnicos para la generación de electricidad solar fotovoltaica en el departamento de Córdoba, permitieron establecer que existen zonas específicas para la instalación si diere lugar a ello de plantas de generación de energía solar, pues están fuertemente influenciadas por la radiación solar y la distribución de los recursos solares, los cuales varía considerablemente

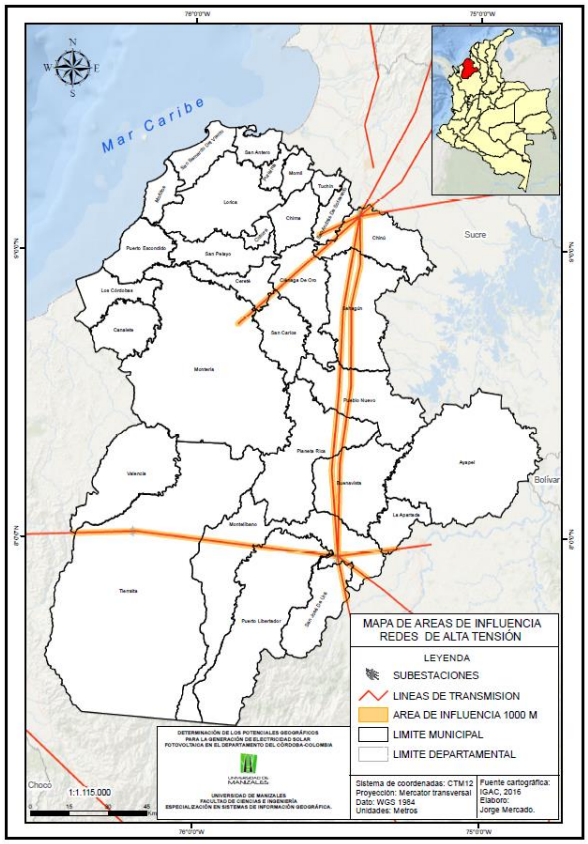
según la ubicación. En la mayoría de los estudios en los que se han utilizado SIG para la selección del sitio, esta radiación solar se ha considerado como una capa de entrada.

Dependiendo del tipo de planta solar se puede distinguir el tipo de radiación solar utilizada para el análisis. Las plantas de energía solar se pueden dividir en plantas fotovoltaicas y plantas de energía solar concentrada. A diferencia de las plantas fotovoltaicas, donde la radiación difusa también es importante, la radiación directa juega un papel importante en las plantas energía solar concentrada. Por lo tanto, el sistema de información geográfica (SIG) se utiliza principalmente para estudios sobre plantas fotovoltaicas y Radiación normal directa, se utiliza principalmente para estudios sobre radiación solar concentrada. En algunos estudios de evaluación de sitios, solo se han analizado las distribuciones generales de energía solar, sin clasificar las plantas fotovoltaicas y las condiciones solares.

Por lo anterior y con el respaldo de conceptos de álgebra de mapas, se implementa un procedimiento de actualización que involucra detección, filtrado y fusión de cambios a través de una serie de operaciones de conjuntos. Además de las funciones tradicionales de superposición de polígonos, para construir operaciones de conjuntos se emplean el modelo de triangulación obteniendo:

Las relaciones probables entre los parámetros relacionados con la radiación se pueden utilizar para mapear la radiación solar global en sitios donde no había datos disponibles. Además, el mapeo de la radiación solar basado en imágenes de satélite se puede realizar utilizando el método certificado y se puede verificar a través de datos de observación, como fue el caso de estudio que se desarrolló para este apartado, logrando generar los mapas de la zona de influencia.

Figura 14 Mapa con buffer o área de influencia de 1 km



Una zona de influencia es un área que rodea una o más entidades del mapa. El tamaño de una zona de influencia puede ser un ancho específico (por ejemplo, 5 millas de una tienda, 1000 pies de una escuela, 1 km de una carretera) o una variable basada en algún atributo (por ejemplo, contiene 10 000 hogares), o como se muestra en la figura 17.

Figura 15 *Mapa a 5 kms.*

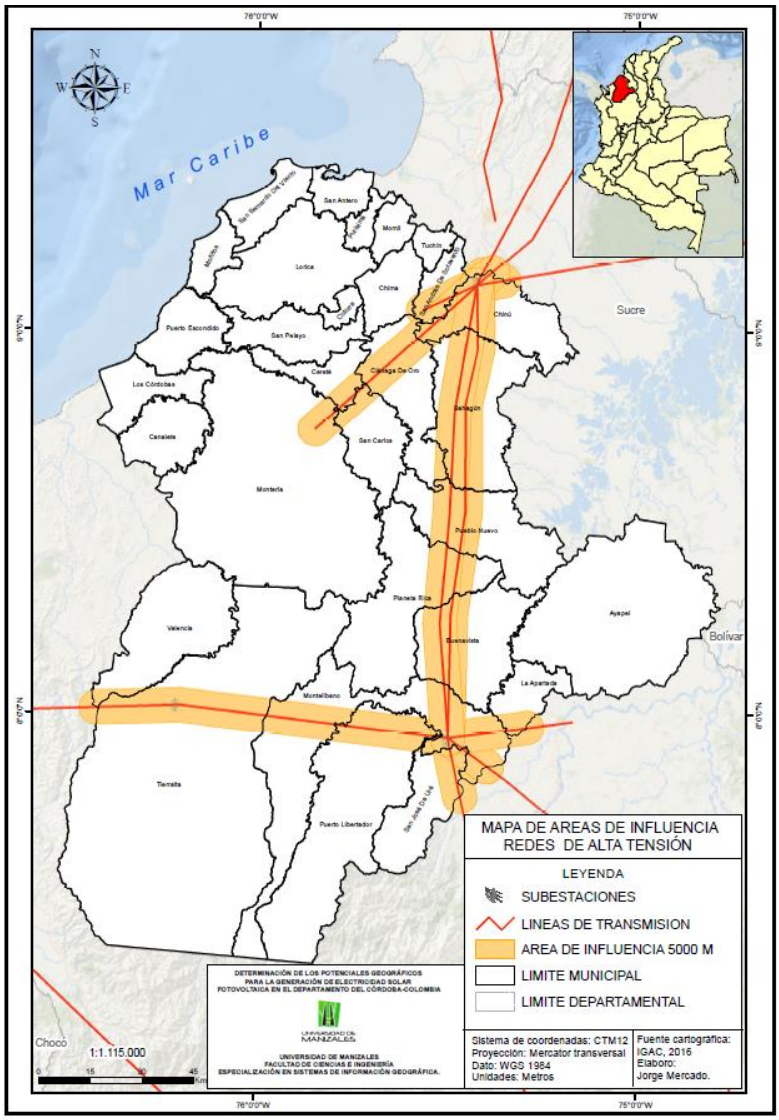
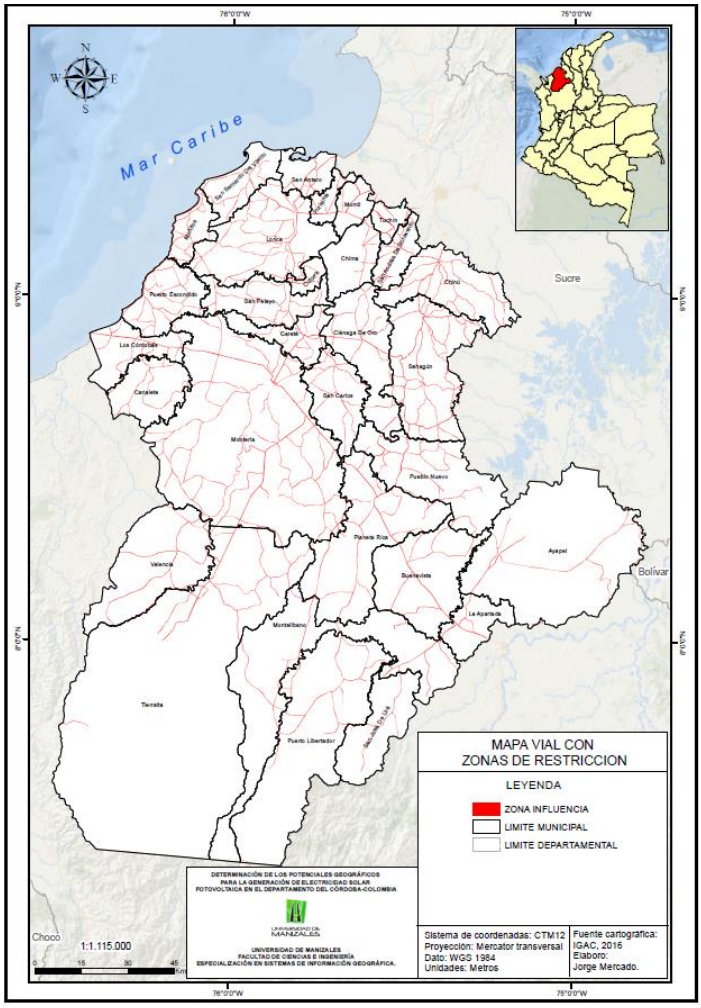
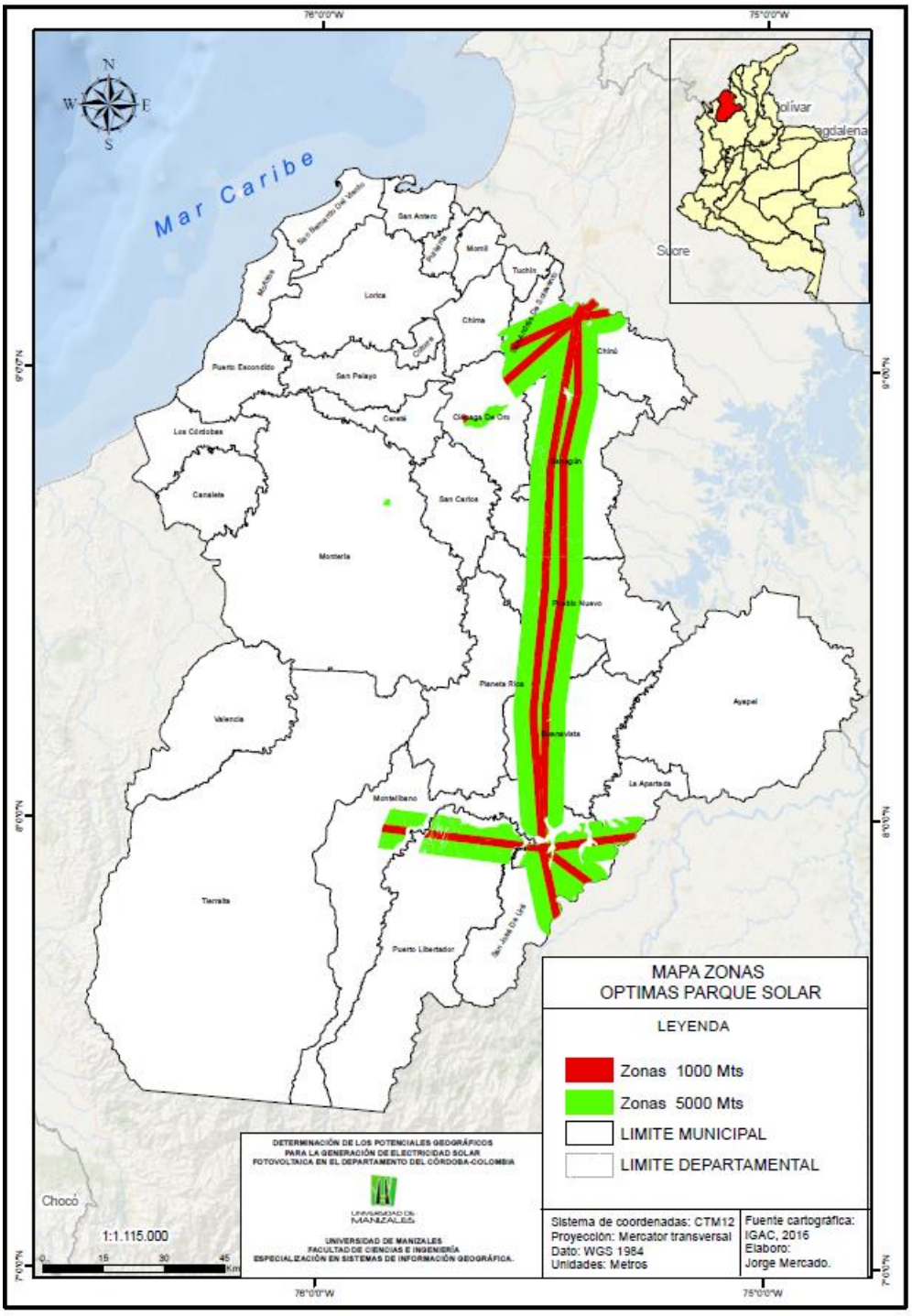


Figura 16 *Mapa de influencia de 3 0 mts de las vías*



Con base en lo anterior y teniendo en cuenta el análisis del modelo cartográfico para la localización de zonas óptimas (figura 17), se presenta el mapa sugerido de las zonas rurales con las características física y climatológicas que permiten la instalación de paneles solares de energía fotovoltaica en el departamento de Córdoba.

Figura 17 *Mapa cartográfico para localización de zonas óptimas*.



8. Conclusiones

Para la realización de la presente investigación se tuvo en cuenta el balance energético del país, determinando en la zona de atención departamento de Córdoba la necesidad de determinar las ubicaciones óptimas a través de un análisis multicriterio para aumentar la capacidad instalada del Sistema Interconectado Nacional - SIN a través de un sistema de energía fotovoltaico, en el desarrollo del mismo, se estableció el uso de la metodología de algebra booleana de mapas para el uso del multicriterio de capas.

Durante todo el análisis de la información se establecieron las variables para la evaluación de exclusión e inclusión de áreas protegidas, zonas urbanas, redes eléctricas, fuentes hídricas, redes viales, entre las que se destacaron las zonas boscosas y de fauna que no pueden ser accedidas con proyectos de esta magnitud, por tanto, se dio a la selección de áreas optimas, de acuerdo con la metodología contrastada de algebra de mapas para la radiación solar.

Una vez establecidas las variables aplicables por capas en cada uno de los mapas, se establecieron los criterios para la selección final, excluyendo las zonas anteriormente mencionadas e incluyendo las que pueden ser objeto de selección, dando por establecido que la evaluación Multicriterio, se establece con base en una serie de conceptos, modelos y métodos para auxiliar a los tomadores de decisiones de acuerdo con variables diversas. Esto hace parte de la decisión multidimensional y los modelos de evaluación que utiliza una estructura matemática basada en la teoría de la optimización multiobjetivo.

Este estudio permitió establecer que el departamento del Córdoba y los departamentos vecinos del norte del país tienen alto potencial para la generación de parques de energía solar a gran escala, puesto que al igual que lo evidenciado en la caracterización de las zonas de inclusión

y exclusión, existe un gran dinamismo en la instalación de generación distribuida solar fotovoltaica.

Con base en lo anterior, se aplicó la combinación de múltiples objetivos y un solo criterio no es una relación lógica y la combinación de múltiples objetivos con múltiples criterios es compleja puesto que los objetivos pueden estar en contraposición y dificultar la solución. De allí, Se utilizó algebra de mapas, el cual se aplicó en el resultado del mapa final, utilizando la metodología de multicriterio, estableciendo con ello el uso del sistema de información geográfica (SIG), la cual es una poderosa herramienta para recopilar, almacenar, gestionar y analizar datos espaciales.

9. Recomendaciones

Se sugiere el uso de herramientas de análisis geográfica y solar a partir de metodologías de multicriterio, en aras de permitir a los futuros egresados mejorar en los análisis de zonificación para proyectos de energía renovable.

10. Referencias

Agencia de Noticias UNAL. (2021). *Primer mapa de zonas aptas para generar energía solar y eólica*. Obtenido de https://agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Primer-mapa-de-zonas-aptas-para-generar-energ%C3%ADa-solar-y-e%C3%B3lica.aspx

Agronet.gov. (2017). *Cesar, con alto potencial de energía solar*. Obtenido de https://www.contextoganadero.com/regiones/cesar-sera-pionero-en-convertir-energia-solar-en-electrica-gran-escala

Aguilera, F. (2018). *El borde urbano territorio complejo*. Obtenido de https://publicaciones.ucatolica.edu.co/pub/media/hipertexto/pdf/el-borde-urbano-con.pdf

Aly, A., Jensen, S., & Pedersen, A. (2017). *Solar power potential of Tanzania: Identifying CSP and PV hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis.* . Obtenido de Renewable Energy, 113, 159-175. : https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.077

Andersen, H., & Schreuder, G. (2001). Automated individual tree measurement through morphological analysis of a LIDAR-based canopy surface model". En *In Proceedings of the First International Precision Forestry Symposium.* (págs. 11-22).

Arancibia, S., Contreras, E., Mella, S., Torres, P., & Villablanca, I. (2016). *Evaluación Multicriterio: aplicación* . Obtenido de https://www.dii.uchile.cl/~ceges/publicaciones/ceges48.pdf

Arencibia, G. (2016). *La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica.* . Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/636/63647456002.pdf

Bernal, S. (2018). *MODELO MULTICRITERIO APLICADO A LA TOMA DE DECISIONES*. Obtenido de https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13894/BernalRomeroSergio2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Bonome, M. (2009). *La racionalidad en la toma de decisiones:*. Obtenido de https://core.ac.uk/download/pdf/61909687.pdf

Buendía, A. (2014). *Caracterización y evaluación económica para la inversión en plantas menores a 20 MW*. Obtenido de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/31089/32070066.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Camara, G., Palomo, D., & Souza, R. (2005). Towards a generalized map algebra: principles and data types", . En I. P. GeoInformatica...

Campo, C., & Rivera, -y. (2020). *DEPARTAMENTO DEL CESAR: OPORTUNIDADES PARA SISTEMAS PRODUCTIVOS SOSTENIBLES*. Obtenido de https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/rdi/article/download/7470/7851/32552

Cardenas, Y., Sarabia, L., & Vargas, d. (2020). *ENERGÍA SOLAR EN LA OPERACIÓN DEL ACUEDUCTO MUNICIPAL DE GONZÁLEZ, DEPARTAMENTO DEL CESAR*. Obtenido de Revista scielo : http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-17982020000100038

Carli, R., Dotoli, M., & & Pellegrin, R. (2018). *Multi-criteria decision-making for sustainable metropolitan cities*. Obtenido de J Environ Manage 226:46–61: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30107310/

Castellanos, A. (2018). *Impacto De La Regulación De Energía Eléctrica En Generación distribuida en países de américa latina y el caribe* . Obtenido de https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/14768/CastellanosToroAndr%C3%A9sFelipe2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Castellanos, L. (2017). *Álgebra de mapas con datos*. Obtenido de https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/153/1/09-Algebra%20de%20Mapas%20con%20Datos%20Vectoriales%20-%20Diplomado%20en%20An%C3%A1lisis%20de%20Informaci%C3%B3n%20Geoespacial.pdf

Castro, A. (2021). *evaluación para proyectos de implementación de sistemas Solares fotovoltaicos en la infraestructura gubernamental de Sabana Centro*. Obtenido de https://intellectum.unisabana.edu.co/bitstream/handle/10818/49532/Tesis%20Ana%20Mar%C3%ADa%20Castro%20Gonz%C3%A1lez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Celadyn, W., & Pawel, F. (2020). *"Investigation of the Effective Use of Photovoltaic Modules in Architecture"*. . Obtenido de Buildings 10, no. 9: 145.: https://doi.org/10.3390/buildings10090145

Celsia. (2021). *Sistema Interconectado* . Obtenido de https://www.celsia.com/wp-content/uploads/2021/02/Documento-de-trabajo-sobre-el-Sistema-Interconectado-Nacional.pdf

CEPAL. (1996). *Manual para la toma de decisiones multicriterio* . Obtenido de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/30558/S9610003_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y

CEPAL. (2021). *Cuarto informe sobre el progreso y los desafíos regionales*. Obtenido de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46682/6/S2100125_es.pdf

Cevallos-Sierra, J., & Ramos-Martin, J. (2018). *Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador.* Obtenido de Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 1154-1165. : https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.015

CODS. (2019). *el costo ambiental de las hidroeléctricas está subestimado*. Obtenido de https://cods.uniandes.edu.co/el-costo-ambiental-de-las-hidroelectricas-esta-subestimado-investigadores-de-la-u-michigan/

Comisión Europea. (2019). *Avances en la Acción Climática de América Latina: Contribuciones Nacionalmente determinadas 2019*. Obtenido de Programa EUROCLIMA+, Dirección General de Desarrollo y Cooperación – EuropeAid, : https://www.cepal.org/sites/default/files/pdf_estudio_avances_agosto_2019_-_21-8v2.pdf

Constitucion Politica de Colombia. (1991). *Articulo 80*. Obtenido de https://www.bcn.cl/procesoconstituyente/comparadordeconstituciones/constitucion/col

Correa, E. (2020). *Metodología para mejorar el comisionamiento de plantas nuevas integrando las normas ISO*. Obtenido de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/77831/71269696.2020.pdf?sequence=9&isAllowed=y

De la Cruz, F., & Mejia, R. (2022). *SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: SOLUCIÓN ENERGÉTICA EN LAS COMUNIDADES AISLADAS*. Obtenido de http://portal.amelica.org/ameli/journal/690/6903714009/html/

DNP. (2022). *CONPES de Transición Energética*. Obtenido de https://www.dnp.gov.co/Prensa_/Noticias/Paginas/aprobado-conpes-de-transicion-energetica-que-consolidar%C3%A1-el-proceso-hacia-un-desarrollo-y-crecimiento-economico-sostenible.aspx

DPN. (2022). *Aprobado CONPES de Transición Energética que consolidará el proceso hacia un desarrollo y crecimiento económico sostenible*. Obtenido de https://www.dnp.gov.co/Paginas/CONPES-de-Transicion-Energetica-que-consolidara-el-proceso-hacia-un-desarrollo-y-crecimiento-economico-sostenible-aprobado.aspx

Effat, H., & El-Zeiny, A. (2022). *Geospatial modeling for selection of optimum sites for hybrid solar-wind energy in Assiut Governorate, Egypt*. Obtenido de The Egyptian Journal of

Remote Sensing and Space Science (Vol. 25, Issue 2, pp. 627–637). : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982322000345

ENel. (2023). *Parques solares en Colombia: ¿por qué son importantes para el país?* Obtenido de https://www.enel.com.co/es/historias/a202306-parques-solares-en-colombia.html

Espitia, C. (2017). *GUIA METODOLOGICA PARA LA IMPLEMENTACION DE SISTEMAS.* . Obtenido de https://repositorio.udes.edu.co/server/api/core/bitstreams/0cb7ae08-d49d-4b94-b9f2-9a8fbb548582/content

European Photovoltaic Industry Association. . (2018). *Electrical capacity for wind and solar photovoltaic power - statistics* . Obtenido de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/94661.pdf

EyL. (2017). *Granjas solares, una alternativa sostenible que toma fuerza en Colombia*. Obtenido de https://revistaempresarial.com/industria/alimentos/granjas-solares-alternativa-sostenible-toma-fuerza-colombia/

EZOIC. (2019). *Energía Solar*. Obtenido de https://solar-energia.net/

Fuglestad, K. (2021). *Energía fotovoltaica integrada en edificios en Noruega, desafíos y estándares.* . Obtenido de https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/87565/Master-s-thesis-Kristine-Fuglestad.pdf?sequence=1

Gaitan, D., & Vargas, E. (2019). *propuesta para la implementación de un sistema fotovoltaico en proyectos de vivienda de interés social.* Obtenido de https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2571/Gait%C3%A1n_Moya_David_Santiago_201

Garces, J. (2015). *Aplicación de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información* . Obtenido de https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/18673/CB-0491731.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Garni, H., Al Garni, H., & Awasthi, A. (2018). *Solar PV Power Plants Site Selection.* . Obtenido de In Advances in Renewable Energies and Power Technologies (pp. 57–75). : https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812959-3.00002-2

Gomez, I. (2021). *Sobre Álgebra de Mapas o Matemáticas Ráster*. Obtenido de https://ecoscript.org/sobre-algebra-de-mapas-o-matematicas-raster/

Gómez, J., Murcia, J., & Cabeza, I. (2017). *La Energía Solar Fotovoltáica en Colombia: Potencialidades, Antecedentes y Perspectivas.* . Obtenido de Universidad Santo Tomás.:

https://docplayer.es/79432495-La-energia-solar-fotovoltaica-en-colombia-potenciales-antecedentes-y-perspectivas.html

Gómez, M., & Barredo, J. (2006). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio.* Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/31772457_Sistemas_de_informacion_geografica_y_evaluacion_multicriterio_en_la_ordenacion_del_territorio_segunda_edicion

Gonzales, T. (2015). *Integracion de las energias renovables*. Obtenido de http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf

Grajales, A., Serrano, E., & Hahn, C. (2013). *Los metodos y procesos multicriterio para la evaluacion* . Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/3217/321728584014.pdf

Hal, H., & Orvis, R. (2018). *Designing climate solutions: a policy guide for low-carbon energy.* . Obtenido de Washington: Island Press. isbn: 978-1-61091-956-2.: https://www.researchgate.net/publication/333349587_Designing_Climate_Solutions_A_Policy_Guide_for_Low-Carbon_Energy

Hanna, k., & McGuigan, E. (2016). *A Gap Analysis of Impact and Assessment Research.* . Obtenido de https://renewableenergy.usask.ca/CEAR---Gap-Analysis.pdf

IAEA. (2022). *Sistemas De Energía Híbrida Nuclear-Renovable*. Obtenido de https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB2041_web.pdf

IDEAM. (2021). *Protocolo de monitoreo*. Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023773/023773.pdf

Jankowski, P. (1995). *Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods*. Obtenido de https://doi.org/10.1080/02693799508902036

Jimenez, H. (2018). *Energía, cambio climático y desarrollo sostenible*. Obtenido de https://co.boell.org/sites/default/files/2020-06/HBS%20-%20ECCD%20web%20color.pdf

Leon, J. (2011). *EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE PROYECTOS DE DESARROLLO* . Obtenido de https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001413.pdf

Ley 143. (1994). *régimen para la generación, interconexión, trasmisión de energia electrica* . Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4631

Ley 1715 . (2014). *Integracion de energias renovables* . Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353

Ley 2099 . (2021). *Disposiciones de la transicion energetica* . Obtenido de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_2099_2021.html

Ley 2169 . (2021). *Carbono neutralidad* . Obtenido de https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30043747

Ley 697. (2001). *uso racional y eficiente de la energia*. Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449

Mejia, Y. (2021). *estimación del potencial de generación de energía solar en el norte del caribe colombiano*. Obtenido de https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/10199/1193407200.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Middelhauve, L., Girardin, F., & Baldi, F. (2021). *Potential of Photovoltaic Panels on Building Envelopes for Decentralized District Energy Systems.* Obtenido de https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.689781/full

MinAmbiente. (2020). *METODOLOGÍA GENERAL PARA LA ELABORACIÓN Y PRESENTACIÓN DE ESTUDIOS AMBIENTALES*. Obtenido de https://www.andi.com.co/Uploads/Metodologi%E2%95%A0%C3%BCa%20General%20para%20la%20Elaboracio%E2%95%A0%C3%BCn%20y%20Presentacio%E2%95%A0%C3%BCn%20de%20Estudios%20Ambientales.pdf

MinMinas. (2018). *REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE)*. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/documents/8862/Anexo_General_RETIE_propuesto_1.docx

MinMineria. (2021). *Fuentes No Convencionales de Energía Renovable - FNCER*. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/es/misional/fuentes-no-convencionales-de-energ%C3%ADa-renovable-fncer/

MinMineria. (2021). *Transición energética:*. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/documents/5856/TRANSICION_ENERGETICA_COLOMBIA_BID-MINENERGIA-2403.pdf

Muñoz, Y., & Acebedo, G. (2019). *Evaluación del potencial de energía solar en Santander, Colombia.* Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/337456682_Evaluacion_del_potencial_de_energia_solar_en_Santander_Colombia

ONU. (2019). *Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna*. Obtenido de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/

ONU. (2022). *Cifras del cambio climatico* . Obtenido de https://www.un.org/es/actnow/facts-and-figures

Pacheco, F. (2018). *Modelo de gestión estratégica para la industria de energías renovables bajo el escenario de cambio de la matriz energética del Ecuador* . Obtenido de https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/6451/1/T2761-MBA-Pacheco-Modelo.pdf

Pep, M. (2007). *Energía solar fotovoltaica (2007) - FENERCOM*. Obtenido de https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2007/09/Cuadernos-energias-renovables-para-todos-solar-fotovoltaica-fenercom.pdf

Posada, H. (2015). *EVALUACIÓN MULTICRITERIO Y SIG. COMO HERRAMIENTAS PARA LAGESTIÓN TERRITORIAL*. Obtenido de https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:UJ-f5_AoascJ:https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2270/2015heidyposada.pdf%3Fsequence%3D12%26isAllowed%3Dy&cd=9&hl=es-419&ct=clnk&gl=co

Reyes, A. (2013). *LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO COMO INSTRUMENTO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*. Obtenido de https://es.studenta.com/content/110936369/la-evaluacion-multicriterio-como-instrumento-de-los-sistemas-de-informacion-geog

Ríatiga, E. (2016). *APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS Y RADIACIÓN SOLAR EN EL COLEGIO TÉCNICO VICENTE AZUERO* . Obtenido de https://www.studocu.com/co/document/universidad-industrial-de-santander/modelamiento-y-simulacion/aprovechamiento-e

Rios, R., & Duarte, S. (2021). *Selection of ideal sites for the development of large-scale solar photovoltaic projects through Analytical Hierarchical Process – Geographic information systems (AHP-GIS) in Peru.* . Obtenido de In Renewable and Sustainable Energy Reviews: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121005979

Rivera, J. (2017). *Analisis de unidades de paisaje y evaluacion de impacto ambiental*. Obtenido de https://www.redalyc.org/journal/3217/321753629010/html/

Rodriguez, L., & Oidor, W. (2014). *IDENTIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD TERRITORIAL* . Obtenido de https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/6c52823d-c6a2-4db3-ae72-f4e9d752e653/content

Sampieri, R., Fernandez, C., & Baptista, P. (2003). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. *McGraw-Hill.*, 80 - 96.

Sanandres.gov. (2021). *Ubicación gráfica* . Obtenido de https://www.sanandres.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=116

Sánchez-Lozano, J., Antunes, H., García-Cascales, M., & Días, L. (2014). *GIS-based photovoltaic solar farms site selection using Electric-Tri: Evaluating the case for Torre Pacheco, Murcia, Southeast of Spain.* . Obtenido de Renewable Energy, 66, 478-494. : https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.038

Sarmiento, N., Belmonte, S., Dellicompagni, P., Franco, J., Escalante, K., & Sarmiento, J. (2019). *A solar irradiation GIS as decision support tool for the Province of Salta, Argentina.* . Obtenido de In Renewable Energy (Vol. 132, pp. 68–80).: https://doi.org/10.1016/j.r

SolarGis. (2023). *Mapa radiacion* . Obtenido de https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/overview

Sosa-Franco, I., Pérez-Guerra, G., Machado-García, N., & Pérez, M. (2023). *Método para el procesamiento de consultas en un Sistema de Información Geográfica*. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542023000200008&script=sci_arttext&tlng=es

Taylor, M. (2019). *Renewable Power Generation Costs in 2019: Latest Trends and Drivers.* . Obtenido de International Renewable Energy Agency (IRENA).: https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019

UNESCO. (2020). *Con el aumento poblacional y de la economía, el incremento de la demanda de energía contribuye a un aumento de alrededor de 30 Gg/año de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, razón por la cual la descentralización de las soluciones para*. Obtenido de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611

UPME . (2021). *Balance Energético Colombiano BECO*. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO.aspx

UPME. (2019). *Cobertura energia* . Obtenido de http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion_Cobertura_Energia.pdf

UPME. (2019). *PLAN ENERGÉTICO NACIONAL*. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf

Vanegas, M., Churrio, O., Valencia, G., Villacaña, L., & Ospino, A. (2016). *Cálculo de las radiaciones total, directa y difusa a través de la transmisibilidad atmosférica en los departamentos del Cesar, La Guajira y Magdalena (Colombia)*. Obtenido de https://www.revistaespacios.com/a17v38n07/17380703.html

Vassilev, V., Genova, K., & Vassileva, M. (2005). *Un breve estudio sobre métodos de toma de decisiones y sistemas de software multicriterio.* Obtenido de Cibernética y Tecnologías de la Información, 5 (1), 3-13: https://cit.iict.bas.bg/CIT_05/v5-1/3-13.pdf

A. Anexo: Nombrar el anexo A de acuerdo con su contenido

Los Anexos son documentos o elementos que complementan el cuerpo del trabajo y que se relacionan, directa o indirectamente, con la investigación, tales como acetatos, cd, normas, etc. Los anexos deben ir numerados con letras y usando el estilo “Título anexos”.

B. Anexo: Nombrar el anexo B de acuerdo con su contenido

Al final del documento es opcional incluir índices o glosarios. Éstos son listas detalladas y especializadas de los términos, nombres, autores, temas, etc., que aparecen en el trabajo. Sirven para facilitar su localización en el texto. Los índices pueden ser alfabéticos, cronológicos, numéricos, analíticos, entre otros. Luego de cada palabra, término, etc., se pone coma y el número de la página donde aparece esta información.