

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

**ÓSCAR ANDRÉS MEDINA HERNÁNDEZ
PAOLA ANDREA ANAYA**

Director:

Ph.D. José Fernando Mejía Correa

Análisis y Modelamiento Espacial

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2023

Agradecimientos

© 2017 The World Bank, Solar resource data: Solargis.”

Página web: <https://solargis.com/es>

Especificaciones Técnicas (<https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/tech-specs>)

Resumen

La Evaluación multicriterio - EMC aplicada a la localización de sitios óptimos para el establecimiento de granjas solares en el departamento del Cesar (Colombia) estima los criterios de evaluación y de exclusión pendientes, zonas urbanas, potencial de energía fotovoltaico, cuerpos hídricos, redes de alta tensión pertenecientes al Sistema Interconectado Nacional (SIN), vías, áreas protegidas y zonas susceptibles de inundación. Se construyó un modelo utilizando el Método de Jerarquías Analíticas (AHP) de Saaty como insumo para la evaluación de los criterios dentro de un entorno de Sistemas de Información (SIG) mediante el uso del software ArgGIS.

Se realiza la superposición de los criterios obteniendo la superposición ponderada de las variables que indica los sitios óptimos para el establecimiento de proyectos de granjas solares fotovoltaicas.

Palabras clave: Evaluación Multicriterio - Sistemas de Información Geográfica - Criterios de Evaluación - Criterios de Exclusión - Método de Jerarquías Analíticas (AHP)

Abstract

Multicriteria Evaluation - MCE applied to the localization of optimal sites for the establishment of solar farms in the department of Cesar (Colombia) estimates the evaluation and exclusion criteria slopes, urban areas, photovoltaic energy potential, water bodies, high voltage grids belonging to the National Interconnected System (NIS), roads, protected areas and areas susceptible to flooding. A model was built using Saaty's Analytical Hierarchy Method (AHP) as input for the evaluation of the criteria within an Information Systems (GIS) environment using ArgGIS software.

The overlapping of the criteria is performed by obtaining the weighted overlapping of the variables that indicates the optimal sites for the establishment of solar photovoltaic farm projects.

Keywords: Multicriteria Evaluation, Geographic Information Systems, Evaluation Criteria, Exclusion Criteria, Analytic Hierarchy Process

Contenido

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.....	9
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA	9
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.3 JUSTIFICACIÓN	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GENERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3. ANTECEDENTES	14
3.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN	14
3.2 CRITERIOS DE EXCLUSIÓN	19
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL	23
5. REFERENTE TEÓRICO	25
5.1 DE ENERGÍA RADIANTE A ENERGÍA LUMÍNICA	25
5.2 POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	27
5.3 EVALUACIÓN MULTICRITERIO	29
5.3.1 <i>Pesos para los criterios</i>	35
5.3.2 <i>Método de comparación por pares:</i>	36
5.3.3 <i>Métodos de evaluación multicriterio</i>	38
5.3.4 <i>Evaluación Multicriterio con Método de Jerarquía Analítica</i>	40
6. METODOLOGÍA.....	43
6.1 ENFOQUE METODOLÓGICO.....	43
6.2 TIPO DE ESTUDIO.....	43
6.3 PROCEDIMIENTO	44
6.3.1 <i>Identificación de Criterios</i>	46
6.3.2 <i>Evaluación de los criterios</i>	62
6.3.3 <i>Mapa de Superposición Ponderada</i>	82
7. RESULTADOS	83
8. CONCLUSIONES	87
9. RECOMENDACIONES	90
10. REFERENCIAS.....	91

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1	27
Tabla 2	33
Tabla 3	36
Tabla 4	37
Tabla 5	46
Tabla 6	63
Tabla 7	64
Tabla 8	66
Tabla 9	67
Tabla 10	69
Tabla 11	71
Tabla 12	73
Tabla 13	73
Tabla 14	75
Tabla 15	77
Tabla 16	79
Tabla 17	81
Tabla 18	82

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	Coficiente	1	Tabla 3-1

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\square_{\square\square}$	Factor de superficie	$\frac{m^2}{g}$	$(W_{F,wat})(A_{BET})$
\square_{\square}	Grado de formación del componente i	1	$\frac{m_j}{m_{bm} \varrho}$
\square	Wandhafreibwinkel (Stahlblech)	1	Sección 3.2
\square	Porosidad de la partícula	1	$1 - \frac{\rho_s}{\rho_w}$
\square	mittlere Bettneigungswinkel (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**

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

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

1.1 Descripción del área problemática

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

Al año 2019 la oferta de energía primaria en Colombia estuvo compuesta mayoritariamente por energías provenientes del petróleo y carbón con un 76% mientras que el restante 24% lo conforman energías provenientes de hidroeléctricas y las fuentes no convencionales de energía renovable como bagazo, biocombustibles y leña. El consumo final de energía de todos los sectores estuvo alrededor de 1.309 PJ/año para el 2019 y 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. (Balance Energético Colombiano 2019. Recuperado de:

https://www1.upme.gov.co/Documents/Balance_energetico_colombiano_beco.pdf)

Con el aumento poblacional y de la economía se espera que el incremento de la demanda de energía contribuya 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 el mismo problema, 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.

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.

Determinar los sitios que, por sus características geográficas, de uso de suelo, sociales y ambientales, sean óptimos para el establecimiento de proyectos de producción de energía solar es 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.

Para el departamento del Cesar se encuentra la empresa Afinia quien ejerce funciones de operador de red en Transmisión y Distribución de energía eléctrica; 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.

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.

Diferentes estudios indican que el departamento del Cesar y los departamentos vecinos del norte del país tienen alto potencial para la generación de parques de energía solar a gran escala. 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 Cesar tiene alto potencial para la generación de energía solar en el contexto nacional.

1.2 Formulación del problema

Es necesario determinar cuáles son los sitios ideales para el establecimiento de granjas solares en el departamento del Cesar por métodos de análisis espacial teniendo en cuenta criterios hallados en la literatura que sean aplicables al contexto local.

¿Cómo estimar las áreas ideales que ofrezcan condiciones técnicas adecuadas para un óptimo funcionamiento de soluciones fotovoltaicas a la vez que se considera generar el menor impacto socioambiental?

1.3 Justificación

La importancia de las granjas solares radica en el beneficio del uso de la energía fotovoltaica como fuente de energía renovable con menor impacto al medio ambiente, con menores costos económicos.

Tal ha sido el impacto de la energía solar, que en los últimos 15 años ha logrado posicionarse como la energía renovable más utilizada 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. (Agencia Internacional de las Energías Renovables IRENA s.f.)

Una adecuada ubicación de las plantas solares fotovoltaicas previene y mitiga los impactos y efectos negativos que puede generar la construcción e instalación de este tipo de proyectos sobre el medio ambiente y el medio social por lo que la localización es una consideración para la presentación de estudios dentro de los términos de referencia para la elaboración de estudios de Impacto Ambiental. (Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA en proyectos de uso de energía solar fotovoltaica, Agencia Nacional de Licencias Ambientales, 2017. Recuperado de:

https://www.anla.gov.co/images/documentos/terminos_referencia/anexo_tdr_solar_ajustado_26072017vf.pdf).

En este tipo de proyectos con una envergadura de al menos 5MW, la selección de sitio es un paso complejo y determinante para asegurar la viabilidad del proyecto siendo parte de un estudio de prefactibilidad. Comúnmente se debe considerar aspectos técnicos, sociales y ambientales que permitan determinar la superficie total disponible con la máxima producción y rentabilidad eléctrica anual posible. (Ríos, et al., 2121).

Por lo expuesto anteriormente, conocer el sitio adecuado es de importancia para los tomadores de decisiones, los evaluadores sociales y ambientales y las entidades gubernamentales que buscan una transición energética adecuada para el país.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

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

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 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 Cesar.

3. Antecedentes

A continuación, se presentan una serie de trabajos de investigación que abordan la temática de ubicación de paneles solares a gran escala. Se presentan los Criterios de Evaluación y los Criterios de Exclusión. Posteriormente se abordan los métodos empleados para la determinación de los sitios con los insumos necesarios.

3.1 Criterios de Evaluación

En los Criterios de Evaluación se estima la influencia de las características climáticas del lugar y las condiciones que, estando presentes, mejoran la optimización de la selección de los sitios.

Radiación solar

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 (Effat et al., 2022 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 et al., 2021) considera que esta radiación solar puede estar en 4,6 kWh/m² el valor ideal medio diario anual mientras que Gialamaki M. (citado en Ríos et al., 2021) establece en 4,9 kWh/m² este valor ideal medio diario anual.

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)

Duración de la luz solar

Doorga JRS (Ghose et al., 2020) manifiesta que las horas de sol recibidas en una zona puede diferir de otra debido a variaciones en los sistemas de nubes y los microclimas característicos presentes. Dolka y Stanojevic (citado en Hassan et al., 2020 pp. 453) argumentan que, entre otros factores, una mayor duración de la luz solar favorece la ubicación de los sistemas fotovoltaicos.

Temperatura y Humedad Relativa

En el estudio *Selection of ideal sites for the development of large-scale solar photovoltaic projects through Analytical Hierarchical Process – Geographic information systems (AHP-GIS)* in Peru, la temperatura ambiente se considera una variable importante porque incide en el voltaje y en las baterías que contienen los paneles solares. (Ríos et al., 2021).

En estudio para el Diseño de Sistemas de Energía Solar Fotovoltaica - Aplicación en el Perú, se anuncia que el voltaje sufre una disminución con el aumento de la temperatura por lo que el rendimiento del panel disminuye con la temperatura a condiciones nominales de operación

de 25°C. (Ríos et al., 2021). Sin embargo, la temperatura ambiental superior a 30°C afecta significativamente las celdas de los paneles solares como se manifestó en el estudio *Large Scale PV Sites Selection by Combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case Study: Eastern Morocco*. Para estos autores la temperatura junto a la radiación solar son los factores más importantes a tener en cuenta. (Merrouni et al., 2018).

Según el estudio para la Selección óptima del sitio para plantas de energía fotovoltaica utilizando una toma de decisiones de criterios múltiples basada en GIS y superposición espacial con carga eléctrica, la selección favorable de sitios debe contemplar la ubicación de zonas con temperaturas bajas, logrando con esto garantizar un mejor rendimiento del sistema. (Zambrano, et al., 2021 pp. 4).

Además de la temperatura alta, la humedad relativa interfiere en la eficacia de los sistemas que generan electricidad fotovoltaica. (Yushchenkoa, et al., 2017). El aumento de la temperatura del aire genera un aumento de las celdas fotovoltaicas disminuyendo la eficiencia, del mismo modo el aumento de la humedad relativa reduce la absorción y penetración de los rayos solares. (Hassan et al., 2020 pp. 453).

Pendiente y orientación

La condición plana del terreno es un factor técnico a tener en cuenta dentro de los criterios de evaluación porque la adecuación de estos sitios con cortes o rellenos eleva los costos de construcción de los paneles solares, por lo que se considera un factor de viabilidad económica. (Zambrano, et al., 2021 pp. 4).

Los cambios en la elevación, la orientación y la proyección de las sombras afectan la luz recibida en la superficie terrestre y la inclinación y la presencia de taludes afecta financieramente

el establecimiento de un proyecto de este tipo por el aumento en los costos para nivelar el suelo, por lo que la topografía es otro criterio para tenerse en cuenta. (Garni et al., 2018).

Redes eléctricas

En el estudio para el Modelado geoespacial para la selección de sitios óptimos para energía híbrida solar - eólica en la Gobernación de Assiut, Egipto, la proximidad de los paneles solares a las redes eléctricas del sistema interconectado y las subestaciones eléctricas que realizan la transformación es un criterio importante para reducir los costos de la construcción de infraestructura adicional ya que se necesita construir menos elementos que garanticen la entrega de la energía generada al sistema interconectado. (Effat et al., 2022 pp. 629)

La cercanía a la red del sistema interconectado nacional permite abastecer a esta de la energía eléctrica producida por los sistemas fotovoltaicos sin invertir grandes cantidades de dinero en la construcción de infraestructura que transforme y conduzca la energía y evitando con esto considerables pérdidas de electricidad por la conducción por lo que se estableció una distancia máxima de un kilómetro de estas redes a los sitios ideales. (Ríos et al., 2021 pp. 5)

Redes viales

En el estudio para el Análisis de idoneidad en GIS para la ubicación de plantas de energía solar en Kuwait, se consideró que, para mejorar la rentabilidad de los proyectos de generación de energía solar, la ubicación de los sitios debe tener en cuenta la proximidad de carreteras. (Hassan et al., 2020 pp. 455). La inmediación de infraestructura vial ya sea nacional, departamental o local facilita las labores constructivas y de mantenimiento y reparación. Se determinó una distancia máxima de cinco kilómetros desde la red vial hasta los sitios potenciales para el establecimiento de proyectos de energía solar. (Ríos et al., 2021 pp. 12). Se determinó adecuado

dejar una distancia máxima de 300 metros entre las plantas de energía renovable y las vías carreteables. (Effat et al., 2022 pp. 629)

3.2 Criterios de Exclusión

Un criterio de exclusión es un factor a tener en cuenta para considerar inadecuados los sitios que no presentan condiciones sociales, ambientales o técnicas adecuadas para instalar una granja solar. Los criterios de exclusión tomados en consideración pueden incluir algunos o todos los ítems que se exponen a continuación, de acuerdo con la revisión bibliográfica. Para este punto no se ha considerado qué aspectos son más preponderantes.

Áreas de importancia ambiental

Por la fragmentación de hábitats, afectaciones al paisaje y posible disminución de la biodiversidad, los proyectos de granjas solares deben tener en cuenta, además de aspectos técnicos que permita un correcto funcionamiento del sistema, conseguir el menor impacto ambiental posible por lo que se debe excluir ciertas zonas con importancia ambiental. (Doljak et al., 2017 pp. 294).

Dentro del estudio Evaluación en GIS de energía fotovoltaica y solar concentrada potencial generación en África Occidental, los autores consideraron las zonas de riesgo de inundación dentro de los criterios, descartando las áreas que presenten un promedio esperado de eventos de inundación en los últimos cien años que igualen o superen a un evento. (Yushchenko et al., 2018 pp. 3).

Los autores (Ríos et al., 2021 pp. 4) consideraron la inclusión, además de áreas naturales protegidas nacionales y regionales, las áreas de conservación privada, las zonas de amortiguamiento, los ecosistemas frágiles, los bosques de producción permanente, los bosques

protectores, las concesiones forestales, los cambios de uso de suelo para fines agrícolas, los cuerpos de agua lénticos y lóticos, los glaciares y los humedales.

Se consideran no aptas para los proyectos fotovoltaicos las clases de suelo con cobertura de tierras cultivadas, el agua y las áreas urbanizadas. En el estudio para Egipto, se consideró sólo los suelos desérticos siguiendo el contexto del estudio. (Effat et al., 2022 pp. 632).

Asentamientos urbanos

Así como con la proximidad a las líneas eléctricas, se considera la proximidad a los asentamientos humanos como un criterio que viabiliza económicamente los proyectos fotovoltaicos. (Hassan et al., 2020 pp. 455; Effat et al., 2022 pp. 632).

La cercanía a la red del sistema interconectado nacional permite abastecer a esta de la energía eléctrica producida por los sistemas fotovoltaicos sin invertir grandes cantidades de dinero en la construcción de infraestructura que transforme y conduzca la energía y evitando con esto considerables pérdidas de electricidad por la conducción; en el estudio realizado para la Selección de sitios ideales para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos de gran escala mediante Proceso Jerárquico Analítico (AHP - GIS) en Perú, se estableció una distancia máxima de un kilómetro de estas redes a los sitios ideales. (Ríos et al., 2021 pp.10).

Se considera mantener una zona de amortiguación de 2000 metros como distancia segura entre el sitio elegido para la construcción de un sistema fotovoltaico y los centros poblados. (Effat et al., 2022 pp. 632).

Por otro lado, se consideró la demanda como el criterio por lo que la proximidad a los centros poblados tuvo gran importancia dentro del estudio. (Yusckenkoa et al., 2019)

Áreas de importancia social

En un resumen de enfoques realizados en otros estudios se pone de manifiesto que sólo unos pocos consideran criterios sociales y de riesgo. (Zambrano, et al., 2021 pp. 3). Sin embargo, se pone en consideración los sitios religiosos. (Dorga et al., citado en Zambrano, et al., 2021 pp. 3). Los aeropuertos y las zonas militares deben considerarse dentro de la investigación si existe disponibilidad y calidad de la información. (Zambrano, et al., 2021 pp. 4)

4. Referente normativo y legal

Acudir a la normatividad para un tema ambiental es tan elemental que va más allá del compromiso, no hay duda de que plantea que para poner un freno a la crisis medioambiental se debe partir con realizar una búsqueda de principios jurídicos sólidos aun cuando las reglas sean particulares. (Serrano, 2008)

A nivel internacional desde hace décadas se viene tratando el tema del cambio climático y sus efectos adversos, tal como lo reconocen en la (Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, 1992) que como objetivo pretende entre las partes de la convención dar un tiempo para estabilizar las concentraciones de gases de invernadero en la atmósfera asegurando que la producción de alimentos no se vea afectada y que el desarrollo económico prosiga de forma sostenible.

De forma similar existe el protocolo de Kioto que entró en vigor a partir del año 2005 con la intención de reducir de gases efecto invernadero y que de acuerdo con se mencionan informes y predicciones nada alentadores para el cambio climático, además de proponerle a los países adoptar políticas y medidas de mitigación. (Estapà, 2003)

No obstante, se menciona el acuerdo de París celebrado en el año 2015, como uno de los elementos jurídicos más vinculantes en cuanto a la responsabilidad con el cambio climático, ampliando su alcance y comprometiendo a la comunidad internacional con escasa responsabilidad en la generación de gases efecto invernadero y con ello la participación de Colombia frente a estos temas. (Pachón et al., 2017)

Se menciona que en Colombia aún falta reglamentación, pero abordan las siguientes disposiciones encaminadas a la responsabilidad con el medio ambiente:

- Art 3 ley 697 de 2001 uso racional y eficiente de la energía
- Art 3 ley 697 de 2001 las empresas de servicios públicos serán las encargadas de realizar los programas de uso racional y eficiente de energía.
- Art 2 decreto 3683 de 2003 enumera los tipos de energía
- Ley 143 de 1994 menciona las fuentes de energía convencionales y no convencionales
- Decreto 3683 de 2003 y decreto 2688 de 2008 regular la actividad de generación de energía
- Art 20 del Decreto 3683 de 2003 mencionando que las ESP estarán encargadas de imprimir en las carátulas de los servicios públicos con mensajes de URE y los beneficios para con el medio ambiente. (Moreno 2011)

5. Referente teórico

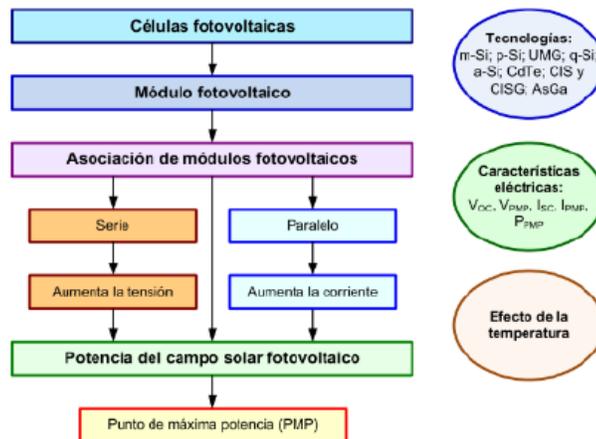
5.1 De energía radiante a energía lumínica

Según la revista Energías renovables para todos (Puig et al., pp. 5) 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 1

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.

5.2 Potencial de Energía Solar Fotovoltaica

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

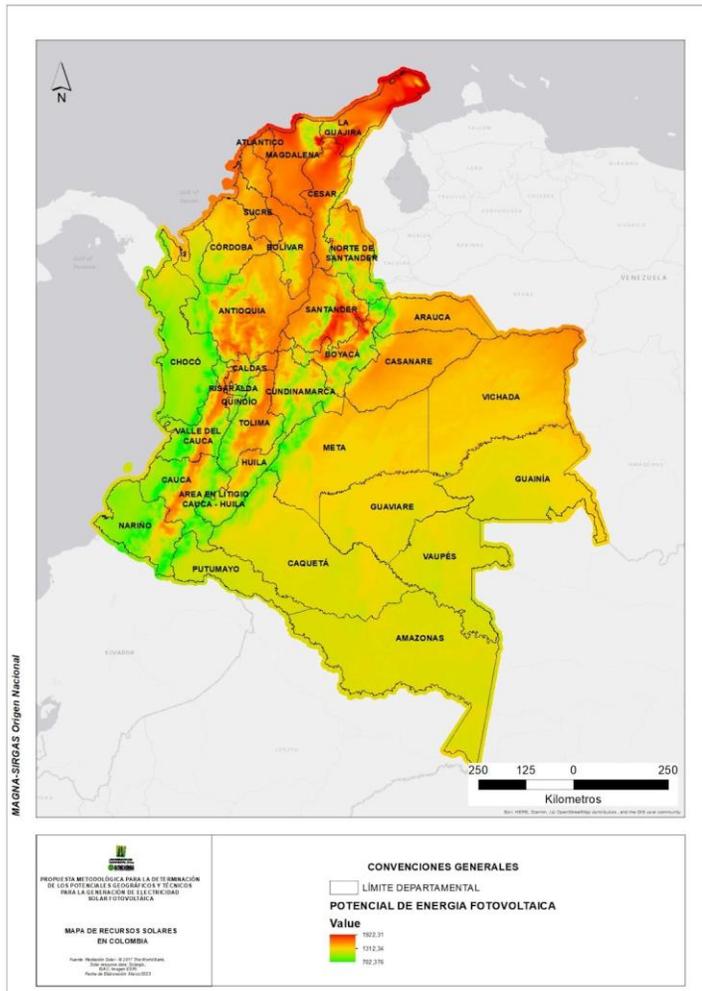
5	Se asume el uso de inversores de alta eficiencia
6	Se estima en un 3,5% las pérdidas en los módulos fotovoltaicos por suciedad
7	Se estima en 7,5% las pérdidas por sombreado de filas, desajuste, inversores, cables, transformadores, etc.
8	Disponibilidad al 100% de centrales eléctricas

Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Técnicas de SolarGIS

Para Colombia SolarGIS ofrece información bajo los supuestos mencionados anteriormente apreciándose un potencial máximo de 1922.31 y un mínimo de 702.376 kWh/kW.

Figura 2

Mapa de Potencial de Energía Fotovoltaico en Colombia



Fuente: Elaboración propia a partir del mapa de Radiación Solar de Solar GIS, Instituto Geográfico Agustín Codazzi

5.3 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).

La Evaluación Multicriterio 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. La Evaluación Multicriterio 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. (Gómez y Barredo, 2006, p.44)

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. (Gómez y Barredo, 2006, p.45)

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.

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.

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 al 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. (Gómez y Barredo, 2006, p.47)

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 realizan o limitan (xij), es aquí donde es importante asignar de valores cuantitativos a las categorías de cada criterio según la consideración del equipo evaluador. Esta etapa es fundamental para obtener un buen resultado pues depende del proceso de evaluación. En la Figura 3 se observa la Matriz de Evaluación.

Figura 3

Matriz de evaluación

	Alternativas					
		1	2	3	...	i
Criterios	1	Puntuaciones de criterios (xij)				
	2					
	3					
	...					
	j					

Fuente: Gómez y Barredo (2006)

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.

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 (w_j) cuando tiene un valor cuantitativo o jerarquía cuando tiene una valoración cualitativa (Gómez y Barredo, 2006, p.53)

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.

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. (Gómez y Barredo, 2006, p.56). Ver Tabla 2. Matriz de Prioridades.

Tabla 2

Matriz de prioridades

		Criterios				
		1	2	3	...	j
Puntos de vista (v)	1	Pesos (w_j)				
	2					
	3					
	...					
	v					

Fuente: Adaptado de Gómez y Barredo

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.

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 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. (Gómez y Barredo, 2006, p.62)

Decisión multiobjetivo

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.

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 (w_k) cómo se hace cuando se tienen múltiples criterios (w_j). 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.

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. (Gómez y Barredo, 2006, p.63).

5.3.1 Pesos para los criterios

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.

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.

Para establecer los pesos de los criterios de forma cuantitativa en la literatura se encuentran varios métodos dentro de los que se encuentra el método de entropía, el método de asignación directa, el método de *eigenpesos* y el método de comparación de alternativas. Debe tenerse presente que el tomador de decisiones es un individuo o equipo humano y la puntuación es subjetiva.

5.3.2 Método de comparación por pares:

Este método parte de la construcción de una matriz cuadrada con número de filas y columnas de acuerdo con el número de criterios a ponderar. Los criterios se enfrentan y se comparan con los pares (a_{ij}) para luego establecer el *eigenvector* principal que determinará los pesos (w_j) y el eigenvalor que otorga cuantitativamente valores de la consistencia. (p. 73). Ver Tabla 3. Matriz de comparación por pares).

Tabla 3

Matriz de comparación por pares

FACTORES	A	B	C	D
A				
B				
C			a_{cb}	
D				

Fuente: Adaptado de Gómez y Barredo (2016)

En la matriz se puede establecer que el factor C tiene un valor tres veces mayor que B y, por tanto, B es un $\frac{1}{3}$ del valor de C.

Con la construcción de una escala se asignan los juicios de valor a todas las celdas de la matriz, y donde se confrontan el factor a evaluar consigo mismo, se asignará el valor de 1.

Para la asignación de los juicios de valor (a_{ij}), se construye una escala de tipo continuo con valores que van desde el $\frac{1}{9}$ hasta el 9 con ocho segmentos. (Gómez y Barredo, 2006, p.73) Ver figura 4. Escala de medida para la asignación de juicios de valor.

Figura 4

Escala de medida para la asignación de Juicios de valor



Fuente: Gómez y Barredo (2006)

Se necesita calcular una serie de pesos (w_j) a partir de juicios de valor relacionados con los juicios (a_{ij}) en la matriz de comparación, se debe calcular el eigenvector principal que es representativo del orden de prioridades de los factores. Por otro lado, el eigenvalor máximo (λ_{MAX}) mide cuán consistente son los juicios. Ver Tabla 4. Cálculo del eigenvector principal de la matriz.

Tabla 4

Cálculo del eigenvector principal de la matriz

FACTORES	A B C D	eigenvector ppal
A		e_a
B		e_b
C		e_c
D		e_d

Fuente: Gómez y Barredo (2006)

Para obtener el eigenvector principal se debe buscar valores de la matriz de comparación normalizando por columna.

5.3.3 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 a una serie de atributos.

A continuación, se dará explicación a los tres grupos que engloban las técnicas de la Evaluación Multicriterio:

- **Técnica compensatoria Aditiva**

Entre las técnicas aditivas se encuentra el método de las Jerarquías Analíticas, el procedimiento Concordancia - Discordancia y la Sumatoria Lineal Ponderada

- **Sumatoria Lineal Ponderada.**

Es un método que usa la intuición y es de los más empleados en la Evaluación Multicriterio. Cada alternativa se halla mediante la suma del resultado de multiplicar el valor de cada criterio por el peso.

Ecuación 1

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij}$$

Donde:

r_i es el nivel de adecuación de la alternativa i

w_j es el peso del criterio j

v_{ij} es el valor ponderado de la alternativa i en el criterio j

- **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, p. 88)

- **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.

5.3.4 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 2

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

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 y Barredo, 2006, p. 88)

6. Metodología

6.1 Enfoque metodológico

Se considera que el enfoque cuantitativo representa un conjunto de procesos de manera ordenada y busca la comprobación de una idea con la que se parte la investigación, por consiguiente, el presente trabajo fue desarrollado utilizando un planteamiento metodológico con enfoque cuantitativo. La idea a la que hacen referencia los autores se va delimitando con la búsqueda de objetivos y solución a preguntas de investigación. Con el planteamiento del problema, la revisión de antecedentes y desarrollo del marco teórico se determinó el alcance del estudio para elaborar una hipótesis y definición de variables. Posteriormente se desarrolló el diseño de la investigación con una definición y selección de la muestra, recolección de los datos, análisis de estos y finalmente, la elaboración de reporte de resultados. (Hernández et. Al, 2010, p.4)

Del enfoque cuantitativo se tomó la técnica de encuestas para determinar los pesos de los criterios utilizados en la Metodología de Jerarquías Analíticas por parte de expertos con conocimientos en energía y ordenamiento.

6.2 Tipo de estudio

Se realizó un estudio de tipo exploratorio buscando las mejores alternativas de acuerdo a unos parámetros definidos al estado del conocimiento sobre el problema de investigación evidenciado en la revisión de antecedentes. A partir de esta investigación se puede realizar estudios Descriptivos, Correlacionales y Explicativos.

Con la elaboración de este trabajo de grado se analizaron los fenómenos desconocidos o novedosos que posiblemente interfieren en la elección de sitios potenciales para establecer proyectos de granjas solares partiendo de la base de que estos estudios son relativamente nuevos, desconocidos y abre la posibilidad de llevar a cabo una investigación profunda.

6.3 Procedimiento

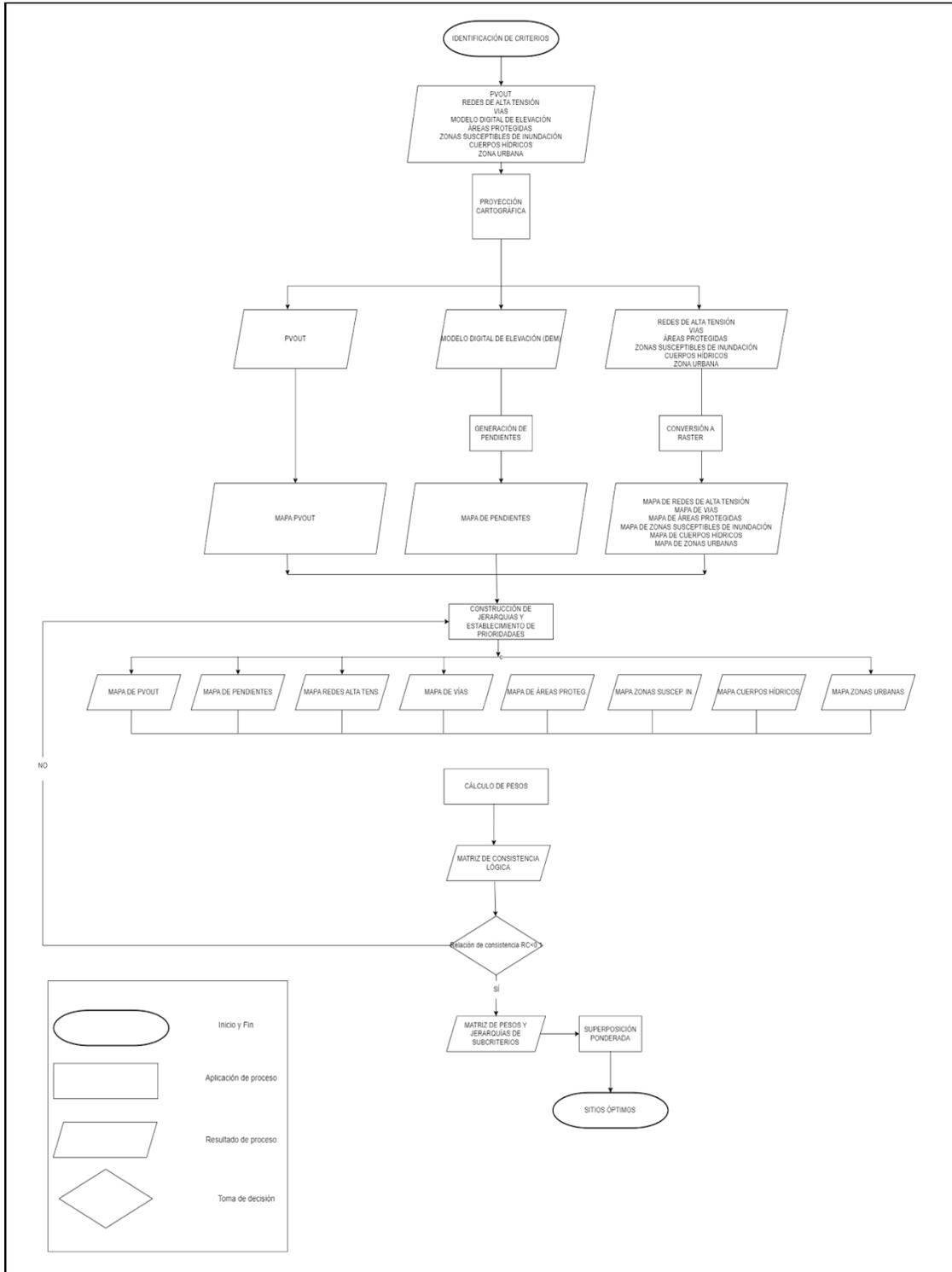
FASE 1. Se identificaron las variables de evaluación y de exclusión aplicables al contexto regional de la zona de estudio.

FASE 2. Evaluación de los criterios: Jerarquización de las variables aplicando la metodología Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y diseño de un modelo aplicado la Evaluación Multicriterio. (EMC).

FASE 3. Con los resultados de la Evaluación de los criterios y la aplicación del modelo creado para la EMC se creó el Mapa de Superposición Ponderada.

Figura 5

Aplicación del proceso metodológico



Fuente: Elaboración propia

6.3.1 Identificación de Criterios

A partir de la revisión de una serie de trabajos de investigación que abordan la ubicación de soluciones fotovoltaicas a gran escala, se identifican los criterios que pueden ser aplicables al contexto de la zona de estudio. Este paso consta de la elección de criterios, la identificación de las fuentes y la estandarización de la información en un único sistema de proyección.

Preliminares:

La información geoespacial de los diferentes criterios ha sido recopilada en formato digital, a escalas y sistemas de referencia diferentes. De acuerdo a la ubicación del área de estudio se decide trabajar en el Sistema de Referencia Magna Sirgas Origen Nacional cuyos parámetros se observan en la tabla 5.

Tabla 5

Sistema de Referencia Magna Sirgas Origen Nacional

<i>Sistema de Referencia Trabajado</i>
MAGNA-SIRGAS_Origen-Nacional Authority: Custom Projection: Transverse_Mercator False_Easting: 5000000,0 False_Northing: 2000000,0 Central_Meridian: -73,0 Scale_Factor: 0,9992 Latitude_Of_Origin: 4,0 Linear Unit: Meter (1,0)

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Criterios de Evaluación

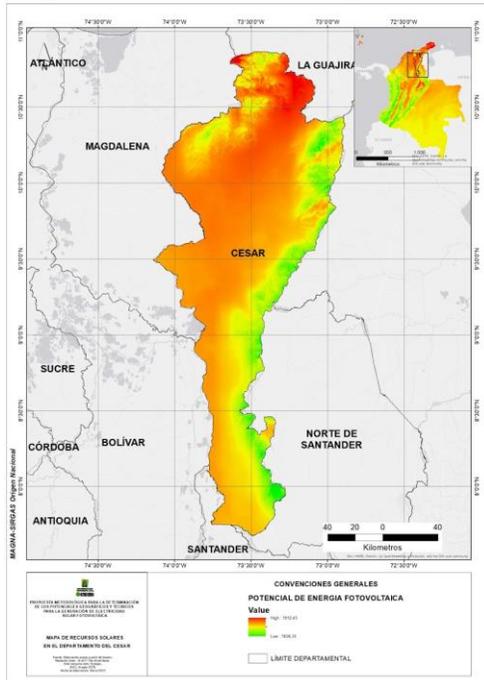
En los criterios de evaluación se estima la influencia de las características del lugar y las condiciones que mejoran la optimización de la selección de los sitios. A continuación, se explican los criterios de evaluación:

- **Potencial de Energía Solar Fotovoltaica**

Se utilizó la herramienta SolarGIS para conocer el Potencial de Energía Solar Fotovoltaica (PVOUT). Para la zona de estudio se pudo establecer que el PVOUT está entre el rango de 1912,45 a 1026,35 kWh/año. La información fue descargada de la página oficial de SolarGIS en formato raster con una resolución espacial de 931,0834294 metros. Con la información se elaboró el Mapa de Potencial de Energía Fotovoltaico en el Departamento del Cesar que se observa en la Figura 6.

Figura 6

Mapa de Potencial de Energía Fotovoltaico en el departamento del Cesar



Fuente: Elaboración propia a partir del mapa de Radiación Solar de Solar GIS, Instituto Geográfico Agustín Codazzi

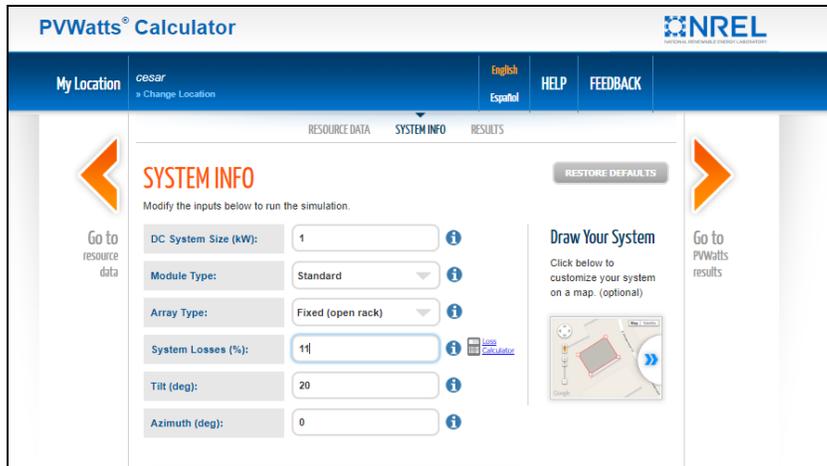
Para estimar la producción de los sistemas de energía fotovoltaica (PV) se utilizó una aplicación web desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) que estima la producción de electricidad de un sistema fotovoltaico montado en el suelo o en techo conectado a la red en función de pocas entradas simples conectados a la red en un lugar específico. La aplicación web dispone de una calculadora que permite conocer el rendimiento de las instalaciones fotovoltaicas potenciales. La calculadora estima la producción de electricidad mensual y anual de un sistema fotovoltaico utilizando una simulación hora por hora durante un periodo de un año.

Los valores de entrada dentro de la calculadora son: Tamaño del sistema de Corriente Continua, Tipo de Módulo, Tipo de Matriz, Pérdidas del sistema, Ángulo de inclinación de la matriz, Ángulo de acimut de la matriz.

Para SolarGIS la inclinación óptima está estimada en 20° y el porcentaje de Pérdidas del Sistema en 11%, estos criterios son agregados a la calculadora PVWatts. Ver Figura 7 Datos de entrada PVWatts Calculator con un ángulo de inclinación de 20°

Figura 7

Datos de entrada PVWatts Calculator con un ángulo de inclinación de 20°



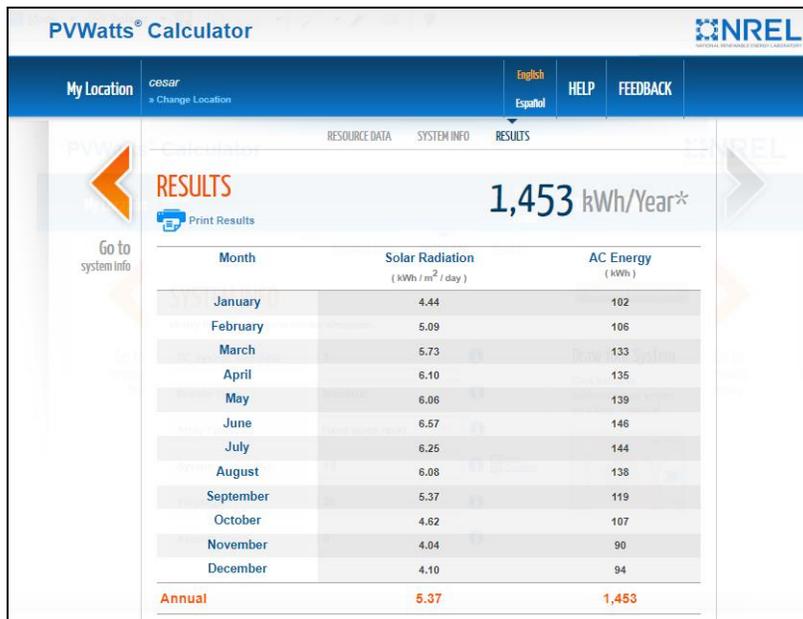
The screenshot displays the PVWatts Calculator interface. At the top, it shows the location as 'cesar' and the NREL logo. The main section is titled 'SYSTEM INFO' and contains several input fields: 'DC System Size (kW)' set to 1, 'Module Type' set to Standard, 'Array Type' set to Fixed (open rack), 'System Losses (%)' set to 11, 'Tilt (deg)' set to 20, and 'Azimuth (deg)' set to 0. There are also navigation buttons for 'Go to resource data' and 'Go to PVWatts results', and a 'Draw Your System' section with a map icon.

Fuente: Elaboración propia a partir de PVWatts Calculator

Con estos valores de parámetros se estimó la producción de electricidad de un sistema fotovoltaico para el departamento del Cesar en 1453 kWh/año. Ver resultado en Figura 8. Resultados PVWatts Calculator con parámetro de inclinación óptima.

Figura 8

Resultados PVWatts Calculator con parámetro de inclinación óptima.



Fuente: Elaboración propia a partir de PVWatts Calculator

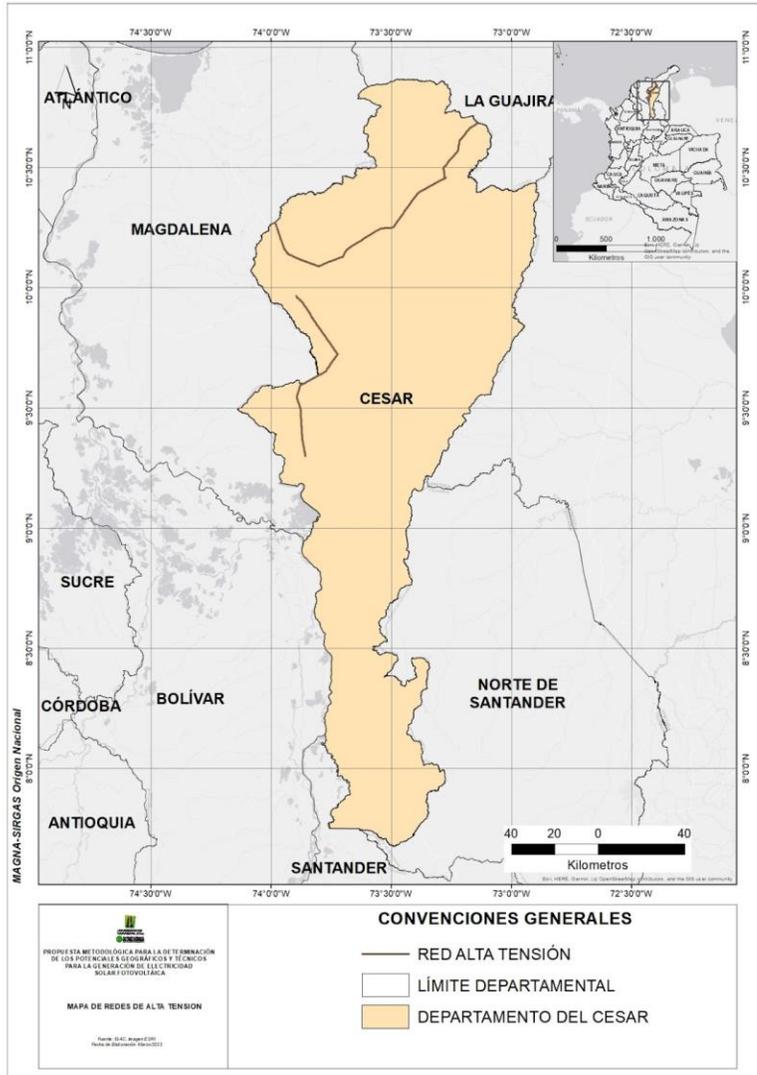
- **Redes Eléctricas de Alta Tensión**

Se tomó la información de las redes de alta tensión disponibles por el IGAC para uso libre, no está disponible la información de las subestaciones eléctricas.

Se puede observar la ubicación espacial de las redes de alta tensión en la figura 9 Mapa de redes de alta tensión.

Figura 9

Mapa de Redes de Alta Tensión



Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Según (Ríos et al., 2021 pp. 5) La cercanía de las granjas solares a la red del Sistema Interconectado Nacional permite abastecer a esta de la energía eléctrica producida por los sistemas fotovoltaicos sin invertir grandes cantidades de dinero en la construcción de infraestructura que transforme y conduzca la energía y evitando con esto considerables pérdidas

de electricidad por la conducción por lo que los autores establecieron una distancia máxima de un kilómetro de estas redes.

Redes viales

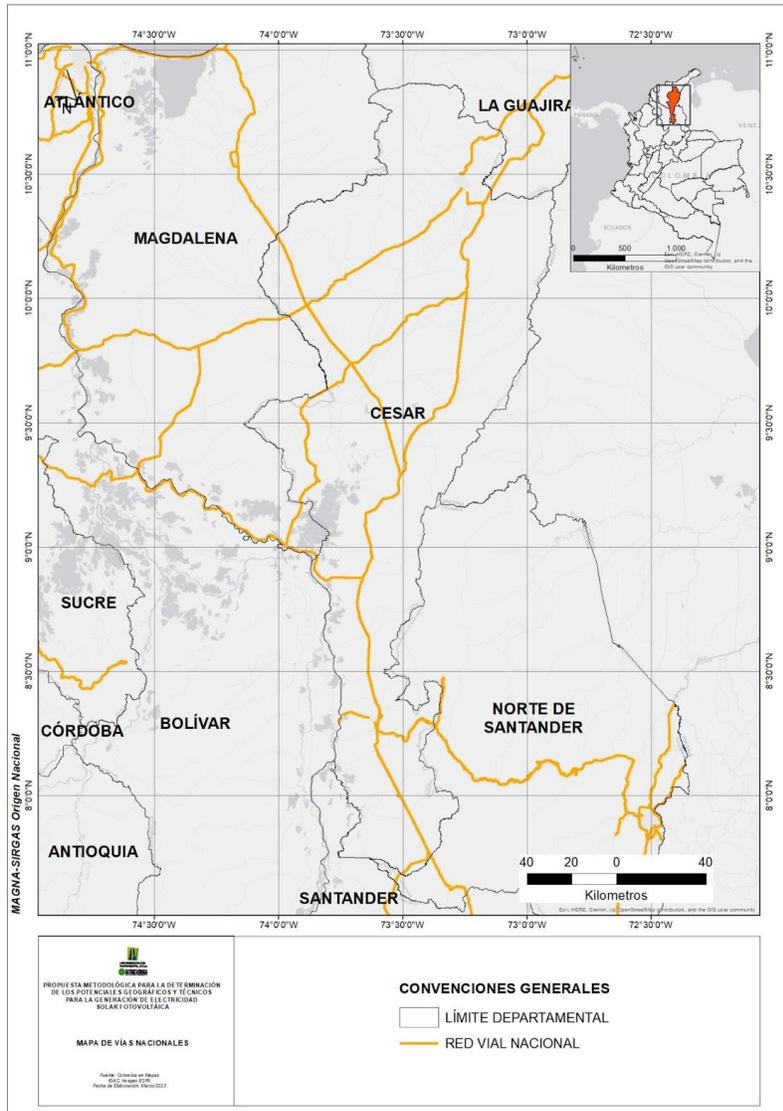
Según (Hassan et al., 2020 pp. 455) se considera que para mejorar la rentabilidad de los proyectos de generación de energía solar la ubicación debe tener en cuenta la proximidad de las vías carretables. La proximidad de infraestructura vial de carácter nacional, departamental o local facilita las labores de construcción de mantenimiento y reparación de los proyectos de granjas solares. La inmediatez de infraestructura vial ya sea nacional, departamental o local facilita las labores constructivas y de mantenimiento y reparación. Se determinó una distancia máxima de cinco kilómetros desde la red vial hasta los sitios potenciales para el establecimiento de proyectos de energía solar (Ríos et al., 2021 pp. 12).

Por lo anterior, se tomó la información del servicio Colombia en Mapas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC en escala 1:500.000. En la Figura 10 Mapa de Vías se aprecia la ubicación de las vías en la zona de estudio.

Según lo establecido en la Ley 1228 de 2008, sobre las vías carretables y zona de retiro no se permite construir infraestructura al lado y lado de la vía por lo que se debe conservar una zona de retiro con un ancho de acuerdo a la categoría de la vía.

Figura 10

Mapa de Vías



Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto Geográfico Agustín Codazzi

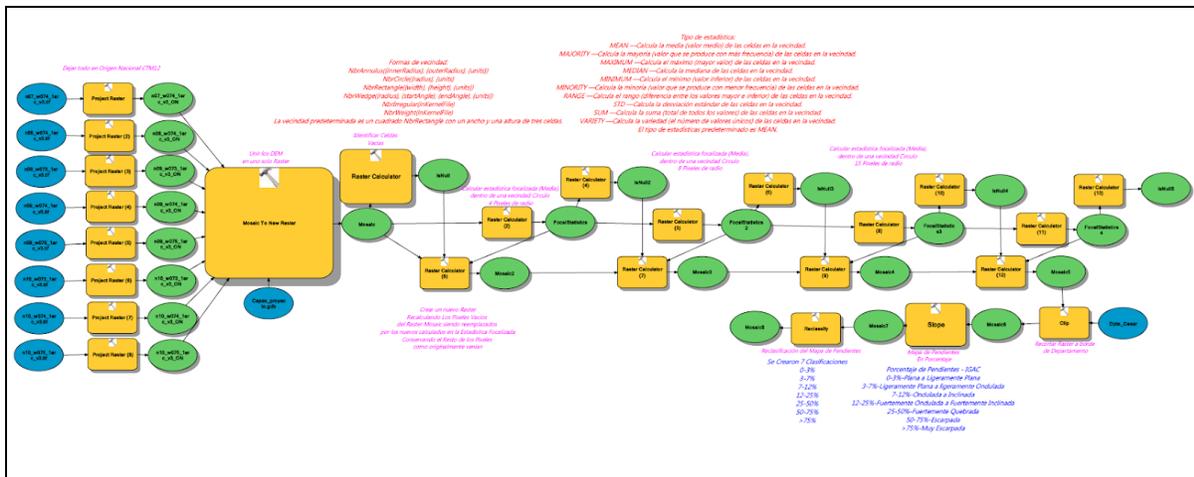
- **Pendientes**

La condición llana del terreno es un factor técnico ideal dentro de los criterios de evaluación porque la adecuación de estos sitios con cortes o rellenos, eleva los costos de construcción de los paneles solares, por lo que se considera un factor de viabilidad económica.

(Zambrano, et al., 2021 pp. 4). Los cambios en la elevación, la orientación y la proyección de las sombras afectan la luz recibida en la superficie terrestre y la inclinación y la presencia de taludes afecta financieramente el establecimiento de un proyecto de este tipo por el aumento en los costos para nivelar el suelo, por lo que la topografía es otro criterio a tenerse en cuenta. (Garni et al., 2018).

Por lo anterior, a partir de ocho imágenes del Modelo Digital de Elevación - SRTM 1 Arc-Second del Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS se elabora el Modelo Digital de Elevación para el departamento del Cesar con una resolución de 30,7 metros. Dichas imágenes tienen una resolución espacial de treinta metros. Utilizando el software ArcGIS Pro y la extensión Spatial Analyst Tool, además de la herramienta de automatización de geoprocenos Model Builder, se elaboró el mosaico del Modelo Digital de Elevación DEM que se observa en la figura 12.

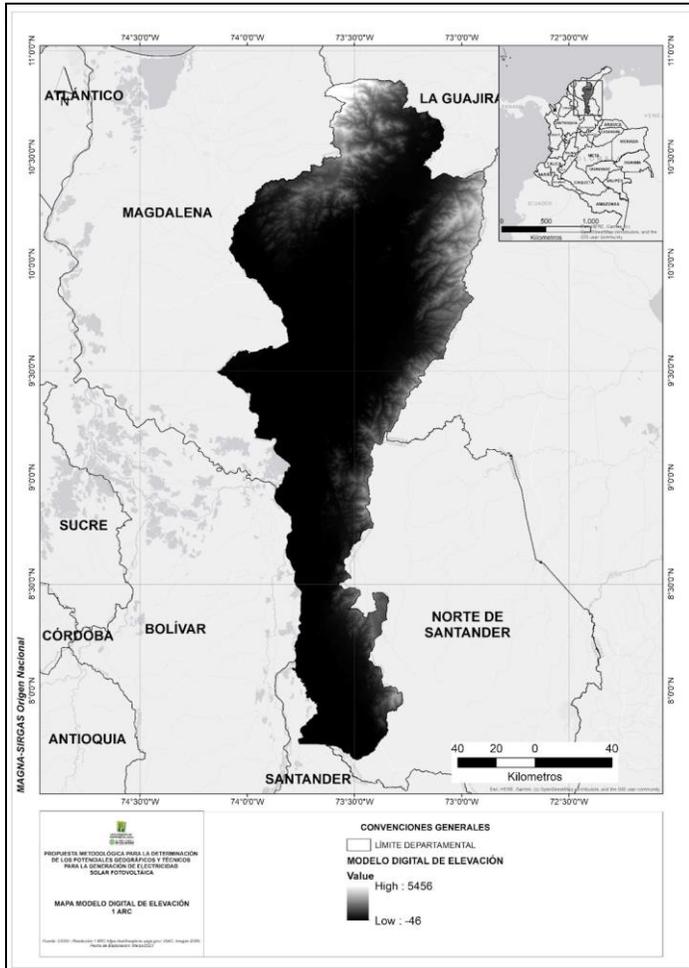
Figura 11
Diagrama de Proceso en Model Builder ArcGIS



Fuente: Elaboración propia a partir de Software ArcGIS

Figura 12

Modelo Digital de Elevación



Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes de USGS, Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Criterios de exclusión

Los criterios de exclusión consideran inadecuados los sitios que presentan ciertas condiciones sociales, ambientales o técnicas para la instalación de granjas solares. A continuación, se explican los criterios de exclusión aplicados al caso de estudio:

- **Áreas Protegidas**

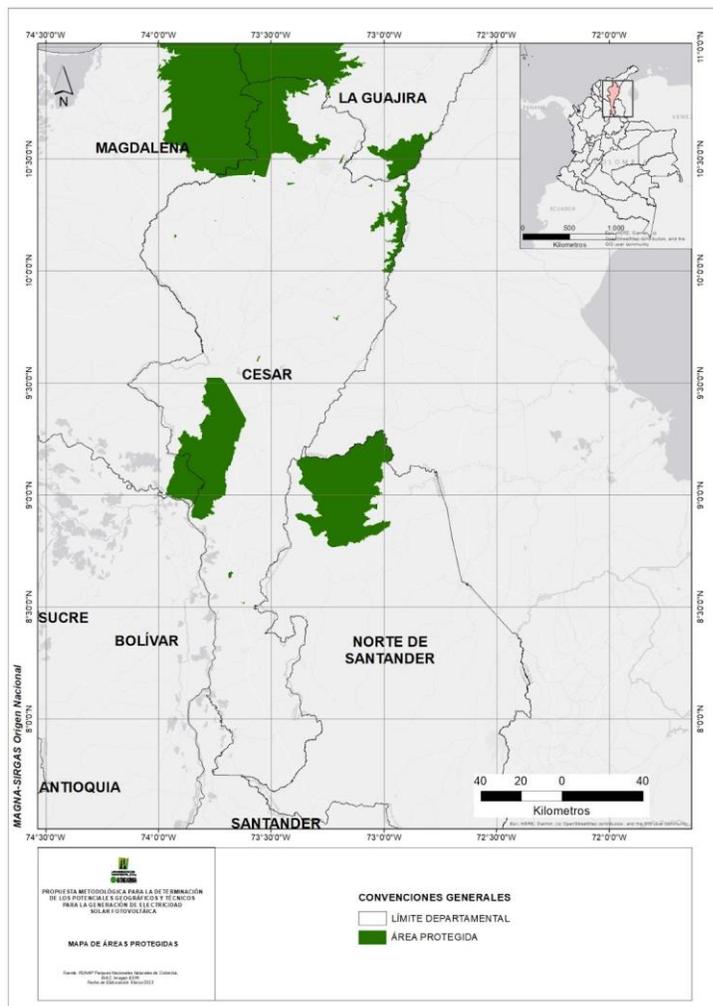
El Código Nacional de los Recursos Naturales en el artículo 328 establece que la función del Sistema de Parques Nacionales es la de conservar en estado natural muestras de comunidades bióticas, regiones fisiográficas, unidades biogeográficas y recursos silvestres.

Debido a esto, la fragmentación de hábitats, afectaciones al paisaje y posible disminución de la biodiversidad que posiblemente se causen por la instalación de los proyectos de granjas solares deben ser evitados al conseguir un menor impacto ambiental. Por lo anterior se debe excluir ciertas zonas con importancia ambiental (Doljack et al.,2017 pp.294) en la búsqueda de los sitios ideales.

Para el caso de estudio, las áreas protegidas fueron tomadas del Registro Único Nacional de Áreas Protegidas - RUNAP, perteneciente a Parques Nacionales Naturales de Colombia y registrado por las Corporaciones Autónomas Regionales. Para el departamento del Cesar se identificaron veintiún áreas con alguna categoría de protección ambiental. En la figura 13 Áreas Protegidas se puede visualizar la ubicación de dichas áreas.

Figura 13

Mapa de Áreas Protegidas



Fuente: Elaboración propia a partir de Registro Único Nacional de Áreas Protegidas, Instituto Geográfico Agustín Codazzi

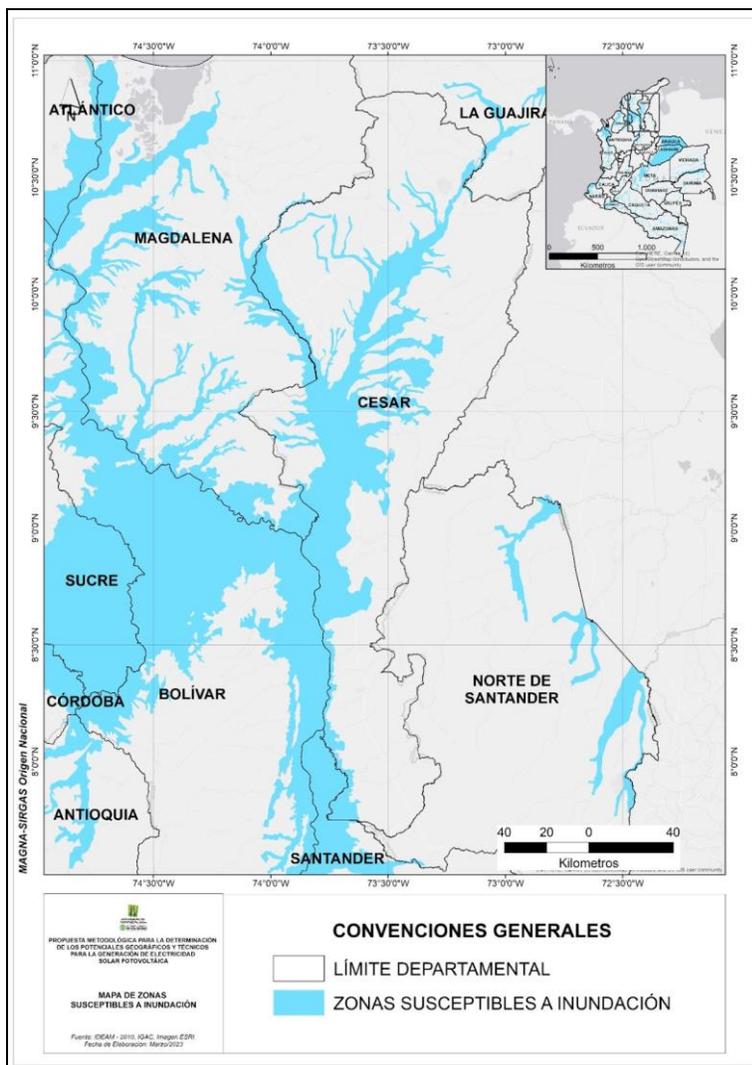
- **Zonas susceptibles de inundación**

Según (Yushchenkoa et al., 2018 pp. 3) se debe descartar las zonas que presenten riesgo de inundación con un promedio de al menos un evento en los últimos cien años.

La variable Zonas Susceptibles de Inundación fue obtenida del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, señala las zonas susceptibles a inundación y las zonas que no presentan esta amenaza. Para el departamento del Cesar se puede observar el mapa de Susceptibilidad de Inundación en la Figura 14 Mapa de Susceptibilidad de Inundación

Figura 14

Mapa de susceptibilidad por Inundación



Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi

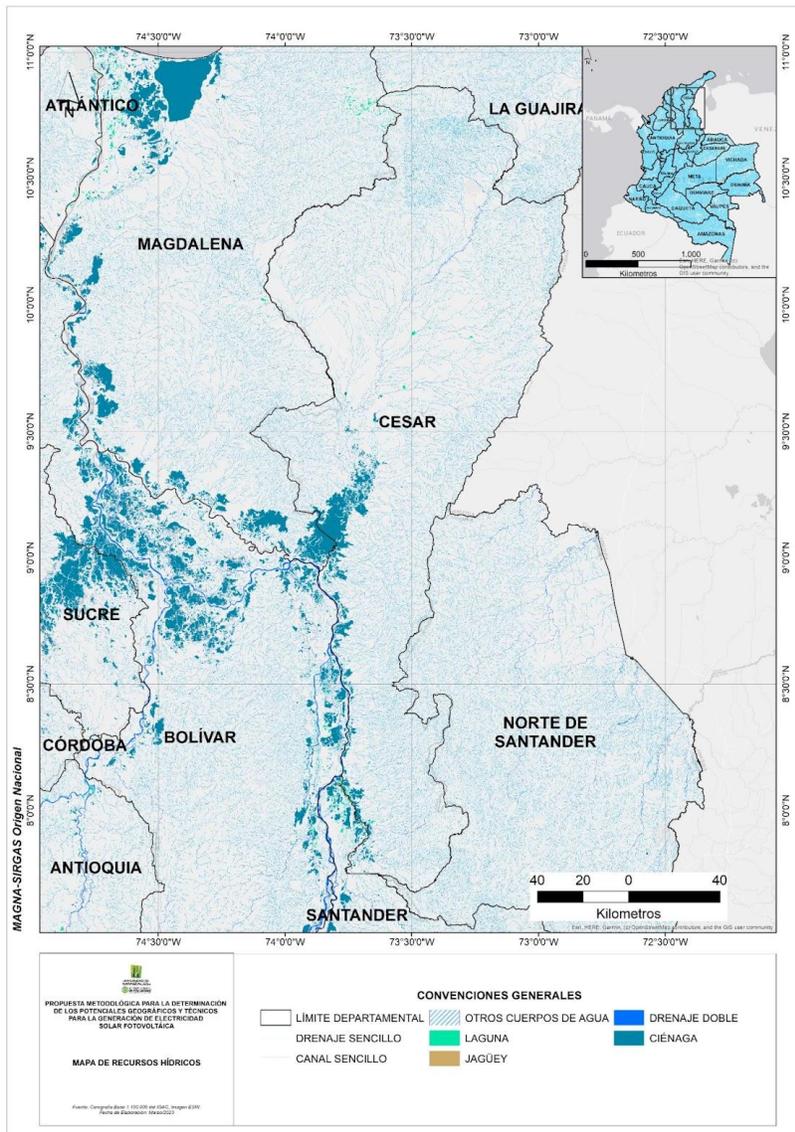
- **Cuerpos hídricos**

Según (Ríos et al., 2021 pp. 4) además de las áreas naturales protegidas nacionales y regionales, la presencia de cuerpos lénticos y lóticos no favorece la instalación de este tipo de proyectos.

El mapa de Cuerpos Hídricos fue obtenido a través de cartografía base del IGAC con una escala de 1: 100.000. Ver figura 15. Mapa de Recursos Hídricos.

Figura 15

Mapa de Recursos Hídricos



Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto Geográfico Agustín Codazzi

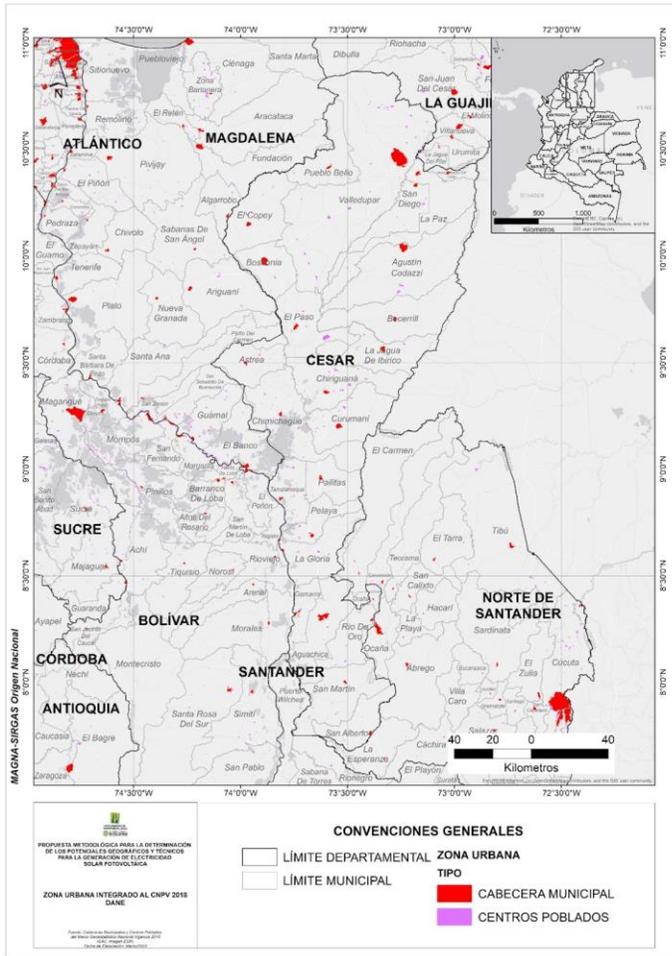
- **Zona Urbana**

Según (Ríos et al., 2021 pp. 4) se considera que se debe excluir las áreas urbanizadas, sin embargo, la cercanía a las granjas solares favorece el traslado de trabajadores de sus viviendas a las granjas solares. Por lo anterior, se obtuvo información de las cabeceras municipales y los centros poblados del Marco Geoestadístico Nacional Vigente 2018 del IGAC. En la figura 16 se

observa el Mapa Zona Urbana Integrado con la ubicación de las zonas urbanizadas dentro de la zona de estudio.

Figura 16

Mapa de Zona Urbana Integrado



Fuente: Elaboración propia a partir del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Instituto Geográfico Agustín Codazzi

6.3.2 Evaluación de los criterios

Se realizó la jerarquización de las variables aplicando la metodología Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y diseño de un modelo aplicado la Evaluación Multicriterio. (EMC).

Matriz de importancia de criterios

Los insumos provienen de diferentes fuentes y presentan diferentes escalas y medida, por lo que fue necesario realizar una normalización para poder realizar comparaciones y establecer una jerarquización.

Se construyó una matriz donde los vectores filas son iguales a los vectores columna, lo que permitió hacer una comparación entre los criterios

Tres expertos establecieron en conjunto los pesos relativos de cada una de las variables mediante el diligenciamiento de la matriz realizando una comparación de las variables estableciendo niveles de jerarquía y su ponderación. En la tabla 6. Matriz de Importancia entre Criterios se aprecia los pesos relativos de cada una de las variables mediante un esquema jerárquico comparando un criterio (X) con respecto al otro (Y).

Tabla 6

Matriz de Importancia de Criterios

VARIABLES	PENDIENTES	ZONA URBANA	PVOUT	CUERPOS HÍDRICOS	SIN	VÍAS	ÁREAS PROTEGIDAS	ZONAS INUNDACIÓN
PENDIENTES	1	0,25	0,33333333	0,14285714	0,2	0,33333333	0,11111111	3
ZONA URBANA	4	1	4	0,2	0,33333333	3	0,2	7
PVOUT	3	0,25	1	0,14285714	0,2	0,33333333	0,11111111	5
CUERPOS HÍDRICOS	7	5	7	1	3	5	0,33333333	7
SIN	5	3	5	0,33333333	1	3	0,33333333	7
VÍAS	3	0,33333333	3	0,2	0,33333333	1	0,11111111	5
ÁREAS PROTEGIDAS	9	5	9	3	3	9	1	7
ZONAS INUNDACIÓN	0,33333333	0,14285714	0,2	0,14285714	0,14285714	0,2	0,14285714	1
Pi	32,3333333	14,9761905	29,5333333	5,16190476	8,20952381	21,8666667	2,34285714	42

Fuente: Elaboración propia

Matriz de consistencia lógica y Pesos de los criterios

Una vez diligenciados los campos en la matriz (Saaty, 1980) se evaluó la consistencia lógica comprobando el modelo mediante la determinación del valor de Relación de Consistencia (RC). Para Saaty el valor de RC no debe superar el 10%.

Inicialmente se halló la variable lambda (λ) que señala el máximo valor propio de la matriz de comparación. Se calcula con la expresión:

$$\lambda_{\max} = V * B$$

donde:

V = Pertenece al peso de cada variable

B = Pertenece a la sumatoria de los elementos de cada columna de la matriz de comparación

Con el valor de lambda se calculó el IC - Índice de consistencia a través de la siguiente ecuación:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

donde:

n pertenece al número de criterios

El IC señala la desviación de los pesos con respecto a la jerarquía dada por los expertos decidiendo cuál es la mejor para la aplicación del Modelo Analítico Jerárquico.

Posteriormente se halla el valor de la Relación de Consistencia RC a través de la ecuación:

$$R = ICRI$$

donde:

RI corresponde al índice aleatorio o valor esperado para el tamaño de la matriz $n = 8$.

La matriz de consistencia lógica se obtuvo como resultado de la Matriz de Resultados de Criterios. A partir de los resultados de λ_{\max} que, para la tabla 7 se muestra como un valor de 8.86 se calculó el valor de IC dando como resultado $IC = 0.1239$.

El valor para RC fue calculado en $RC = 8.35\%$ indicando una inconsistencia aceptable menor al 10% como indica el autor.

Tabla 7

Matriz de Consistencia Lógica

VARIABLES	PENDIENTES	ZONA URBANA	PVOUT	CUERPOS HÍDRICOS	SIN	VÍAS	ÁREAS PROTEGIDAS	ZONAS INUNDACIÓN	SUM	PESOS (Ci)	PESOS VARIABLE + SUM VARIABLES
PENDIENTES	1	0,25	0,333333333	0,142857143	0,2	0,333333333	0,111111111	3	0,357119467	0,028048072	0,906887661
ZONA URBANA	4	1	4	0,2	0,333333333	3	0,2	7	1,206173414	0,094732553	1,418732754
PVOUT	3	0,25	1	0,142857143	0,2	0,333333333	0,111111111	5	0,500985242	0,039347253	1,162055547
CUERPOS HÍDRICOS	7	5	7	1	3	5	0,333333333	7	3,102089088	0,243637287	1,257632472
SIN	5	3	5	0,333333333	1	3	0,333333333	7	1,907127621	0,149785318	1,229666131
VÍAS	3	0,333333333	3	0,2	0,333333333	1	0,111111111	5	0,759835686	0,059677301	1,304943653
ÁREAS PROTEGIDAS	9	5	9	3	3	9	1	7	4,67874914	0,367467766	0,86092448
ZONAS INUNDACIÓN	0,333333333	0,142857143	0,2	0,142857143	0,142857143	0,2	0,142857143	1	0,220327305	0,01730445	0,726786917
PI	32,33333333	14,97619048	29,53333333	5,161904762	8,20952381	21,86666667	2,342857143	42	12,73240696		8,867629616
											λmax
IC	0,123947088										
IR	1,485										
RC	0,083466053	8,347	%								

Fuente: Elaboración propia

El valor para RC fue calculado en **RC = 8.35%** indicando una inconsistencia aceptable que es menor al 10% (Saaty, 1980) siendo satisfactoria para aplicarse al modelo.

A partir del cálculo de los pesos que se muestran en la Tabla 7 Matriz de Consistencia Lógica, se calcula el valor en porcentaje como se muestra en la Tabla 8. Asignación de Pesos para las variables.

Tabla 8

Asignación de pesos para las variables

VARIABLE	PESOS (Ci)	%
PENDIENTES	0,028048	2,804807
ZONA URBANA	0,094733	9,473255
ENERGÍA FOTOVOLTAICA	0,039347	3,934725
HÍDRICOS	0,243637	24,36373
INTERCONECTADO NACIONAL	0,149785	14,97853
VÍAS	0,059677	5,96773
ÁREAS PROTEGIDAS	0,367468	36,74678
SUSCEPTIBLES A INUNDACIÓN	0,017304	1,730445

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de los pesos de los subcriterios

Se tiene una serie de porcentajes asignados a los pesos de los ocho criterios jerarquizados con consistencia lógica lo que permitió la construcción de un modelo aplicado a la Evaluación Multicriterio (EMC). Siguiendo con la metodología AHP, se aplicó el tratamiento a los criterios para dar pesos a los subcriterios.

Con los criterios se obtuvieron ocho capas raster de resolución espacial de treinta (30) metros conformando la base de datos geográfica del proyecto. A continuación se explica la asignación de los pesos para los subcriterios:

Peso para subcriterios del Potencial Fotovoltaico

Teniendo en cuenta la producción de electricidad de un sistema fotovoltaico, dentro de la escala de valores de los pesos se dio el valor de 9 a las zonas que presentan un potencial

fotovoltaico igual o superior a 1453 kWh/año, a las zonas con potencial fotovoltaico inferior a 1453 kWh/año se le dio un valor de Restringido. Ver tabla 9 Pesos para el subcriterio PVOUT.

Tabla 9

Pesos para el subcriterio PVOUT

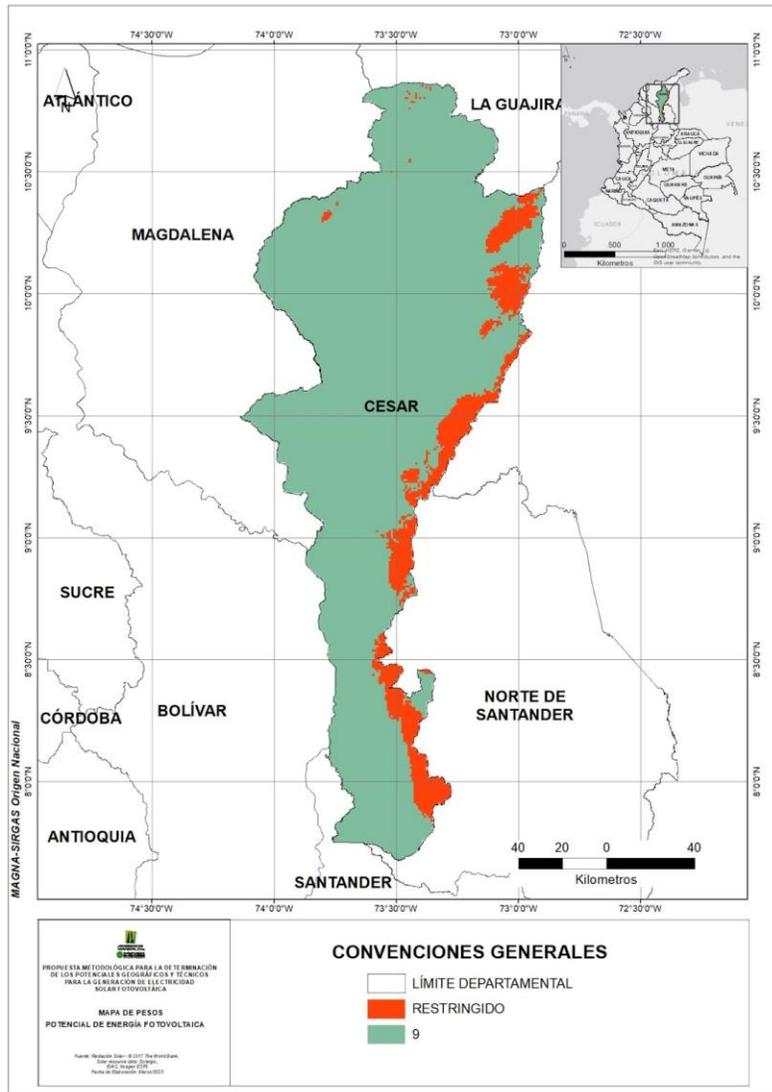
VARIABLE	CLASE	VALOR	PESO
PVOUT	Valores menores a 1453 kWh/año	0	Restringido
	Valores iguales o mayores a 1453 kWh/año	1	9

Fuente: Elaboración propia

En el Mapa de Potencial de Energía Fotovoltaica - Clasificación Importancia Relativa que se muestra en la figura 17 se puede observar las zonas que fueron asignadas con la clasificación de los subcriterios del Potencial Solar Fotovoltaico.

Figura 17

Mapa de Potencial de Energía Fotovoltaica – Clasificación Relativa



Fuente: Elaboración propia a partir del mapa de Radiación Solar de Solar GIS, Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Peso para subcriterios de Redes de Alta Tensión

Al *shapefile* de redes de alta tensión se le realizó geoprocesamiento con un buffer de un kilómetro para determinar el área de influencia de dichas redes eléctricas. A la capa raster

producto del procedimiento anterior se le dio un peso de 9 a las zonas con distancia de hasta un kilómetro a las redes eléctricas. A las zonas que superan esta distancia se le dio un valor de Restringido.

Tabla 10

Pesos para el subcriterio red de alta tensión

VARIABLE	CLASE	VALOR	PESO
RED DE ALTA TENSIÓN	Ausencia de redes de Alta Tensión	0	Restringido
	Presencia de redes de Alta Tensión	1	9

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 18 Mapa de redes de alta tensión- Clasificación Importancia Relativa se observa las zonas con una proximidad igual o inferior a un kilómetro de las redes de alta tensión. Como se ve en la tabla 10. Pesos para el subcriterio Redes de alta tensión. En la figura 18 Mapa de Redes de Alta Tensión - Clasificación Importancia Relativa se observa las zonas con los pesos otorgados.

de 3 para las áreas con zona de influencia de cinco (5) kilómetros y de 1 para las zonas de influencia con distancia mayor a cinco (5) kilómetros de las vías. Para las zonas con restricción normativa se le asignó Restringido como Peso tal como se ve en la Tabla 11 Pesos para el subcriterio Vías.

Tabla 11

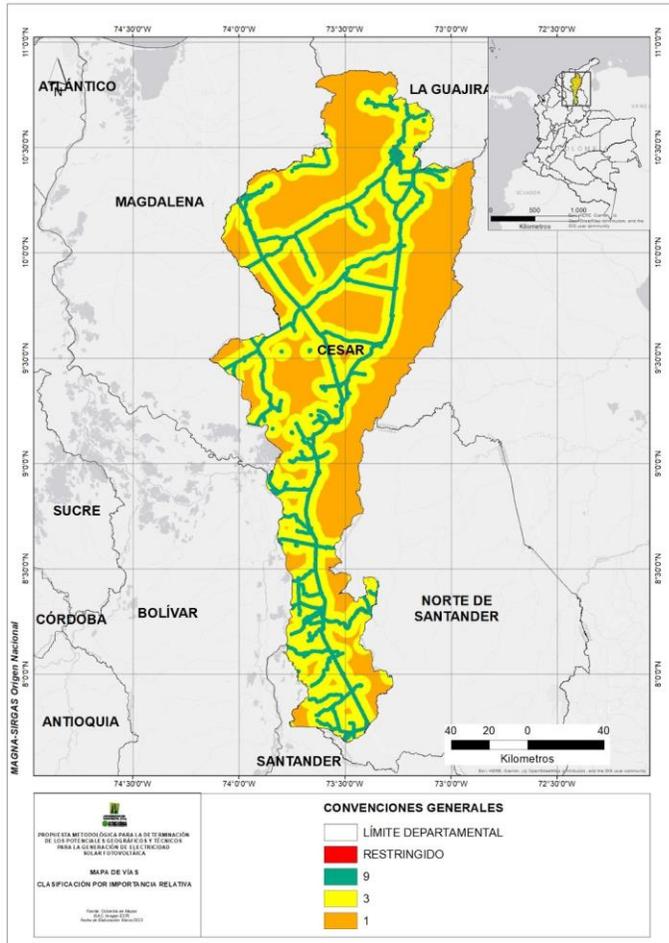
Pesos para el subcriterio Vías

VARIABLE	CLASE	VALOR	PESO
VIAS	Restricción normativa	0	Restringido
	Zona de influencia de 1Km	1	9
	Zona de influencia de 5 Km	2	3
	Zona de influencia mayor a 5 Km	3	1

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19

Mapa de Vías – Clasificación Importancia Relativa



Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Peso para subcriterios de Pendientes

A partir del DEM resultante del *Model Builder*, se realizó una reclasificación estableciendo cuatro categorías de porcentaje de pendiente donde se agrupó las pendientes 12 - 25% Fuertemente Ondulada a Fuertemente Inclinada, 25 - 50% Fuertemente Quebrada, 50 - 75% Escarpada y >75% Muy escarpada como se observa en la tabla 12. Reclasificación de pendientes

Tabla 12

Reclasificación de pendientes

VARIABLE	CLASE	VALOR
PENDIENTES	0-3% Plana a Ligeramente Plana	1
	3-7% Ligeramente Plana a Ligeramente Ondulada	2
	7-12% Ondulada a Inclinda	3
	12-25% Fuertemente Ondulada a Fuertemente Inclina	4
	25-50% Fuertemente Quebrada	4
	50-75% Escarpada	4
	>75% Muy Escarpada	4

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 13 Pesos para el subcriterio Pendientes se observa la asignación de 9 como peso para las pendientes comprendidas entre 0 a 3%, de 8 a las pendientes entre 3 a 7%, de 6 para las pendientes comprendidas entre 7 a 12% y un peso de Restringido para las pendientes que superen el 12%.

Tabla 13

Pesos para el subcriterio Pendiente

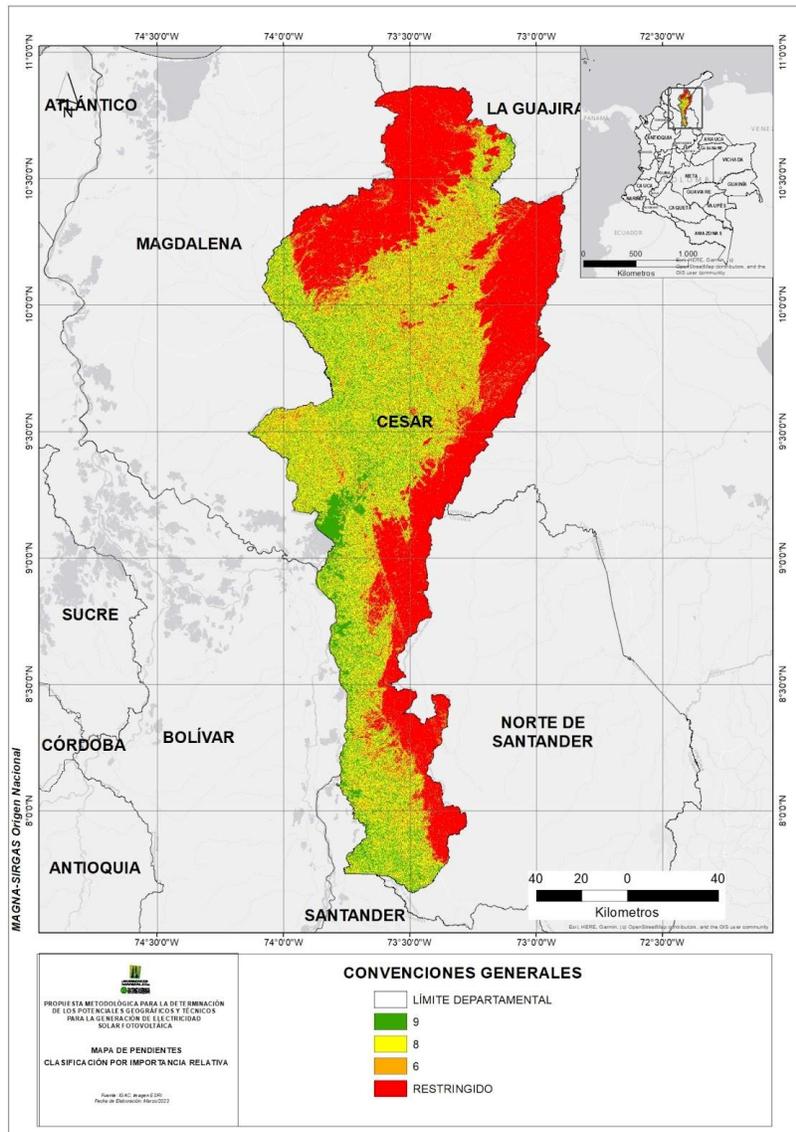
VARIABLE	CLASE	VALOR	PESO
PENDIENTES	0-3% Plana a Ligeramente Plana	1	9
	3-7% Ligeramente Plana a Ligeramente Ond.	2	8
	7-12% Ondulada a Inclinda	3	6
	>12% Muy Escarpada	4	Restringido

Fuente: Elaboración propia

El resultado del mapa de pendientes se muestra en la figura 20.

Figura 20

Mapa de Pendientes – Clasificación Importancia Relativa



Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes de USGS, Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Peso para subcriterios de Áreas Protegidas

A partir de veintiún (21) *shapefile* de las áreas con categoría de protección se genera una clasificación de 0 y 1 señalando las áreas que presentan o no áreas protegidas. A la capa raster resultante se le dio un peso de 9 a las zonas que no presentan áreas protegidas y un valor de Restringido a las zonas con presencia de áreas protegidas tal como se ve en la tabla 14 Pesos para el subcriterio Áreas Protegidas. En la ilustración 21 se observa el resultado del mapa de Áreas Protegidas

Tabla 14

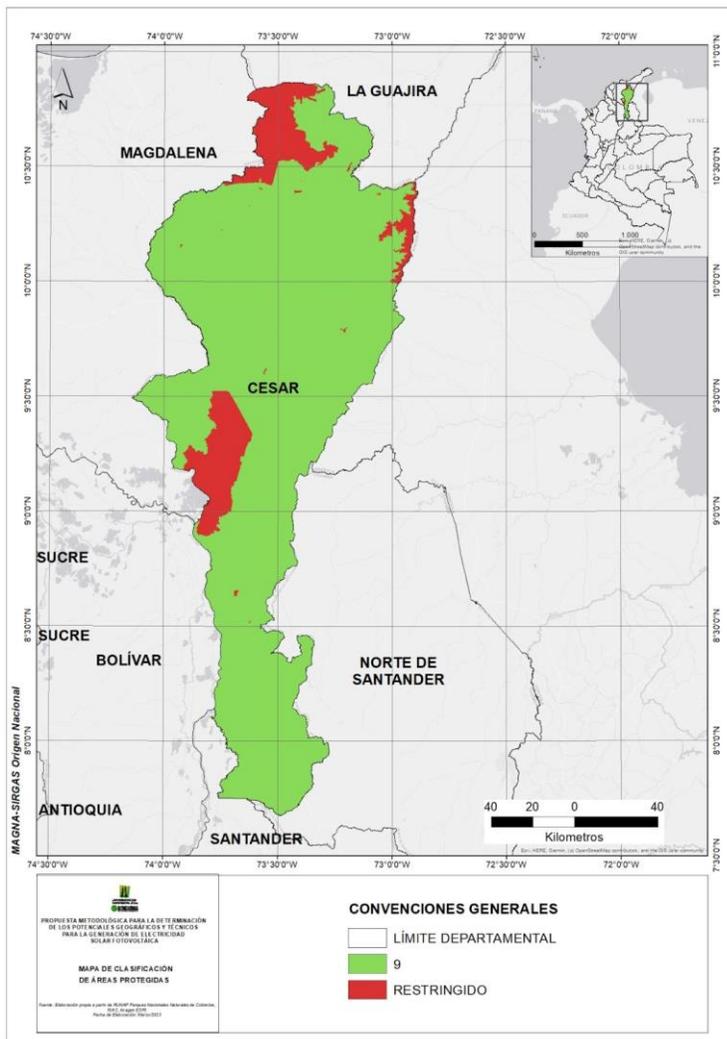
Pesos para el subcriterio Áreas Protegidas

VARIABLE	CLASE	VALOR	PESO
ÁREAS PROTEGIDAS	Ausencia de Áreas Protegidas	0	9
	Presencia de Áreas Protegidas	1	Restringido

Fuente: Elaboración propia

Figura 21

Mapa de Áreas Protegidas – Clasificación Importancia Relativa



Fuente: Elaboración propia a partir de Registro Único Nacional de Áreas Protegidas, Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Peso para subcriterios de Zonas Susceptibles de Inundación

Se realiza una clasificación a la imagen raster resultante del mapa de zonas con susceptibilidad de inundación, otorgando un peso de 9 a las zonas que no son consideradas susceptibles de inundación y un valor de Restringido a las consideradas susceptibles de inundación tal como se ve en la tabla 15 Pesos para el subcriterio Zonas de Inundación. En la figura 22 se observa el mapa resultante.

Tabla 15

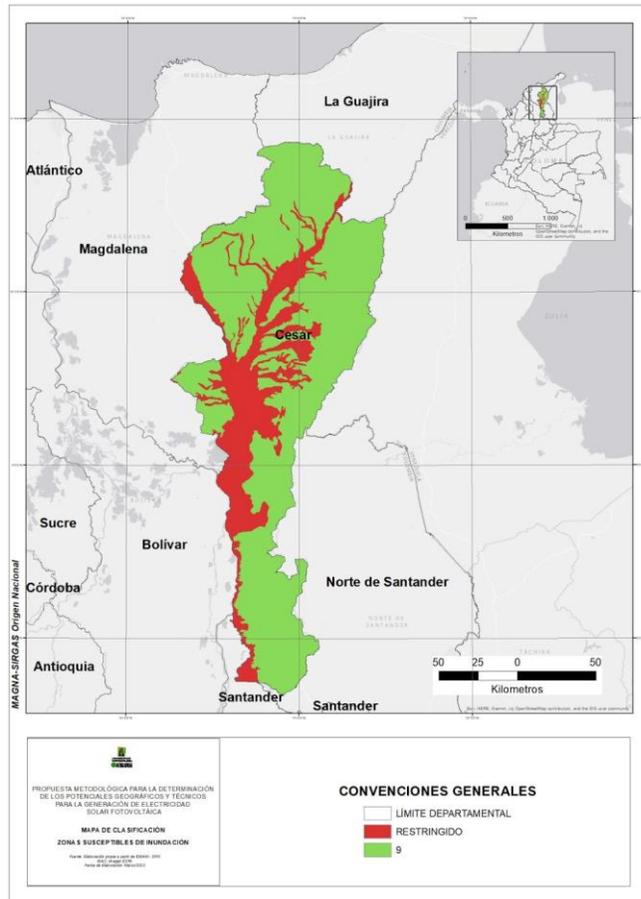
Pesos para el subcriterio Zonas de Inundación

VARIABLE	CLASE	VALOR	PESO
ZONAS SUSCEPTIBLES DE INUNDACIÓN	Área susceptible de inundación	0	9
	Área no susceptible de inundación	1	Restringido

Fuente: Elaboración propia

Figura 22

Mapa de Zonas Susceptibles de Inundación – Clasificación Importancia Relativa



Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Peso para subcriterios de Cuerpos Hídricos

El Decreto 2811 de 1974 en su artículo 83 establece que las rondas hídricas protectoras deben tener un aislamiento de un máximo de treinta metros, por lo tanto, se identifican las ciénagas, drenajes dobles, drenajes sencillos, lagunas y canales y se realiza un geoprocesamiento para determinar las rondas hídricas mediante un buffer de treinta (30) metros.

En la tabla 16 Pesos para el subcriterio Cuerpos Hídricos se observa una asignación de 9 como peso para las áreas que no presentan cuerpos hídricos ni rondas hídricas y de Restringido para las áreas que sí presentan. En la figura 23 se observa el mapa resultante.

Tabla 16

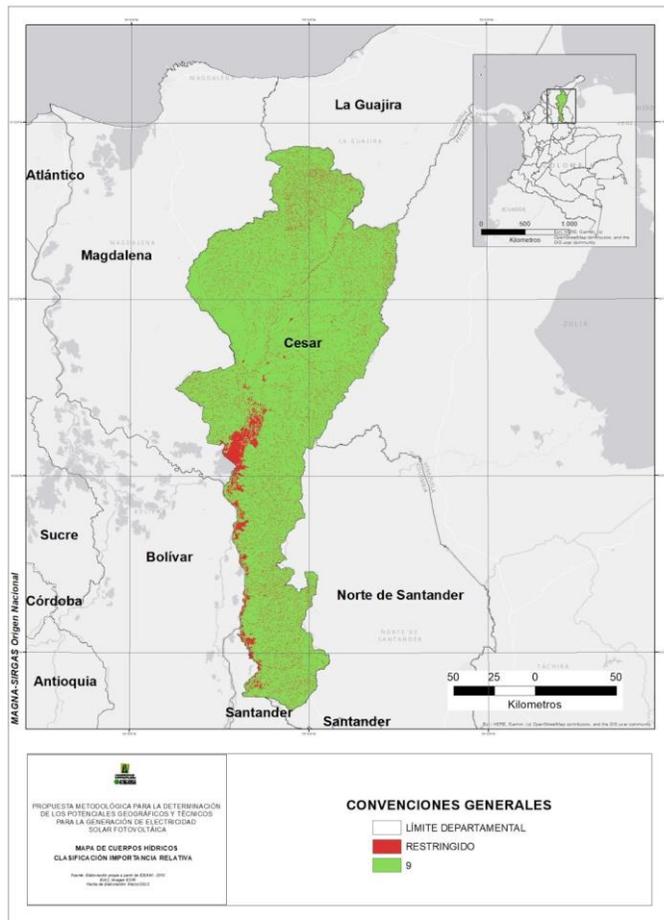
Pesos para el subcriterio Cuerpos Hídricos

VARIABLE	CLASE	VALOR	PESO
CUERPOS HÍDRICOS	Cuerpo Hídrico + Ronda hídrica de 30m	0	Restringido
	Área sin presencia de cuerpo hídrico	1	9

Fuente: Elaboración propia

Figura 23

Mapa de Cuerpos Hídricos – Clasificación Importancia Relativa



Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Peso para subcriterios de Zona Urbana

(Effat et al., 2022 pp. 632) consideran mantener una zona de amortiguación de 2000 metros como distancia segura entre el sitio elegido para la construcción de un sistema fotovoltaico y los centros poblados.

Se establece una zona de influencia de dos kilómetros de la zona urbana. En la tabla 17 Pesos para el subcriterio Zona Urbana se observa una asignación de peso 9 para las áreas sin presencia de zona sin urbanización y de Restringido para las zonas donde hay zonas urbanas. En la figura 24 se observa el mapa resultante.

Tabla 17

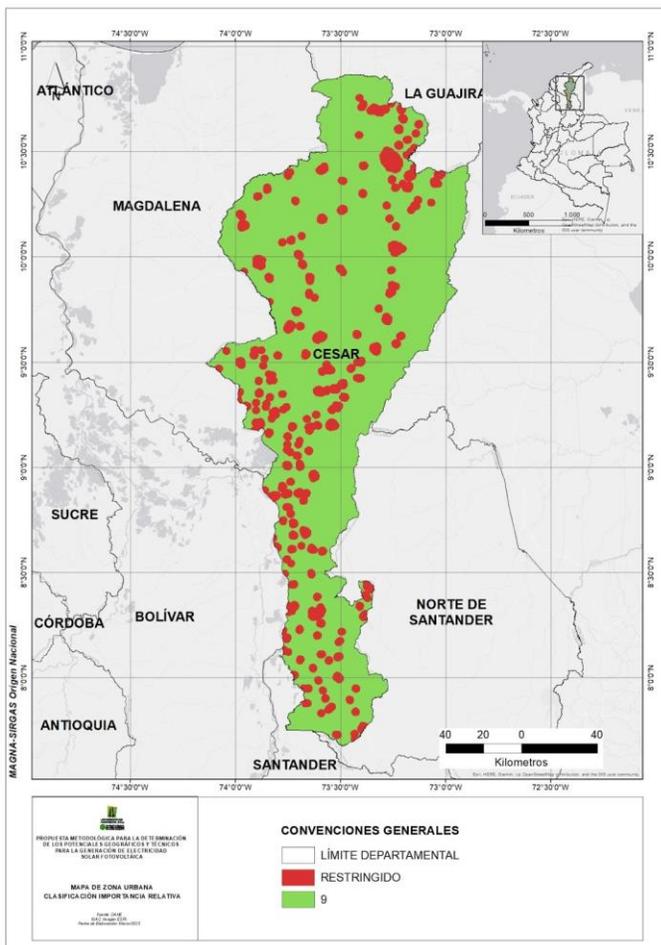
Pesos para el subcriterio Zona Urbana

VARIABLE	CLASE	VALOR	PESO
ZONA URBANA	Urbanización + Buffer 2K	0	Restringido
	Zona sin urbanización	1	9

Fuente: Elaboración propia

Figura 24

Zona Urbana con Área de Influencia - Clasificación Importancia Relativa



Fuente: Elaboración propia a partir del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Instituto Geográfico Agustín Codazzi

6.3.3 Mapa de Superposición Ponderada

Mediante el Modelo de Jerarquización de Criterios y Subcriterios que se observa en la tabla 18 y los pesos calculados en la tabla 8 se obtiene la Superposición ponderada de variables a través de la aplicación de la herramienta “Weighted Overlay” de ArcGIS multiplicando los valores de celda de cada ráster de entrada por el peso de importancia del raster obteniendo el raster de salida.

Tabla 18

Modelo de Jerarquización de Criterios y Subcriterios

Tabla 18. Modelo de Jerarquización de Criterios y Subcriterios

SITIOS PARA UBICACIÓN DE GRANJAS SOLARES							
PVOUT	REDES DE ALTA TENSIÓN	VIAS	PENDIENTES	ÁREAS PROTEGIDAS	ZONAS SUSCEPTIBLES DE INUNDACIÓN	CUERPOS HÍDRICOS	ZONA URBANA
Zonas con potencial fotovoltaico menor igual a 1453 kWh/año	Zonas sin presencia de redes de alta tensión	Zona con restricción normativa	0 a 3% Plana a ligeramente plana	Zona protegida	Zona susceptible de inundación	Zona con cuerpo hídrico y ronda hídrica	Zona urbanizada y área de influencia de 2Km
		Zona de influencia de 1Km	3 a 7% Ligeramente plana a ligeramente ondulada				
Zonas con potencial fotovoltaico mayor igual a 1453 kWh/año	Zonas con presencia de redes de alta tensión	Zona de influencia de 5 km	7 – 12% Ondulada a inclinada	Zona no protegida	Zona no susceptible de inundación	Zona sin cuerpo hídrico	Zona no urbanizada
		Zona de influencia mayor a 5 km	>12% Ondulada a Muy escarpada				

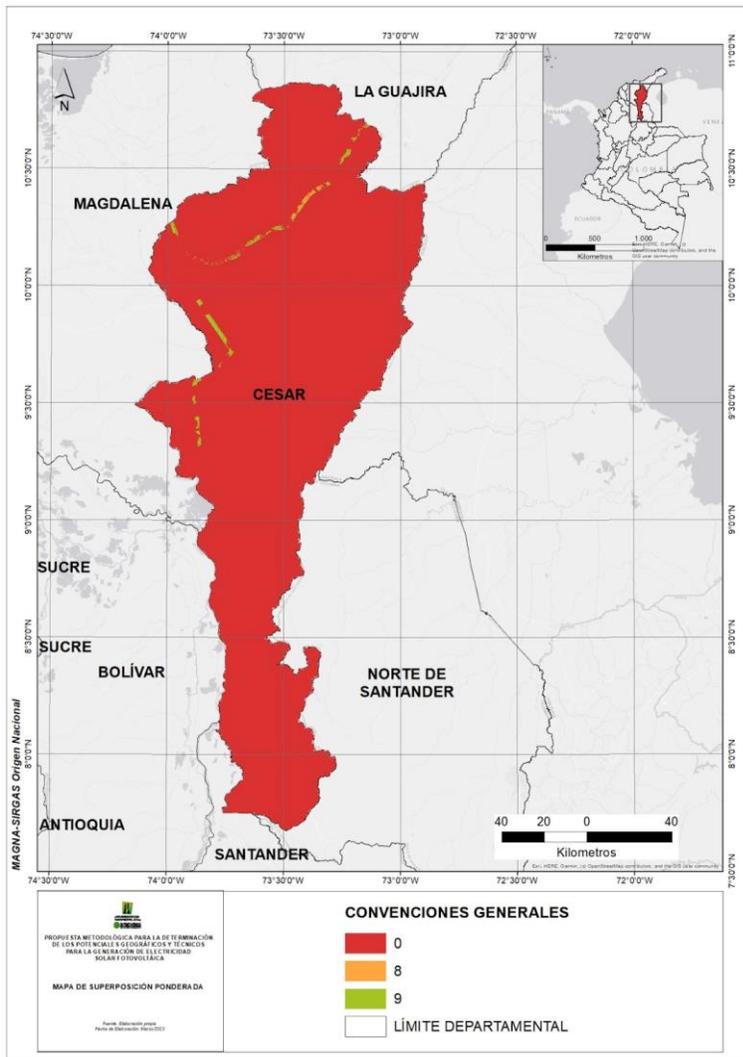
Fuente: Elaboración propia

Se obtiene el mapa de Superposición Ponderada con tres rangos que corresponden al grado de dificultad para instalar una granja solar tomando los valores 0, 8 y 9 donde 9 y 8 corresponde a las zonas más apropiadas y 0 donde se presenta una mayor dificultad.

7. Resultados

En el capítulo anterior se obtuvo la jerarquización de las variables o criterios de evaluación y de exclusión mediante la formulación de la matriz de Importancia desarrollada por tres expertos, posteriormente se obtuvo la ponderación y validación de los subcriterios de las variables Pendientes, Zonas Urbanas, Potencial de Energía Fotovoltaico, Cuerpos Hídricos, Redes de Alta Tensión, Vías, Áreas Protegidas y Zonas Susceptibles de Inundación.

Se elaboró el Modelo de Jerarquización de Criterios y Subcriterios y se obtuvo la Superposición Ponderada de las variables. A través de la herramienta “*Weighted Overlay*” se obtuvo el mapa de Superposición Ponderada que se observa en la figura 25.

Figura 25**Mapa de Superposición Ponderada**

Fuente: Elaboración propia

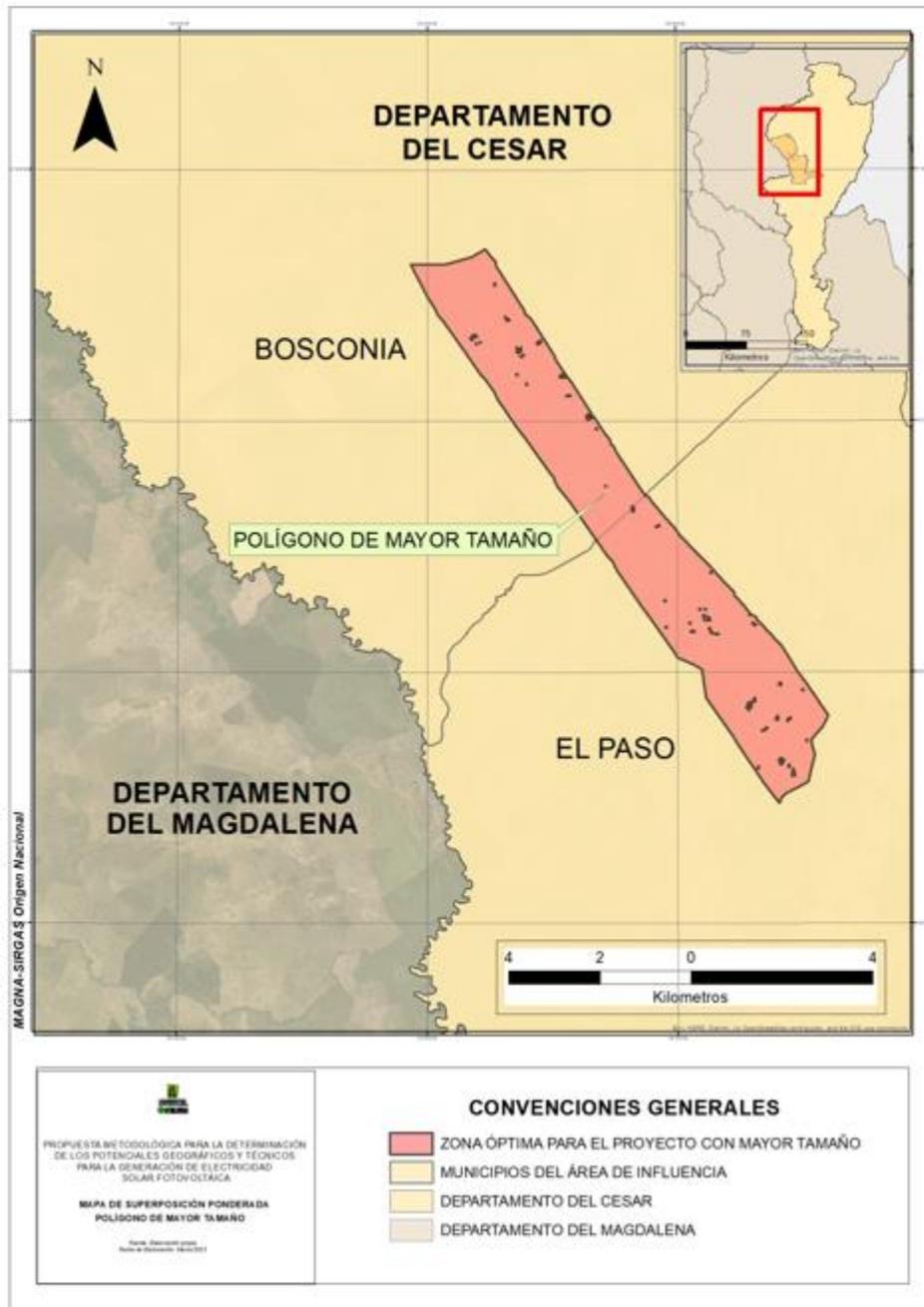
Las zonas más apropiadas se encuentran sobre el costado nororiental del departamento en los municipios de Chimichagua, Astrea, El Paso, Bosconia, El Copey y Valledupar. En estas zonas son adecuadas debido principalmente a que es allí donde se localizan las redes eléctricas y otros criterios como la no presencia de áreas protegidas, ausencia de drenajes, cercanía a las vías y una distancia adecuada a los centros urbanos.

Las zonas con mayor grado de dificultad abarcan una gran extensión del departamento del Cesar debido a la ausencia de redes de alta tensión, y presencia de pendientes inadecuadas para el establecimiento de los paneles solares.

Se identificaron 4424 polígonos con áreas que oscilan entre los 0.06 y los 2265.69 Ha. Luego de una depuración se identificaron 437 polígonos con un tamaño superior a una hectárea. El polígono de mayor tamaño mayor tamaño se encuentra ubicado entre los municipios de Bosconia y El Paso, tiene una extensión de 2265 hectáreas, contiene dentro de sí 68 zonas que no cumplen con la evaluación multicriterio por razones como la pendiente o la cercanía a las vías. El polígono completo con las 68 zonas de no cumplimiento tiene un área total de 2324.14 hectáreas. En la figura 26 Mapa de Superposición ponderada con Polígono de mayor tamaño se observa la ubicación del polígono.

Figura 26

Mapa de Superposición ponderada con polígono de mayor tamaño



Fuente: Elaboración propia

El polígono de mayor tamaño puede tener una capacidad instalada de 1132.84 MW (0.5MW/Ha) con 2 '059.718 paneles de 550W. Esto teniendo en cuenta las áreas de mantenimiento y desperdicio.

8. Conclusiones

- Los criterios fueron seleccionados teniendo en cuenta la escala general, es un aporte a la fase de prefactibilidad de un proyecto. En la revisión documental se identificaron catorce criterios de evaluación y de exclusión que generalmente se utilizan en el desarrollo de este tipo de proyectos. De los catorce criterios se tuvieron en cuenta ocho: cuatro de evaluación y cuatro de exclusión. No se consideraron los siguientes criterios: *radiación solar, duración de la luz solar, temperatura, humedad relativa, zonas militares y aeropuertos*. Estos criterios se descartaron por diversas razones. Los criterios radiación solar, duración de la luz solar, temperatura y humedad relativa no se tuvieron en cuenta porque para obtener esta información se requería realizar un estudio de campo usando los datos de las estaciones meteorológicas y climáticas de la zona. Para solucionar este inconveniente se utilizó una herramienta llamada Potencial de Energía Fotovoltaica (PVOUT) de la empresa eslovaca SolarGIS. Esta herramienta nos permite conocer cuál es el potencial de energía fotovoltaica de cualquier parte del mundo usando imágenes satelitales. El criterio de los aeropuertos fue incluido en el criterio de Áreas Urbanas al estar contenido en esta. El criterio de zonas militares no fue incluido por ausencia de información. Los criterios de evaluación son: Potencial de Energía Fotovoltaica (PVOUT), redes de alta tensión del Sistema Interconectado Nacional (SIN), Pendientes y

Vías. Los criterios de exclusión son: Zona urbana, cuerpos de agua, áreas protegidas y zonas susceptibles a inundación.

- Utilizando la metodología AHP (*Analytic Hierarchy Process*) fue posible construir la Matriz de Importancia de Criterios mediante la evaluación de tres expertos. Estos, luego de la deliberación, jerarquizaron las variables consiguiendo una Relación de Consistencia (RC) de 8.34%, siendo una consistencia aceptable. Para poder ingresar al modelo, las variables áreas protegidas, cuerpos de agua, zona urbana, zonas susceptibles de inundación, potencial de energía fotovoltaica y red de alta tensión, fueron configuradas como variables booleanas basadas en el principio de presencia - ausencia evitando resultados de zonas en estas áreas por razones técnicas y normativas.
- Se identificaron 4424 polígonos con áreas que oscilan entre los 0.06 y los 2265.69 Ha. Se observa que gran parte de los polígonos más pequeños, aunque tienen una pendiente llana, están localizados en zonas con inmediaciones que no cumplen los criterios de pendientes. Luego de una depuración se identificaron 437 polígonos con un tamaño superior a una hectárea. Se identificaron 40 polígonos con tamaño superior a las 100 Ha., uno con tamaño de 546.46 Ha, y otro con 729.85 Ha.
- El polígono con mayor tamaño se encuentra ubicado entre los municipios de Bosconia y El Paso; contiene dentro de él 68 zonas que no cumplen con la evaluación multicriterio por razones como la pendiente o la cercanía a las vías. El polígono completo con las 68 zonas de no cumplimiento tiene un área total de 2324.14 Ha., sin embargo, el área óptima es de 2265.69 Ha para este polígono. Las zonas óptimas concuerdan con los criterios de evaluación y de exclusión siendo las más adecuadas debido principalmente a que es allí donde se localizan las redes eléctricas y otros criterios como la no presencia de áreas

protegidas, ausencia de drenajes, cercanía a las vías y una distancia adecuada a los centros urbanos.

- Las zonas con mayor grado de dificultad abarcan una gran extensión del departamento del Cesar debido a la ausencia de redes de alta tensión, y presencia de pendientes inadecuadas para el establecimiento de los paneles solares.
- Se identificaron las variables que influyen dentro de la instalación de un proyecto de granja solar. Se jerarquizaron las variables aplicando la metodología AHP y se elaboró un modelo insumo para la Evaluación Multicriterio (EMC).

9. Recomendaciones

- En fases más avanzadas del proyecto se recomienda la aplicación de estudios detallados que abarquen criterios sociales, jurídicos y técnicos para asegurar la viabilidad del mismo con trabajo de campo.
- Se debe realizar la recolección de datos en campo para asegurar el cumplimiento de los criterios ya que este es un estudio preliminar donde se generaron salidas gráficas con una resolución espacial de 30 metros.
- Para este estudio se utilizaron las Redes de Alta Tensión suministradas por el portal Datos Abiertos del IGAC. Se recomienda utilizar la base de datos geográfica de la empresa de Transmisión de Energía que opera en el departamento.

10. Referencias

- Effat, H. A., & El-Zeiny, A. M. (2022). Geospatial modeling for selection of optimum sites for hybrid solar-wind energy in Assiut Governorate, Egypt. In *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* (Vol. 25, Issue 2, pp. 627–637).
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.03.005>
- Estapà, J. S. (2003). *El cumplimiento del Protocolo de Kioto sobre cambio climático*. Edicions Universitat Barcelona.
- García Pachón, M., & Navas, Ó. D. A. (2017). Retos y compromisos jurídicos de Colombia frente al cambio climático. U. Externado de Colombia.
- Garni, H. Z. A., Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. (2018). Solar PV Power Plants Site Selection. In *Advances in Renewable Energies and Power Technologies* (pp. 57–75).
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812959-3.00002-2>
- Ghose, D., Naskar, S., Shabbiruddin, Sadeghzadeh, M., El Haj Assad, M., & Nabipour, N. (2020). Siting high solar potential areas using Q-GIS in West Bengal, India. In *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (Vol. 42, p. 100864).
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100864>
- Gómez M., Barredo J. (2006) *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*.
- Gómez, J., Murcia, J., Cabeza, I., (2017) *La Energía Solar Fotovoltaica en Colombia: Potencialidades, Antecedentes y Perspectivas*. Universidad Santo Tomás. (pp 3).
- GIS-based assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa. (2018). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2088–2103.

- GIS-based suitability analysis for siting solar power plants in Kuwait. (2021). *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 24(3), 453–461.
- Hernandez, Fernandez & Baptista (2010) *Metodología de la Investigación*
- He, Z.-X., Xu, S.-C., Li, Q.-B., & Zhao, B. (2018). Factors That Influence Renewable Energy Technological Innovation in China: A Dynamic Panel Approach. In *Sustainability* (Vol. 10, Issue 2, p. 124). <https://doi.org/10.3390/su10010124>
- Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study: Eastern Morocco. (2018). *Renewable Energy*, 119, 863–873.
- Merino, L., Mosquera, P. Solar Fotovoltaica. *Energías Renovables*, 5.
- 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. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 149, p. 111310). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111310>
- Sales, G., Grau, O., (2011) *Convertidores Electrónicos: Energía Solar Fotovoltaica, Aplicación y Diseño*. 978-84-8363-750-0
- 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. In *Renewable Energy* (Vol. 132, pp. 68–80). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.081>
- Saaty, T. L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process Planning Priority Setting, Resource Allocation* (Vol.1) New York: McGraw Hill.

Serrano, J. L. (2008). Principios de derecho ambiental y ecología jurídica.

Solargis. (2023)

<https://solargis.com/es>

Unidad de Planeación Minero Energética (2020) Plan Energético Nacional 2020 - 2050.

https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética (2015) Integración Energías no Convencionales en Colombia.

http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf

Yusckenkoa A., de Bono A., Chatenoux B., Kumar M., Ray N. (2019) GIS – based assessment of photovoltaic (PV) an concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa.

Zúñiga, T. N., & Ornetta, V. M. C. (2013). Diseño de sistemas de energía solar fotovoltaica - aplicación en el Perú. Paideia XXI, 3(4), 160–170.