

**AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA
TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN
PROYECTOS FOTOVOLTAICOS**



**UNIVERSIDAD EAN
SEMINARIO DE ESPECIALIZACION E+**



INFORME FINAL

TITULO:

**AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA TERRENOS DONDE
SE DESARROLLARÁN PROYECTOS FOTOVOLTAICOS**

YEIMI TATIANA GAVALAN HIDALGO

GEAN FRANCO DIAZ RODRÍGUEZ

Programa académico, Especialización en Gerencia de proyectos.

OSCAR ARMANDO GAVIDIA ALBARRACIN

Programa académico, Especialización en machine learning

BOGOTÁ, DICIEMBRE 2024

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	5
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	7
1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	8
Planteamiento del problema	8
Descripción del problema.....	8
¿Pregunta de investigación?	8
2 OBJETIVOS	9
Objetivo General	9
Objetivos Específicos	9
3 MARCO TEÓRICO.....	10
Marco conceptual	10
3.1.1 AHP2	10
3.1.2 MCDM (análisis multicriterio).....	11
3.1.3 HEURISTICOS	12
3.1.4 BOLEANOS BINARIOS o FUZZY LOGIC	12
Estado del arte	13
Enfoque de uso en la automatización.	17
4 MARCO LEGAL.....	19
5 METODOLOGIA.....	20
Enfoque, alcance y diseño de la investigación.	20
5.1.1 Enfoque:	20
5.1.2 Alcance:.....	20
5.1.3 Diseño:.....	22
Selección de métodos o instrumentos para recolección de información.	22
5.1.4 Fuentes Primarias:	22
5.1.5 Fuentes Secundarias:	23

**AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA
TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN
PROYECTOS FOTOVOLTAICOS**



5.1.6 Instrumentos:	25
Técnicas de análisis de datos.	26
5.1.7. Cronograma de actividades	27
5.1.8. Presupuesto.....	27
6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	30
6.1. Selección de variables	30
6.1.1 Del medio natural y protección ambiental.....	31
6.1.2 Estructura predial.....	37
6.2. Diseño del Modelo	42
6.2.1. Selección de Variables y Criterios de Evaluación.....	42
6.2.2. Implementación del Modelo Automatizado	42
6.2.3. Resultados del modelo.....	43
6.2.4. Validación del modelo.....	44
6.3. Prototipo de automatismo.....	44
7. CONCLUSIONES	46
8. BIBLIOGRAFÍA	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Leyes que regula el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos.....	19
Tabla 2 Geoportales con sus variables	24
Tabla 3 Técnicas de análisis de datos	26
Tabla 4 Presupuesto.....	28
Tabla 5 Variables de exclusión (Rondas hídricas, humedales, pantanos, lagunas y ciénagas)	34
Tabla 6 Variables de media desviación estándar y cuártale	38

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Método Heurístico	12
Ilustración 2 Mapa de los departamentos costeros de Colombia.....	21
Ilustración 3 Diagrama de GANTT	27
Ilustración 4 Determinantes ambientales del medio natural.....	32
Ilustración 5 Áreas SINAP al área de interés	33
Ilustración 6 Determinantes asociadas a ecosistemas estratégicos y áreas de importancia ecológica.....	34
Ilustración 7 Áreas asociadas a ecosistemas estratégicos.....	35
Ilustración 8 Subzonas hidrográficas de intercepto al área de estudio.....	36
Ilustración 9 Predios rurales por municipio al área de interés.....	37
Ilustración 10 Diagrama de cajas en distribución del tamaño de la propiedad en hectáreas	39
Ilustración 11 Variables discriminación por municipio	40
Ilustración 12 Distribución de predios rurales al área de interés.....	41
Ilustración 13 AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN PROYECTOS FOTOVOLTAICOS	45

RESUMEN

El presente trabajo de investigación aborda la problemática de la selección de terrenos para proyectos solares fotovoltaicos en la zona costa de Colombia, donde factores como la distancia al punto de conexión, accesibilidad, delimitación catastral y aspectos legales complican la viabilidad de los proyectos. El objetivo principal es desarrollar un prototipo automatizado basado en SIG, análisis multicriterio y técnicas de programación, que permita identificar terrenos óptimos desde la etapa de planificación.

El marco teórico explora métodos como AHP, MCDM, lógica difusa y técnicas heurísticas, así como la integración de inteligencia artificial para refinar la selección predial. Además, se incluye un análisis del estado del arte a nivel global para contextualizar la aplicación de estas herramientas en proyectos energéticos.

Como resultado, se espera un sistema que filtre predios según criterios configurables y genere mapas de calor que faciliten la toma de decisiones. La validación se realizará mediante casos de estudio en la región, con el fin de demostrar su efectividad y su impacto en la reducción de riesgos y optimización de recursos. Este trabajo contribuye significativamente al desarrollo de proyectos sostenibles y a la expansión de la infraestructura energética en Colombia

PALABRAS CLAVES: Automatización predial, Proyectos fotovoltaicos.

INTRODUCCIÓN

La expansión de los proyectos solares fotovoltaicos en la zona costa de Colombia presenta un desafío estratégico y técnico: la selección adecuada de terrenos para el desarrollo de granjas solares. Este desafío se acentúa en un territorio con alta irradiancia solar, pero con problemáticas asociadas a aspectos técnicos, económicos y legales en la escogencia predial. A partir de la necesidad identificada en WE POWER, donde se han perdido proyectos debido a la selección inadecuada de terrenos, surge este trabajo de investigación enfocado en el diseño de un sistema automatizado. Este sistema combinará herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), algoritmos de análisis multicriterio y evaluación de datos catastrales y legales, con el objetivo de optimizar el proceso de selección predial.

El proyecto no solo busca superar las limitaciones actuales, sino también ofrecer una solución innovadora que integre tecnologías emergentes y métodos avanzados de toma de decisiones. A través de un enfoque sistemático, este trabajo plantea una alternativa eficiente y replicable para mejorar la planificación y ejecución de proyectos solares fotovoltaicos, contribuyendo a la sostenibilidad energética de la región.

1 PROBLEMA DE Investigación

Planteamiento del problema

La problemática radica en la escogencia de predios óptimos para llevar a cabo todo el desarrollo de granjas solares fotovoltaicas en distintos sectores de la zona costa de Colombia, partiendo que esta tiene unas de las mejores irradiancias dentro del territorio nacional. Con esto se busca mejorar la calidad a la hora de llevar proyectos a una fase constructiva sin ningún reproceso o inconveniente que lo retrase o cancele.

Descripción del problema

Este problema surge en WE POWER desde la perdida de proyectos solares fotovoltaicos, por inconvenientes relacionados a la selección predial, esto a partir de no tener clara la información preliminar desde la búsqueda de terrenos con las variables básicas para viabilizar un proyecto predialmente. Entre las principales variables encontramos:

- ✓ Terrenos baldíos o con procesos de sucesión activos.
- ✓ Ubicación remota o ausencia de vías de acceso en condiciones adecuadas.
- ✓ Excesiva distancia al punto de conexión, afectando la viabilidad financiera.
- ✓ Mal delimitación de los linderos catastrales y falta de precisión en la información georreferenciada.

Estos problemas evidencian la necesidad de un mejor sistema preciso que facilite la selección de predios óptimos, minimizando riesgos y aumentando la eficiencia en la planificación y ejecución de proyectos solares fotovoltaicos.

¿Pregunta de investigación?

¿Cómo puede desarrollarse un sistema de automatización por código que optimice la selección de predios para proyectos solares fotovoltaicos en la zona costa de Colombia, garantizando criterios de viabilidad técnica, económica y legal desde la etapa de planificación?

2 Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un sistema codificado de búsqueda predial que permita identificar terrenos óptimos para proyectos solares fotovoltaicos en la zona costa de Colombia, garantizando la viabilidad técnica desde esta área.

Objetivos Específicos

- ✓ Seleccionar las variables clave para los terrenos y así utilizarlos en proyectos solares fotovoltaicos, incluyendo irradiancia, acceso, propiedad legal, delimitación catastral y proximidad al punto de conexión.
- ✓ Diseñar un modelo automatizado de evaluación predial basado en dichas variables, utilizando herramientas geoespaciales y técnicas de análisis de datos.
- ✓ Elaborar un prototipo inicial del sistema de búsqueda predial, estableciendo la estructura y la lógica de funcionamiento del automatismo, sin llevar a cabo pruebas completas, pero asegurando que el diseño sea adecuado para su implementación futura.

3 Marco Teórico

Marco conceptual

La coexistencia de diversos métodos para la obtención de áreas óptimas, potenciales o identificación de terrenos que cumplan con diversos niveles de decisión, criterios o jerarquías involucra una dicotomía entre el componente espacial óptimo y no óptimo en relación con lugares geográficos que se adaptan a diversas condiciones necesarias que permitan establecerse como posibles áreas o lugares para la instalación de infraestructura operativa siendo este un caso de interés la localización de plantas o granjas solares.

A este aspecto, los métodos más usados corresponden a AHP¹(procesos de jerarquía analítica), MCDM²(toma de decisiones multicriterio), FUZZY LOGIC³ (lógica difusa) y heurísticos desde el criterio experto a través del uso de los sistemas de información geográfica. Recientemente mediante al auge de la inteligencia artificial y el interés en la programación desde el machine learning en inclusión de modelos tales como, random forest (RF), multi – layer perceptron (MLP-network), extrem gradiente boosting (XGBoost), y las redes neuronales, permitirán afinar modelos previos obtenidos desde la analítica multicriterio. (Yanwei, Danfeng, Ying , & Run, 2023)

3.1.1 AHP2

El proceso analítico jerárquico propuesto por (Saafy, 1980) realiza la ponderación de los criterios a evaluar partiendo de una comparación relativa. Bien sea el caso para los criterios de tipo excluyente, que están acordes con la normatividad vigente del área de estudio u/o determinantes de tipo ambiental, o los de tipo incluyente que son evaluados en rangos de

¹ Analytic Hierarchy Process (Proceso de Jerarquía Analítica).

² Multi-Criteria Decision Making (Toma de decisiones multicriterio)

³ Fuzzy Logic (Lógica Difusa)

sustentabilidad agrupados en disímiles y homogéneos. (Nema & Gupta , 1997) Este tipo de métodos se usa para evaluar variables complejas.

Dentro de las características de decisión por factor en los métodos AHP, cada una de ellas se establece mediante la importancia relativa, ampliando la probabilidad de áreas con una diversidad de condiciones que no son del tipo excluyentes en relación con métodos como la lógica difusa. Este planteamiento permite determinar áreas potenciales con connotaciones preferenciales en base al cálculo de los pesos de los factores de decisión. (Siddiqui, Everett, & Vieux, 1996) Sus resultados corresponden así a áreas óptimas.

Métodos alternativos como el MCDM MACBETH (Demesouka , Vavatsikos, & Anagnostopoulos, 2016), ofrece alternativas tales como “Simple de usar, bien conocido, limpia y facilita la explicación de los parámetros técnicos, precisa en el proceso la importancia relativa del criterio, previene las dificultades que pueden presentarse en cada conjunto ordinal” (Using MACBETH Multicriteria techniquefor GIS-Based Landfill Suitability Analysis, 2016, pág. 2) es muy análogo al método AHP.

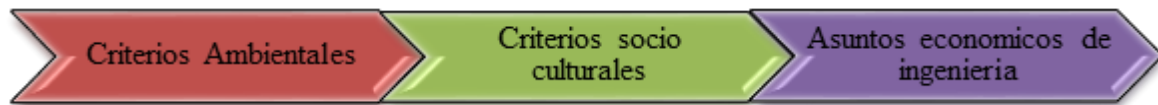
3.1.2 MCDM (análisis multicriterio)

Dentro del análisis multicriterio, métodos complementarios permiten establecer alternativas de uso para la obtención de variables clasificadas o ponderadas siendo estos el WO que sus siglas en ingles corresponden a una superposición ponderada, ampliamente usado en la evaluación e identificación de recursos naturales como geotermia (M, M., & M, 2015), evaluación del riesgo (Nasir, Sheeba , Bubul, Ejaz, & Faisal, 2022) y (Zakariva, Raid Mahmood, & Safwa Waleed, 2024), evaluación de áreas potenciales para energía (Sena, Elif, Ufuk, & Gul E, Assessing agrivoltaics potential in Türkiye – A geographical information system (GIS)-based fuzzy multi-criteria decision making (MCDM) approach, 2024) o gestión de recursos hídricos (R, Ajit, Kunal, & Chirag, 2018), ponderando en sumatoria cada variable objeto de análisis espacial enfocado a solucionar o estimar la factibilidad de búsquedas de áreas de interés por temática aplicado desde criterio experto.

3.1.3 HEURISTICOS

El método heurístico es ampliamente usado en la toma de decisiones a partir de múltiples factores, la replicación de modelos de este tipo permite definir áreas potenciales, y en segundos casos encontrar el área optima a partir del primer modelo (Área potencial). (Yueh Lin & Jung Kao, 2005).

Ilustración 1 Método Heurístico



Fuente: (Yueh Lin & Jung Kao, 2005)

La selección de los criterios, en diversas latitudes mundiales, obedece a políticas que salvaguarden la conservación del medio ambiente, con relación a estas directrices la utilización de diferentes metodologías entre ellas las del tipo heurístico es ampliamente usada. Algunas de estas incluyen criterios de; geología, topografía, aguas superficiales y subterráneas, uso del suelo, costos y transporte. (Murray & Church, 1995), (Meng, Zhimou, Jinwei, Xiao, & Zhuxiao, 2024)

3.1.4 BOLEANOS BINARIOS o FUZZY LOGIC

La utilización del fuzzy logic o métodos boléanos binarios, ha sido ampliamente utilizada en estudios de caso bajo la disposición de modelos que cumplan con la normatividad con relación a la selección de áreas para la construcción de granjas solares (Sena, Elif, Ufuk, & Gul E, 2024), (Zakariva, Raid Mahmood, & Safwa Waleed, 2024) , esta es útil a la hora establecer criterios de exclusión. Mediante este tipo de método la unidad de trabajo la conforma la celda u unidad de análisis para información de tipo espacial en formatos tipo raster, cada celda contiene su respectivo valor de tipo binario 1 o 0, los criterios evaluados son planteados acorde a legislación, restricción, experiencia y experticia de varios aspectos.

(Kamaleddin, Tausif, Yie, & Ayyoob, 2023) Dentro de la primera fase “Selección de áreas potenciales” esta información es integrada a modelos de segunda generación que evalúa criterios con el fin de determinar el área óptima (factores ambientales, económicos, ingenieriles y socio culturales).

Estado del arte

El uso de los métodos dentro de los análisis multicriterio es amplio y presenta diversas alternativas, técnicas e incluso variables de superposición a continuación presentaremos síntesis del marco teórico de referencia en alusión a establecer el método y variables de uso,

(Zakariva, Raid Mahmood, & Safwa Waleed, 2024), en este estudio se selecciona nueve criterios de evaluación, haciendo uso de métodos como el proceso de jerarquía analítica (AHP), haciendo uso de tres métodos, la suma pondera (WO), técnica para orden de preferencia por similitud con la solución ideal (TOPSIS), y la ponderación aditiva simple (SAW). Tomando como región de estudio la gobernación de Erbil en la región de Kurdistán Irak, el modelo es construido usando el software de Arcgis y model builder a fin de determinar el mapa de radiación solar, desde la obtención de variables tales como; mapa de pendientes, dirección, aspecto, radiación solar, áreas residenciales, cobertura del suelo y uso, y la preparación de cartografía base red vial, líneas de transmisión y los límites de reserva natural.

El análisis de alternativas usando SIG es diverso y no solo se limitan a Estudios de caso para la ubicación de parques solares a este se le suman parques eólicos. En el reino unido (UE) dentro de un estudio de caso en Lancashire, se utilizan técnicas de ponderación para asignación o calificación de importancia siendo 0 el valor que representa ubicaciones ideales y 10 para ubicaciones inadecuadas. Pese a no definir áreas con exactitud la superposición de variables busca representar áreas con sitios adecuados que permiten la toma de decisión a la hora de localizar sitios para la construcción de parques eólicos. (Serwan & Tim, 2001)

Cuando se identifican estudios de caso en la selección de ubicaciones de plantas de energía solar la analítica multicriterio MCDM difusa, prevalece como estudio de caso. Variaciones a la técnica o método presenta términos como (F-LMAW) que comprende la iteración de

números Z de la metodología de pesos aditivos de logaritmo difuso. En la provincia de Mersin – Turquía, el numero Z aborda la incertidumbre en variables y parámetros utilizando “figuras difusas triangulares para traducir observaciones cualitativas en afirmaciones cuantitativas” propuesta por Zadeh (1965) citado en (Omer, Gulay, Can, & Dragan, 2024)

Como medio de análisis prevalece el uso de los SIG, haciendo uso de herramientas de superposición de valores en sumas, restas o ponderaciones a partir de relaciones geográficas basados en criterios técnicos (temperatura, pendiente), criterios ambientales en relación con la distancia a (áreas agrícolas y residenciales) y finalmente criterios de accesibilidad (distancia a las carreteras mas importantes y la distancia a líneas de transmisión de energía). (Fatih, Mustafa, & Beyhan, 2022)

Fuzzy – AHP, se presenta como metodología alterna para la ubicación de parques solares dentro de un estudio de caso en Irán, partiendo del análisis en subdivisión de aspectos tecnoeconomicos y ambientales, a partir de la lógica difusa y funciones de membresia difusa creando capas de criterios desde los SIG, paralelamente se aplican técnicas del proceso de jerarquía analítica (AHP) ponderando tres capas de análisis (el potencial de radiación solar, la accesibilidad de los enlaces de transporte y la capa de limitaciones humanas y ambientales) a fin de obtener el mapa final de idoneidad de las tierras como parques solares. (Abbas, Mohsen, & Mohamad , 2017)

El uso de esta técnica es altamente usado a nivel global, otro caso de uso corresponde a lo realizado al sureste de España. Desde los SIG se plantean dos tipos de criterios; los condicionantes o restrictivos y los factores que parten de la ponderación, para el primer caso se consideran excluyentes lo que reduce significativamente las áreas de análisis obtenidos desde la legislación (áreas protegidas, redes viales, ferrocarriles, vías navegables etc.) mientras que los de ponderación están en función del objetivo a alcanzar y se enmarcan en la influencia que presenten sobre el objetivo global tales como criterios de localización, geomorfológicos, ambientales y climáticos. (Juan, Sánchez , Jeronimo , & Pedro, 2013)

Prevalen los términos de exclusión, restricción en las que se incluyen áreas restringidas (ríos, lagos, orografía y otras zonas consideradas en los instrumentos de planificación regional), áreas protegidas (áreas de parques nacionales y regionales) y tierras de uso por capacidad que de acuerdo con el sistema de clasificación de la FAO de 1974, los mejores suelos con potencial de productividad se refieren a las clases uno, dos y tres serán excluidos, o áreas de pendientes superiores a 15%, incluso la orientación geográfica como aspecto a tenerse en cuenta a la hora de buscar áreas óptimas para la instalación de plantas solares. (Enrico, Enrico, & Roberto, 2014)

Aplicaciones de técnicas de aprendizaje automático (machine learning), (Yanwei, Danfeng, Ying , & Run, 2023), evalúa de entrada la posición del inventario nacional de instalación solares fotovoltaicas de gran escala, usando 21 factores geoespaciales en modelación de tres técnicas del machine learning (random forest, pecpectron multicapa }y los modelos de aumento del gradiente extremo), para cada tipo de cobertura analizada. Indicando para este ejemplo que dentro de los factores de importancia relativa se encuentra el índice de vegetación, la distancia a la red eléctrica como los predictores mas importantes de la ubicación de la instalación solar fotovoltaica. De impacto moderado los factores topográficos y la red vial o de transporte y por ultimo los de menor significancia la dotación de recursos y factores de índole socioeconómico. (Linnan, Yu , Yuchun, Yanmin, & Lan, 2024)

Existen métodos que buscan encontrar áreas útiles para sistemas híbridos de energía renovable solar y eólica, a través de lógica difusa basada en SIG en fases, la primera corresponde a la búsqueda de literatura de datos geoespaciales en formatos vector y raster, las segunda los combina y analiza, la tercera asigna criterios mediante el método Best – worst (BWM) como alternativa al AHP, la fase cuatro genera el modelo de restricción utilizando

operadores booleanos y cajas de herramienta espacial y dentro de la fase cinco se integra la lógica difusa y lógica booleana. (Kamaleddin, Tausif, Yie, & Ayyoob, 2023)

La localización del lugar optimo es necesario dentro del conglomerado de infraestructura del sector de energía, a su vez las redes de transmisión corresponden al paso siguiente, metodológicamente la obtención es homologa y se base en los SIG, pero acá se busca la ruta más corta o TSP que comparten criterios desde la lógica difusa permitiendo manejar funciones multi objetivos entre algoritmos exactos y aproximados. (Farn & Musse, 2024)

Ahora bien, los SIG se soportan en diversas funciones almacenadas en librerías que, al integrarse en scripts, ahora cuadernos de trabajo (notebook) desde el uso de un backend o kernel permite la ejecución de código y la devolución de resultados personalizando herramientas según diversas necesidades. El auge del código de acceso libre la inteligencia artificial y la programación orientada a objetos abre nuevas posibilidades de personalización de necesidades, dicha personalización se alinea con nuestro marco de referencia divergiendo al uso de código desde el uso de librerías geoespaciales.

GitHub es repositorio de código abierto más usado a nivel mundial, documentos de referencia localizados allí permiten contar con boceto de funciones adaptables a las necesidades de automatización de códigos su uso parte desde el manejo de datos raster, vector y librerías tales como (GeoPandas: Python tools for geographic data, s.f.), entre otros repositorios se encuentran, (Lakmalnd, 2021), (Jean, 2014), (Qiusheng), (Tek, 2024), que permiten la adaptación y lectura de datos desde repositorios locales adaptables al objetivo de esta propuesta.

Para realizar la lectura de los datos en repositorios o de acceso local la librería OS de Python permite la interacción de directorios, manipulación de archivos facilitando la automatización de herramientas en dependencia de las variables o localización de entrada. (Fundacion de Software python, s.f.), en tal sentido el objetivo principal se centrará en el uso de las posibilidades de las librerías de código abierto como numpy (Patricio, 2019), la

clasificación de datos e integración de variables se logra con pandas (Franco, 2020) así como el uso de rasterio para sistemas de información geográfica (rasterio, 2022).

Enfoque de uso en la automatización.

Entorno al barrido teórico, metodologías, casos de uso y alternativas expuestas a fin de encontrar áreas factibles para la implementación de proyectos fotovoltaicos y alineado con el objeto de la propuesta en la que se busca la automatización de búsqueda predial para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos.

En uso de alternativas que trae consigo la inteligencia artificial IA, a través de código abierto y manejo de librerías de datos geoespaciales, versatilidad de formatos “raster – vector”, organización y extracción de resultados parciales ajustables según necesidades. La presente propuesta se centra en:

1. Atención y entendimiento de las medidas o limitaciones medio ambientales en materia de identificar áreas de exclusión, restricción o prohibición para la instalación de infraestructura. Desde la recopilación entorno a variables físicas, bióticas y socioeconómicas restrictivas o excluyentes. Alineadas así a conceptos tales como la lógica booleana o difusa.
2. Implementación o atención de lo señalado en las determinantes entorno a la ordenación del territorio, en las que se demarcan, áreas de exclusión, áreas de protección, áreas en riesgo, equipamientos, áreas de interés arqueológico entre otras a fin prever la atención o actualización de los esquemas de ordenamiento territorial vigentes.
3. Inclusión, organización y estructuración de variables geoespaciales en automatizo de lectura, clasificación, ponderación y evaluación de variables propias de territorio en términos de fisiografía expuesta por las particularidades del territorio desde el uso de cartografía oficial del Instituto geográfico Agustín Codazzi IGAC.

4. Construcción progresiva de código abierto en uso de lenguaje de programación (PYTHON) a fin de generar escalabilidad de las circunstancias geográficas del territorio objeto de análisis correspondiente a la costa colombiana.
5. Generación de reportes parciales de verificación, resultados por temáticas de análisis y síntesis de resultados en términos de indicar o señalar áreas susceptibles a la instalación o desarrollo de proyectos fotovoltaicos
6. Documentación progresiva del código con markdown a fin de construir un cuaderno de trabajo que evidencie el paso a paso dentro de la automatización como herramienta local en su primera etapa.

Lo numerales 1 y 2 retoman en gran medida la identificación de variables de orden físico y ambientales o un término más conciso la exclusión de facto de áreas para la implantación de proyectos de ingeniería común entre los que se localizan los proyectos fotovoltaicos. El numeral 3 alude a particularidades propias de los territorios de análisis en función de aspectos fisiográficos, orográficos. Numerales 4 y 5 denota el proceder o guía sucinta de los pasos para la materialización del código y sexto y último la presentación del código en Python que permite automatizar la búsqueda de terrenos susceptibles para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos.

4 MARCO LEGAL

En el contexto colombiano, el marco legal que regula el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos y la selección predial en el territorio, encontramos las que a continuación se incluyen:

Tabla 1 Leyes que regula el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos

REGULACIONES	DESCRIPCION
LEY 1715 DE 2014	Marco regulatorio general para el aprovechamiento e integración de fuentes no convencionales de energía, especialmente renovables, promoviendo el desarrollo de proyectos de generación solar en Colombia. (COLOMBIA E. C., 2014).
LEY 2099 DEL 2021	Esta ley se dinamiza el mercado energético en Colombia promoviendo el desarrollo de fuentes no convencionales de energía. (REPUBLICA, 2021).
RESOLUCIÓN CREG 174 DE 2021	Regula la conexión de la generación distribuida menor a 1MW, estableciendo requisitos técnicos y legales que afectan directamente la selección predial. (GAS L. C., 2021).
LEY 99 DE 1993	Régimen ambiental que regula el uso del suelo y define zonas protegidas, restringiendo desarrollos en áreas de reserva natural. (COLOMBIA C. , 1993)
CÓDIGO CIVIL COLOMBIANO	Establece las condiciones legales para la titularidad de terrenos, procesos de sucesión y la delimitación de predios. (STATES, 1992)

PLANES DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL (POT)	Cada municipio establece normativas específicas sobre el uso del suelo, identificando áreas permitidas para proyectos energéticos. (Ministerio de Vivienda, 2022).
RESOLUCIÓN 75 DE 2021	Establece los procedimientos y disposiciones para la asignación de capacidad de transporte en el Sistema Interconectado Nacional (GAS C. -C., 2021).

5 Metodología

Enfoque, alcance y diseño de la investigación.

5.1.1 Enfoque:

La investigación tiene un enfoque cualitativo, ya que se centrará en el análisis de documentos técnicos, legales y geoespaciales, sin la manipulación de variables. El objetivo principal es lograr un entendimiento profundo de los criterios clave que deben ser considerados en la selección predial para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos. A través de este enfoque, se pretende identificar las características esenciales que hacen que un terreno sea adecuado para este tipo de proyectos, teniendo en cuenta aspectos técnicos, legales y ambientales dentro de una primera instancia la determinación de las variables de análisis objetas de exclusión.

5.1.2 Alcance:

El alcance de la investigación está delimitado a la zona costa de Colombia, con un enfoque específico en la selección de terrenos óptimos para proyectos solares fotovoltaicos. En particular, se abordarán factores como la distancia al punto de conexión, la accesibilidad de los terrenos y las restricciones legales que puedan existir, tales como problemas de propiedad,

AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN PROYECTOS FOTOVOLTAICOS



limitaciones en la delimitación catastral y otras consideraciones relevantes para la viabilidad del proyecto.

Ilustración 2 Mapa de los departamentos costeros de Colombia



Fuente: D'Colombia (2020)

5.1.3 Diseño:

El diseño de la investigación es de tipo no experimental, transversal y descriptivo:

- ✓ **No experimental:** No se llevará a cabo la manipulación directa de variables, sino que se trabajará sobre información existente proveniente de diversas fuentes secundarias, tales como estudios previos y bases de datos geoespaciales.
- ✓ **Transversal:** Los datos se recolectarán en un solo momento temporal, analizando la información disponible en el presente sin la necesidad de seguimiento a lo largo del tiempo.
- ✓ **Descriptivo:** El estudio tiene como propósito caracterizar el proceso de selección de predios para proyectos fotovoltaicos, basándose en una serie de criterios predefinidos como la irradiancia, la accesibilidad, la propiedad legal, la proximidad a puntos de conexión y la delimitación catastral.

Selección de métodos o instrumentos para recolección de información.

5.1.4 Fuentes Primarias:

Se recurre a fuentes primarias para obtener documentación técnica y geoespacial relevante:

- ✓ Documentación técnica y catastral proporcionada por operadores de red, tales como AIR-E y AFINIA, que contienen datos sobre la infraestructura eléctrica, la ubicación de puntos de conexión y la disponibilidad de terrenos en la zona costa.
- ✓ Geoportales públicos con información predial catastral y de uso del suelo, que proporcionan datos detallados sobre la propiedad de los terrenos, su clasificación y las restricciones que puedan existir para su uso.

- ✓ Recopilación de las determinantes medio ambientales de las que tratan los planes de ordenación de cuencas hidrográficas POMCA, en la que se establecen los usos, prohibiciones y manejo de áreas de importancia ambiental.

5.1.5 Fuentes Secundarias:

Se utilizan fuentes secundarias para enriquecer el análisis y obtener información sobre estudios y normativas previas:

- ✓ Estudios previos sobre análisis multicriterio y SIG (Sistema de Información Geográfica) aplicados a proyectos solares, que proporcionarán metodologías, herramientas y resultados relevantes sobre la selección de terrenos adecuados para proyectos fotovoltaicos.
- ✓ Normativas y legislación relacionada con el sector energético y fotovoltaico, como la Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021, entre otras leyes y regulaciones que afectan la viabilidad de los proyectos solares, tanto a nivel técnico como legal.
- ✓ Variables a tener en cuenta para la selección de terrenos:
 - Línea de conexión no mayor a 500m del predio escogido.
 - La vía de acceso sea transitable para vehículos de carga pesada.
 - Acceso rápido a vías nacionales.
 - Terrenos mayores a 2Ha
 - No haya cruce ni afectación de capas informativas y preventivas.
 - Nacimiento del predio si es baldío, tiene sucesión, es propiedad privada. (R1-R2)
 - Cercanías a centros poblados.
 - Seguridad.

**AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA
TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN
PROYECTOS FOTOVOLTAICOS**



- ✓ Variables para considerar dentro de los geos pórtales de las entidades públicas nacionales o servicios REST de Esri para la descarga directa de información temática.

Tabla 2 Geoportales con sus variables

<i>GEOPORTAL</i>	<i>VARIABLES</i>	<i>URL</i>
<i>IAPH</i>	Conservación de aves	Visor Geográfico · Instituto Humboldt
	Economías ilegales Bosque seco tropical Humedales costeros del Caribe Drenaje Embalses Ciénagas Lagunas Línea Negra - Territorio Ancestral Vocación del suelo Oferta ambiental	Colombia en mapas
<i>IGAC</i>	Municipios ZOMAC	ordenamientoterritorial/municipioszomac (MapServer)
	Reserva biosfera Sustracciones temporales - ley segunda Sustracciones definitivas - ley segunda Drenajes dobles	Portal de Datos Abiertos del Sector Ambiente
<i>MADS</i>	Proyectos de hidrocarburos Pozos petroleros	GeoVisor ANH v3.1 2024
<i>ANH</i>	Títulos mineros	Visor de Geocortex para HTML5
<i>ANM</i>		

**AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA
TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN
PROYECTOS FOTOVOLTAICOS**



<i>IDEAM</i>	Susceptibilidad a inundación	Folder: /
	Susceptibilidad a deslizamientos	
<i>CNMH</i>	Radiación solar	
	Cobertura de suelo	
<i>SGC</i>	Nivel de conflicto	
	Fallas geológicas	
<i>ICANH</i>	Movimientos en masa	Acceso, visualización y consulta de la información georreferenciada del Servicio Geológico Colombiano.
	Amenazas volcánicas medias y bajas	
<i>URT</i>	Amenaza sísmica	
	Sitios arqueológicos	
<i>INFORMACIÓN ADICIONAL</i>	Microzonas	
	Ronda hídrica de drenaje sencillo	
	Ronda hídrica de drenajes dobles	

5.1.6 Instrumentos:

Para la recolección y análisis de la información, se utilizarán los siguientes instrumentos y herramientas:

- ✓ Revisión de bases de datos geoespaciales y normativas, para obtener datos detallados sobre los terrenos, su accesibilidad y las restricciones legales existentes.
- ✓ Análisis de mapas temáticos y datos raster/vector utilizando herramientas como GeoPandas, Rasterio y Python, para procesar la información geoespacial de los terrenos y determinar su idoneidad para proyectos solares. Estas herramientas permitirán realizar análisis de proximidad, estudiar la irradiancia solar y calcular la viabilidad de los terrenos en función de criterios técnicos, legales y ambientales.

Técnicas de análisis de datos.

Una vez recopilados los documentos y estudios, se procede a realizar un análisis cualitativo y descriptivo, con el fin de generar hallazgos que ayuden a optimizar el proceso de selección de terrenos para proyectos solares fotovoltaicos. Para esto se utilizaron las siguientes técnicas de análisis de datos:

Tabla 3 Técnicas de análisis de datos

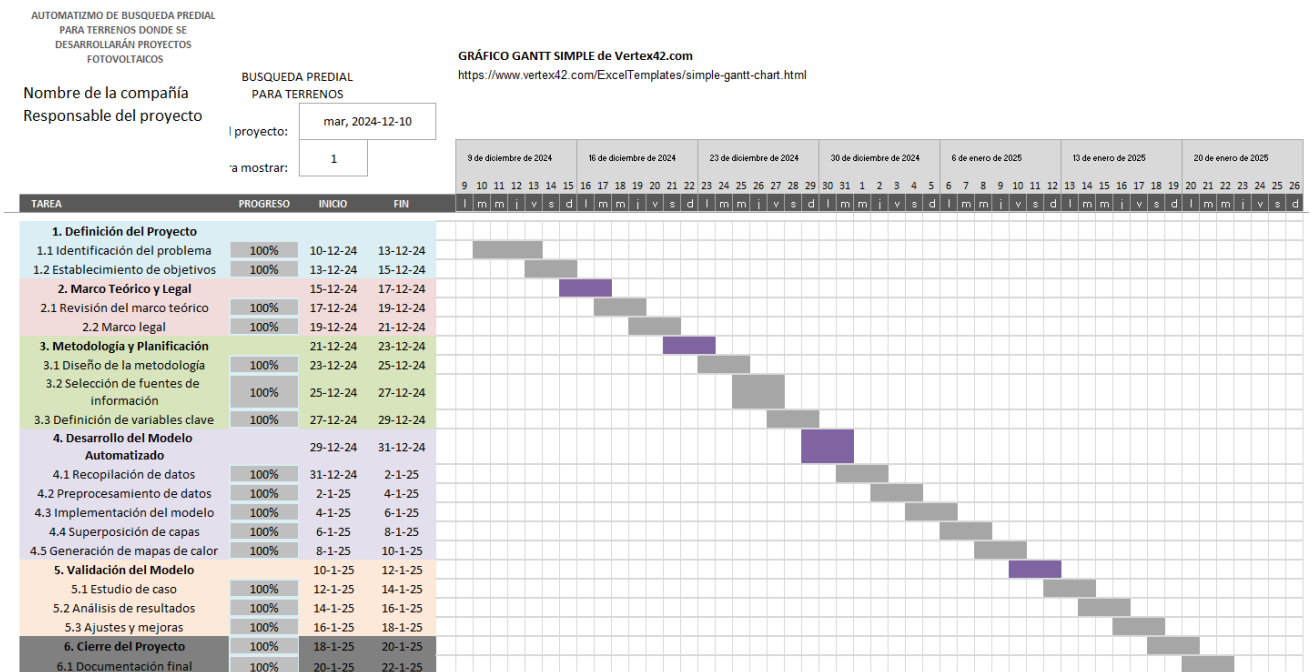
DOCUMENTO /FUENTE	TÉCNICA DE ANÁLISIS	DESCRIPCIÓN
DOCUMENTACIÓN CATASTRAL	(Fuzzy Logic), booleanos binarios	Evaluación de variables como acceso, propiedad legal y delimitación catastral.
GEOPORTALES PÚBLICOS	Superposición ponderada	Identificación de áreas óptimas mediante mapas de calor y criterios jerárquicos.
NORMATIVAS LEGALES (LEYES)	Análisis de contenido	Identificación de restricciones legales aplicables a la selección predial.
BASES DE DATOS SIG	Integración geoespacial	Uso de herramientas SIG para procesar datos espaciales y determinar áreas idóneas.
GITHUB	Análisis de código	Repositorio de código abierto que presenta ejemplos de uso.

Bajo las necesidades de automatización en las que se inicia con la recopilación de información hasta la materialización de un código en el que se integre y clasifican los input e inicio de pruebas funcionales en divergencia de herramientas no concatenadas o estáticas, la generación de un código de automatización es versátil escalable y flexible al ingreso de nuevas capas “determinantes” o cambio de variable se presenta, así como una herramienta útil en una etapa beta en la que se permite en análisis de variables incluyentes o excluyentes en implementación de datos locales.

5.1.7. Cronograma de actividades

La gráfica de Gantt que se presenta a continuación ilustra el cronograma de tareas planificadas para el desarrollo de este proyecto. En ella se detallan las distintas fases y actividades esenciales, desde la selección de variables y el diseño del automatismo, hasta la integración y análisis de los resultados finales. Esta representación visual permite monitorear el avance del proyecto, asegurando que las tareas se ejecuten dentro de los plazos establecidos y facilitando la coordinación y gestión eficiente del tiempo durante todo el proceso de desarrollo.

Ilustración 3 Diagrama de GANTT



Fuente: Elaboración propia

5.1.8. Presupuesto

El presente presupuesto tiene como objetivo detallar los costos asociados a este trabajo. Este proyecto busca desarrollar una herramienta automatizada que optimice la

**AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA
TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN
PROYECTOS FOTOVOLTAICOS**



identificación de terrenos adecuados para la instalación de sistemas fotovoltaicos, considerando factores clave como la proximidad a infraestructuras eléctricas.

Con el crecimiento de la demanda de energía limpia, la automatización del proceso de selección de terrenos para proyectos fotovoltaicos representa una solución eficiente y rentable. Este presupuesto detalla los recursos necesarios para la investigación, desarrollo y validación de la herramienta, abarcando costos de hardware, software y personal, con el fin de facilitar la implementación de proyectos fotovoltaicos.

Tabla 4 Presupuesto

FASE / ACTIVIDAD	COSTO ESTIMADO (COP)	DETALLE
1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO	\$ 2.000.000	Reuniones iniciales, análisis del problema, definición de objetivos.
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	\$ 1.000.000	Investigación preliminar, recolección de datos iniciales.
1.2 ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS	\$ 1.000.000	Sesiones de planificación, alineación con necesidades del proyecto.
2. MARCO TEÓRICO Y LEGAL	\$ 3.500.000	Revisión de literatura, normativas, documentos legales.
2.1 REVISIÓN DEL MARCO TEÓRICO	\$ 2.000.000	Acceso a papers, consultas con expertos, bases de datos.
2.2 MARCO LEGAL	\$ 1.500.000	Consultoría legal, revisión de normativas ambientales y de suelos.
3. METODOLOGÍA Y PLANIFICACIÓN	\$ 4.000.000	Definición de metodología, análisis de variables clave.

**AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA
TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN
PROYECTOS FOTOVOLTAICOS**



3.1 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA	\$ 1.500.000	Selección de enfoques de análisis y procesamiento de datos.
3.2 SELECCIÓN DE FUENTES DE INFORMACIÓN	\$ 1.000.000	Adquisición de datos geoespaciales, bases de datos SIG.
3.3 DEFINICIÓN DE VARIABLES CLAVE	\$ 1.500.000	Análisis de factores críticos para evaluación predial.
4. DESARROLLO DEL MODELO AUTOMATIZADO	\$ 12.000.000	Software, modelado, análisis geoespacial.
4.1 RECOPIACIÓN DE DATOS	\$ 3.000.000	Adquisición de imágenes satelitales, datos SIG.
4.2 PREPROCESAMIENTO DE DATOS	\$ 2.000.000	Limpieza y transformación de datos geoespaciales.
4.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	\$ 4.000.000	Desarrollo en Python/GIS, algoritmos de evaluación.
4.4 SUPERPOSICIÓN DE CAPAS	\$ 2.000.000	Integración de datos en software geoespacial.
4.5 GENERACIÓN DE MAPAS DE CALOR	\$ 1.000.000	Visualización y representación gráfica de los datos.
5. VALIDACIÓN DEL MODELO	\$ 6.500.000	Pruebas, análisis y mejoras.
5.1 ESTUDIO DE CASO	\$ 3.000.000	Aplicación del modelo en un área de prueba.
5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	\$ 2.000.000	Evaluación de precisión y desempeño del modelo.
5.3 AJUSTES Y MEJORAS	\$ 1.500.000	Optimización de algoritmos y ajustes finales.

6. CIERRE DEL PROYECTO	\$ 3.000.000	Documentación y entrega final.
6.1 DOCUMENTACIÓN FINAL	\$ 1.500.000	Elaboración del informe técnico y memoria del proyecto.
TOTAL, ESTIMADO	\$ 31.000.000	(Ajustable según alcance y necesidades específicas)

6 Análisis y discusión de los resultados

6.1. Selección de variables

La inclusión o exclusión de variables dentro de un análisis de superposición de búsqueda para la determinación de áreas susceptibles a la instalación de proyectos fotovoltaicas se amarran en sinergia al marco regulatorio colombiano que en términos de protección de áreas la guía “*Orientaciones a las Autoridades Ambientales para la definición y actualización de las Determinantes Ambientales y su incorporación en los POT municipal y Distrital*” (MINAMBIENTE, 2020), compila los cuatro (4) los principales ejes temáticos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) bajo los cuales se pueden clasificar los determinantes ambientales en miras a establecer la superposición de estas sobre el territorio.

Ilustración 4 Ejes temáticos de determinantes ambientales.



Fuente: Modificado (MINAMBIENTE, 2020)

Para efectos de la presente propuesta de automatización se centrarán los esfuerzos en aquellas que se localizan dentro “del medio natural y protección ambiental” en efecto de la información técnica disponible, así como la correspondencia como elementos de análisis según las alternativas metodológicas identificadas que en este caso giran a métodos (Fuzzy Logic), booleanos binarios que permiten establecer estas áreas como de exclusión por regulación normativa.

6.1.1 Del medio natural y protección ambiental.

Dentro del análisis de información entorno a estas variables y las particularidades espaciales entorno al territorio estos esfuerzos giran en torno a: áreas de especial importancia ecosistémicas y ecosistemas estratégicos, así como las particularidades de cada territorio tomando como punto de partida elementos fisiográficos contenidos en las bases cartográficas IGAC y aquellas derivadas de los instrumentos de planificación “POMCA”

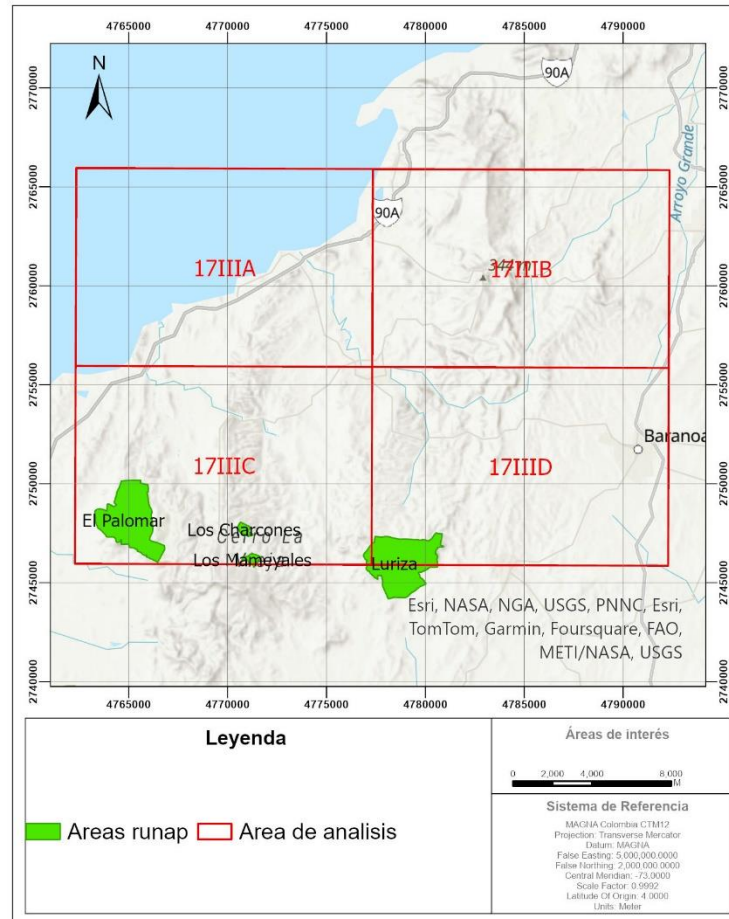
Ilustración 4 Determinantes ambientales del medio natural



Fuente: (MINAMBIENTE, 2020)

La imagen presentada, generada mediante el sistema automatizado desarrollado en este proyecto, muestra la superposición de las áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) con el área de interés para proyectos solares fotovoltaicos. Este análisis es crucial para identificar posibles conflictos entre la conservación de áreas protegidas y el desarrollo de proyectos energéticos. A través de esta visualización, se busca asegurar que los proyectos se implementen de manera sostenible, respetando las normativas ambientales y protegiendo los ecosistemas sensibles.

Ilustración 5 Áreas SINAP al área de interés



Fuente: Elaboración propia

Identificadas las bases cartográficas al área de interés bajo el estándar de presentación del instituto geográfico Agustín Codazzi y en términos de la normatividad colombiana que asegura la protección de elementos fisiográficos en el marco del ordenamiento territorial es primordial establecer las áreas de exclusión o determinante ambiental migradas como áreas de protección o conservación de que trata el decreto 1077 de 2015 entorno a:

Ilustración 6 Determinantes asociadas a ecosistemas estratégicos y áreas de importancia ecológica.



Fuente: (MINAMBIENTE, 2020)

A este aspecto y producto de la información y contenidos referidos en el geo portal de Colombia en mapas [Bases de datos vectoriales por hojas cartográficas - Colombia en mapas](#) 4 bases vectoriales que recubren la cabecera municipal Juan de Acosta departamento de Atlántico son útiles a fin de ser ingresadas dentro del modelo de superposición o automatismo de búsqueda predial.

Tabla 5 Variables de exclusión (Rondas hídricas, humedales, pantanos, lagunas y ciénagas)

Identificación	Geometría	Norma
Drenaje sencillo	Línea	Ronda de protección de 30 metros.
Drenaje doble	Polígono	Ronda de protección de 30 metros
Cuerpos de agua	Punto	Ronda de protección de 100 metros
Lagunas, Ciénagas	Polígono	Ronda de protección de 30 metros.

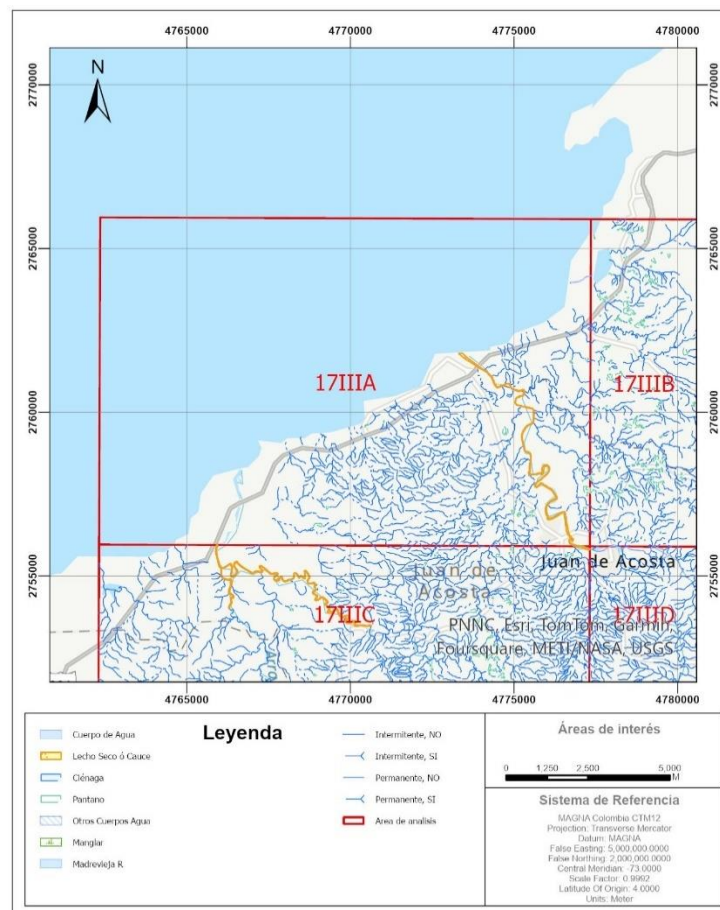
Fuente: Bases cartográficas IGAC modelo de datos.

AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN PROYECTOS FOTOVOLTAICOS



La imagen que se presenta a continuación fue generada mediante el sistema automatizado desarrollado en este proyecto, y muestra las áreas asociadas a ecosistemas estratégicos en la zona de estudio. Estas áreas son cruciales para la conservación ambiental, ya que proporcionan servicios ecosistémicos esenciales como la regulación del ciclo del agua, la protección de la biodiversidad y la mitigación de desastres naturales. A través de este análisis automatizado, se busca identificar y resaltar las zonas que deben ser consideradas en la planificación de proyectos solares fotovoltaicos, con el fin de asegurar su viabilidad técnica y minimizar los impactos ambientales.

Ilustración 7 Áreas asociadas a ecosistemas estratégicos.



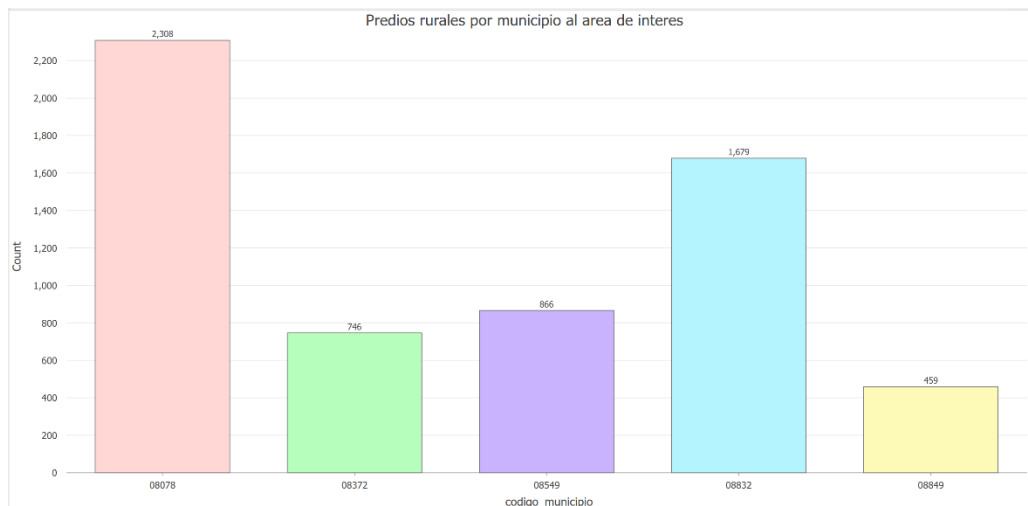
Fuente: Elaboración propia

Dentro de la información útil a ser usada o referenciada dentro del modelo de automatización se encuentra;

6.1.2 Estructura predial

En el marco de la propuesta de automatismo la variable de interés o búsqueda principal corresponde a la delimitación predial en intercepto de los municipios de análisis, la variable principal en descarga se localiza en la plataforma Colombia en mapas. [Bases de datos vectoriales por hojas cartográficas - Colombia en mapas](#) a este aspecto se tiene un total de 6058 predios redistribuidos en 5 municipios que se interceptan al área de interés,

Ilustración 9 Predios rurales por municipio al área de interés



Fuente: Elaboración propia

Con respecto al tamaño el cual comprende una variable de decisión a la hora de implementar la automatización dentro de las variables consultadas se tiene las siguientes estadísticas, un conteo de 6058 elementos cuyo tamaño medio o promedio corresponde a 10.15 hectáreas sobre el cuartil superior es decir mayor al 75% de los datos se localizan

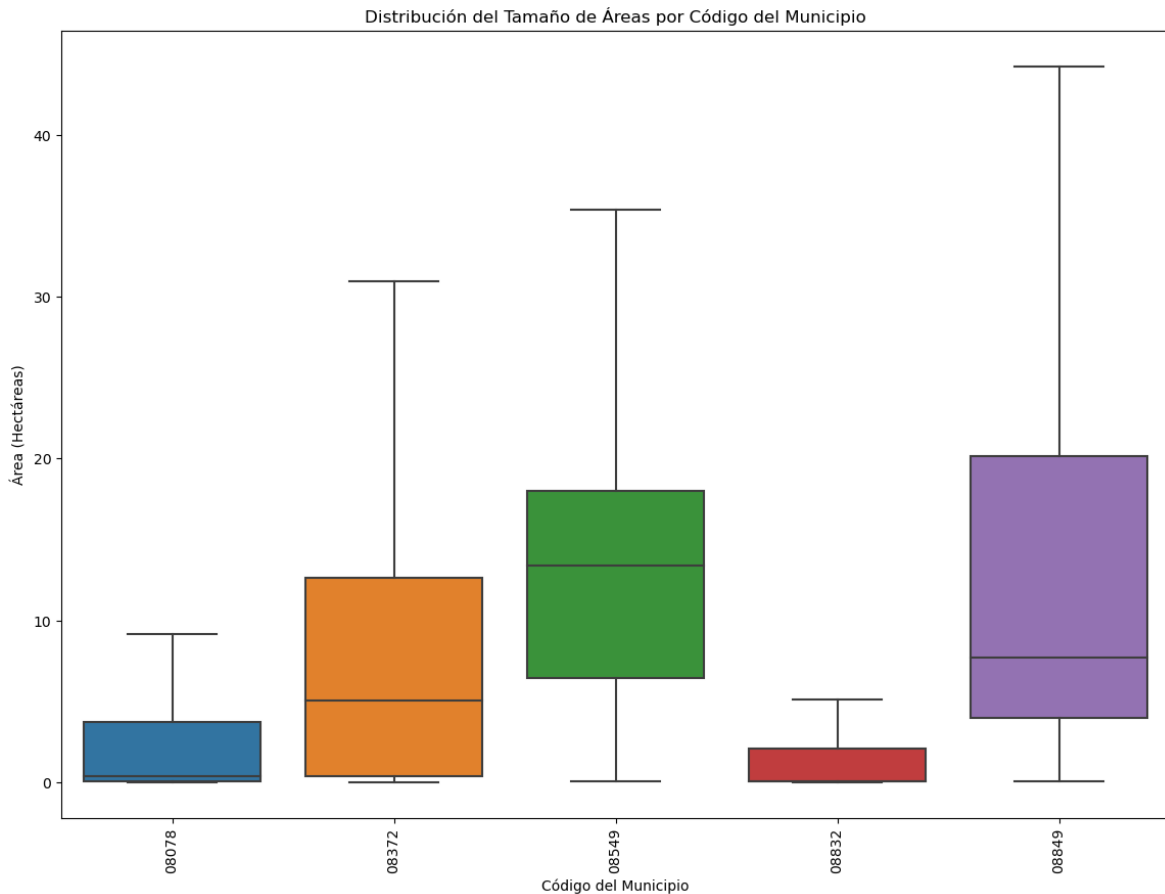
predios que superan los 9.48 hectáreas y un máximo en relación a las áreas de 1229.83 hectáreas lo que presenta una alta dispersión en términos del tamaño del predio rural objeto de análisis.

Tabla 6 Variables de media desviación estándar y cuártile

count	6058.000000
mean	10.153468
std	31.288623
min	0.000988
25%	0.039953
50%	1.712497
75%	9.483796
max	1229.831464

La imagen presentada a continuación, generada mediante el automatismo de nuestro proyecto, muestra un diagrama de cajas que representa la distribución del tamaño de las propiedades en hectáreas dentro del área de interés. Este diagrama permite visualizar la variabilidad y la dispersión de los tamaños de las propiedades, proporcionando una comprensión clara de cómo se distribuyen las superficies de terreno, lo cual es fundamental para la selección de predios adecuados para proyectos solares fotovoltaicos.

Ilustración 10 Diagrama de cajas en distribución del tamaño de la propiedad en hectáreas



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se observa las diferencias y características específicas de cada municipio en relación con las variables clave para la evaluación de terrenos para proyectos solares fotovoltaicos. Al identificar cómo varían estas características a nivel municipal, se facilita la toma de decisiones informadas sobre la viabilidad técnica, económica y legal de los terrenos en cada área

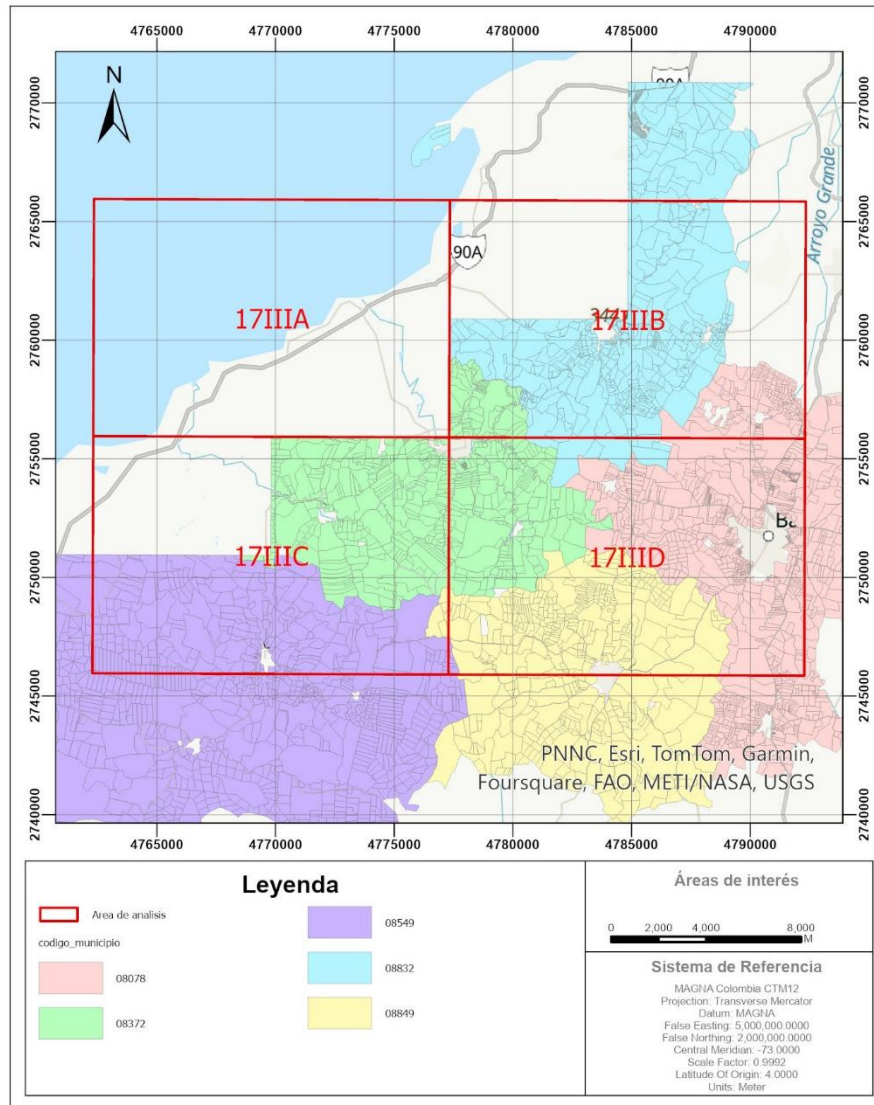
Ilustración 11 Variables discriminación por municipio

	count	mean	std	min	25%	50%	\
codigo_municipio							
08078	2308.0	4.927858	16.479285	0.008396	0.024982	0.352386	
08372	746.0	11.518486	20.881406	0.017181	0.370943	5.068556	
08549	866.0	24.782109	60.634311	0.039881	6.418011	13.383216	
08832	1679.0	5.932861	21.387868	0.000988	0.039953	0.044877	
08849	459.0	22.049762	38.699975	0.041441	3.977271	7.673710	
		75%	max				
codigo_municipio							
08078	3.696426	437.870756					
08372	12.633497	226.204564					
08549	18.024533	1229.831464					
08832	2.073115	305.252609					
08849	20.162165	305.085049					

Fuente: Elaboración propia

La imagen presentada, generada a través del automatismo de nuestro proyecto, muestra la distribución de los predios rurales en el área de interés. Esta visualización permite identificar la concentración y la distribución espacial de los terrenos disponibles, lo que es esencial para la selección de predios adecuados para proyectos solares fotovoltaicos. Al analizar la ubicación y tamaño de los predios, se pueden determinar las áreas con mayor potencial para el desarrollo de proyectos, optimizando el uso del territorio y asegurando la viabilidad de los mismos en función de criterios técnicos y legales.

Ilustración 12 Distribución de predios rurales al área de interés



Fuente: Elaboración propia

6.2. Diseño del Modelo

El diseño del modelo automatizado de evaluación predial se basó en la integración de herramientas geoespaciales y técnicas de análisis de datos, con el fin de optimizar la selección de terrenos para proyectos fotovoltaicos. A continuación, se presentan los resultados más relevantes derivados de este objetivo.

6.2.1. Selección de Variables y Criterios de Evaluación

El modelo se construyó a partir de la identificación de variables clave que influyen en la viabilidad de los proyectos fotovoltaicos. Estas variables incluyen:

Irradiancia solar: Se utilizaron datos del IDEAM para identificar áreas con alta radiación solar, lo cual es fundamental para aumentar la eficiencia de estos tipos proyectos fotovoltaicos.

- ✓ **Accesibilidad:** Se evaluó la proximidad a vías de acceso y carreteras principales, considerando la necesidad de transporte de maquinaria y equipos eléctricos.
- ✓ **Propiedad legal:** Se analizó la titularidad de los terrenos, identificando aquellos con problemas de jurídicos que entorpecen el proceso.
- ✓ **Delimitación catastral:** Se verificó la precisión de los linderos catastrales mediante la superposición de capas de información del IGAC.
- ✓ **Proximidad a las redes eléctricas trifásicas:** Se consideró la distancia a las redes eléctricas, garantizando su cercanía a los predios y vías principales.

Estas variables se integraron en un modelo de análisis multicriterio (MCDM) utilizando técnicas de lógica difusa (Fuzzy Logic) y superposición ponderada (Weighted Overlay) en un entorno SIG.

6.2.2. Implementación del Modelo Automatizado

El modelo se implementó utilizando herramientas geoespaciales como GeoPandas y Rasterio en Python, lo que permitió la automatización de la evaluación predial. A continuación, se describen los pasos clave del proceso:

- ✓ Recopilación de datos: Se obtuvieron datos geospaciales de diversas fuentes, como el IGAC, IDEAM y geo portales públicos, que incluyeron información sobre radiación solar, uso del suelo, infraestructura vial y límites catastrales.
- ✓ Preprocesamiento de datos: Los datos se limpiaron y estandarizaron para su integración en el modelo. Se utilizaron técnicas de interpolación y normalización para garantizar la consistencia de los datos.
- ✓ Superposición de capas: Se realizó una superposición ponderada de las capas de información, asignando pesos a cada variable según su relevancia en la evaluación predial. Por ejemplo, la irradiancia solar y la proximidad al punto de conexión recibieron pesos más altos debido a su impacto directo en la viabilidad del proyecto.
- ✓ Generación de mapas de calor: Como resultado del análisis, se generaron mapas de calor que identifican las áreas más adecuadas para la instalación de proyectos fotovoltaicos. Estos mapas permiten visualizar de manera clara las zonas con mayor potencial, basándose en los criterios establecidos.

6.2.3. Resultados del modelo

El modelo automatizado permitió identificar áreas óptimas para proyectos fotovoltaicos en la zona costa de Colombia. A continuación, se presentan los resultados más relevantes:

- ✓ Áreas de exclusión: Se identificaron áreas que no cumplen con los criterios mínimos de viabilidad, como zonas protegidas, terrenos con pendientes superiores al 15% y áreas con restricciones legales. Estas áreas fueron excluidas del análisis mediante el uso de operadores booleanos binarios.
- ✓ Áreas potenciales: El modelo identificó áreas con alta irradiancia solar, buena accesibilidad y proximidad a puntos de conexión eléctrica. Estas áreas se consideran óptimas para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos.

6.2.4. Validación del modelo

Para validar el modelo, se realizó un estudio de caso en el municipio de Juan de Acosta, en el departamento de Atlántico. Los resultados mostraron que el modelo es capaz de identificar áreas con alta viabilidad técnica y legal, reduciendo significativamente el tiempo y los recursos necesarios para la selección de terrenos.

Uno de los aspectos más destacados del modelo automatizado de evaluación predial es su flexibilidad para adaptarse a diferentes criterios de búsqueda según las necesidades específicas de cada proyecto. Esto permite ajustar parámetros como la distancia a la red eléctrica, el tamaño del predio o la inclusión de variables adicionales, como la presencia de infraestructura eléctrica dentro del predio.

6.3. Prototipo de automatismo

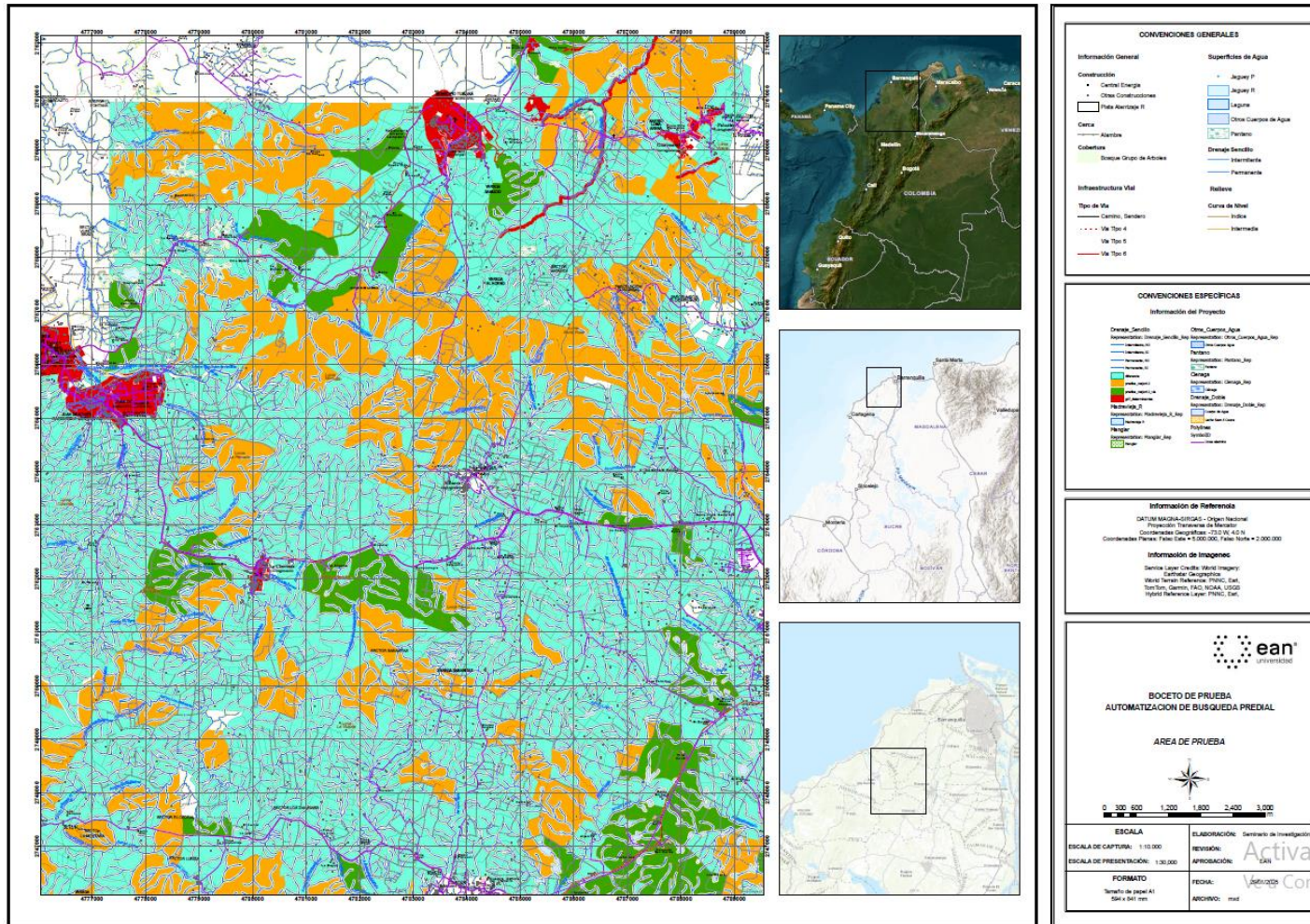
El boceto del automatismo busca realizar uso de las alternativas metodológicas descritas enfocada desde el uso del código abierto en utilización de diversas librerías de análisis geoespacial, para ello en compilación y uso de las variables identificadas y anteriormente descritas metodológicamente se procede a realizar el llamado de variables y análisis preliminar de herramientas y procedimiento de variable útiles a la hora de realizar cruces de sobreposición planteado desde la construcción de un proyecto que se describe así.

La imagen presentada corresponde al resultado final del automatismo desarrollado en este proyecto, donde se integran las variables clave para la selección de predios aptos para proyectos solares fotovoltaicos en la zona de interés. El automatismo ha procesado y visualizado los datos geoespaciales, mostrando las áreas más viables en función de criterios como irradiancia, accesibilidad, propiedad legal y proximidad a puntos de conexión. Este análisis visual final permite identificar de manera clara y precisa los terrenos que cumplen con los requisitos técnicos, económicos y legales establecidos, facilitando la toma de decisiones informadas para la planificación y ejecución de proyectos solares sostenibles en la región

AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN PROYECTOS FOTOVOLTAICOS



Ilustración 13 AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN PROYECTOS FOTOVOLTAICOS



7. Conclusiones

Este trabajo contribuye significativamente al campo de la gerencia de proyectos y la planificación energética en Colombia, al ofrecer una solución innovadora para la selección de terrenos destinados a proyectos fotovoltaicos. Entre las principales contribuciones se destacan:

- ✓ Automatización del proceso de selección predial: El sistema desarrollado reduce el tiempo y los recursos necesarios para la identificación de terrenos óptimos, minimizando los riesgos asociados a la selección inadecuada de predios.
- ✓ Flexibilidad del modelo: El sistema permite ajustar los criterios de búsqueda según las necesidades específicas de cada proyecto, como la distancia a la red eléctrica, el tamaño del predio o la presencia de infraestructura eléctrica sobre el terreno. Esta flexibilidad lo convierte en una herramienta versátil y aplicable en diferentes contextos.
- ✓ Integración de tecnologías emergentes: La combinación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis multicriterio y programación en Python representa un avance en la aplicación de tecnologías emergentes para la planificación de proyectos energéticos.

La validación del modelo se realizó mediante un estudio de caso en el municipio de Juan de Acosta, en el departamento de Atlántico. Los resultados demostraron que el sistema es capaz de identificar áreas con alta viabilidad técnica y legal, reduciendo significativamente los tiempos de análisis y optimizando los recursos destinados a la selección de terrenos. Además, se evidenció que el modelo es eficaz en la exclusión de áreas no viables, como zonas protegidas, terrenos con pendientes superiores al 15% y áreas con restricciones legales.

**AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA
TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN
PROYECTOS FOTOVOLTAICOS**



Este trabajo de investigación logró desarrollar un diseño de sistema automatizado de búsqueda predial que optimiza la selección de terrenos para proyectos solares fotovoltaicos en la zona costa de Colombia. La integración de herramientas geoespaciales, técnicas de análisis multicriterio y programación en Python permitió crear una solución innovadora, flexible y replicable, que contribuye significativamente a la planificación y ejecución de proyectos energéticos sostenibles.

Este sistema no solo supera las limitaciones de los métodos tradicionales de selección predial, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones en el campo de la automatización y la inteligencia artificial aplicada a la gestión de proyectos. Con su implementación, se espera impulsar el desarrollo de la infraestructura fotovoltaica en Colombia, contribuyendo a la transición hacia una matriz energética más limpia y sostenible.

8. Bibliografía

- Abbas, A., Mohsen, S., & Mohamad, J. (2017). A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran. *Solar Energy*, 155, 342 - 353. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.075>.
- COLOMBIA, C. (1993). *LEY 99 DE 1993*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>
- COLOMBIA, C. D. (2014). *Función Pública*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- COLOMBIA, E. C. (2014). *LEY 1715 DE 2014*. Obtenido de Función Pública: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- Demesouka, O., Vavatsikos, A., & Anagnostopoulos, K. (2016). Using MACBETH Multicriteria technique for GIS-Based Landfill Suitability Analysis. *Journal Environment Engineer*, 142(10), 04016042-11.
- Enrico, B., Enrico, F., & Roberto, C. (2014). A GIS Tool for the Land Carrying Capacity of Large Solar Plants. *Energy Procedia*, 48, 1576-1585. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.178>.
- Farn, C., & Musse, M. (2024). Power line routing design by GIS-driven fuzzy traveling salesman problem-binary integer programming for green energy integration. *Applied Energy*, 374. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124092>.
- Fatih, K., Mustafa, S., & Beyhan, A. (2022). GIS-based optimal site selection for the solar-powered hydrogen fuel charge stations. *Fuel*, 342 Part B. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124626>.
- Franco, M. (2020). *analisis-de-datos*. Obtenido de <https://github.com/francomanca93/analisis-de-datos>
- Fundacion de Software python. (s.f.). *os — Interfaces de sistema operativo diversas*. Obtenido de <https://docs.python.org/3/library/os.html>
- GAS, C. -C. (2021). *RESOLUCIÓN 75 DE 2021*. Obtenido de https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0075_2021.htm
- GAS, L. C. (2021). *RESOLUCIÓN 174 DE 2021*. Obtenido de https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0174_2021.htm
- GeoPandas: Python tools for geographic data*. (s.f.). Obtenido de <https://geopandas.org/>
- Jean, P. (2014). *ahp-fuzzy*. Obtenido de <https://github.com/jpierre03/ahp-fuzzy>

- Juan, M., Sánchez, L., Jeronimo, T., & Pedro, L. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 544-556. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.019>.
- Kamaleddin, A., Tausif, A., Yie, R., & Ayyoob, S. (2023). Optimal site selection for the solar-wind hybrid renewable energy systems in Bangladesh using an integrated GIS-based BWM-fuzzy logic method. *Energy Conversion and Management*, 283. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116899>
- Lakmalnd, D. (2021). *python-for-geospatial-data-analysis*. Obtenido de <https://github.com/gicait/python-for-geospatial-data-analysis>
- Linnan, T., Yu, L., Yuchun, P., Yanmin, R., & Lan, Y. (2024). Optimizing solar photovoltaic plant siting in Liangshan Prefecture, China: A policy-integrated, multi-criteria spatial planning framework. *Solar energy*, 283. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113012>
- M, P., M., B., & M, P. (2015). Geothermal favourability mapping by advanced geospatial overlay analysis: Tuscany case study (Italy). *Energy the international journal*, 90, 1377- 1387. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.077>.
- Meng, S., Zhimou, M., Jinwei, S., Xiao, G., & Zhuxiao, S. (2024). Multi-scale offshore wind farm site selection decision framework based on GIS, MCDM and meta-heuristic algorithm. *Ocean Engineering*, 316. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119921>
- Ministerio de Vivienda, C. y. (2022). *Plan de Ordenamiento Territorial (POT)*. Obtenido de <https://minvivienda.gov.co/viceministerio-de-vivienda-espacio-urbano-y-territorial-plan-ordenamiento-territorial-pot>
- Murray, A., & Church, R. (1995). Solid-Waste Disposal site location. *Journal Urban planning and Development*, 121(3), 109-114.
- Nasir, A., Sheeba, A., Bubul, J., Ejaz, A., & Faisal, N. (2022). GIS based model for the landslides risk assessment. A case study in Hunza-Nagar settlements, Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Environmental Challenges*, 7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100487>.
- Nema, A., & Gupta, S. (1997). Landfill siting using Geographic Information Systems: A Demonstration. *Journal of environmental Engineering*, 123(9), 956-959.
- Omer, U., Gulay, D., Can, B., & Dragan, P. (2024). Application of Z-number based fuzzy MCDM in solar power plant location selection problem in Spatial planning. *Energy Reports*, 12, 4034-4054. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.09.055>.
- Patricio, S. (2019). *geopython*. Obtenido de <https://github.com/sigdeletras/geopython>

- Qiusheng, W. (s.f.). *"Introducción a la Programación SIG"*. Obtenido de <https://github.com/giswqs/geog-312>
- R, S., Ajit, P., Kunal, D., & Chirag, G. (2018). Sustainable management of a river basin by integrating an improved fuzzy based hybridized SWOT model and geo-statistical weighted thematic overlay analysis. *Journal of Hydrology*, 563, 92-105. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.059>.
- rasterio. (2022). *rasterio*. Obtenido de <https://github.com/rasterio/rasterio>
- REPUBLICA, E. C. (2021). *LEY 2099 DE 2021*. Obtenido de Función Pública: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>
- Saafy. (1980). *The analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw Hill International.
- Sena, D., Elif, E., & Ufuk, K. (2024). Assessing agrivoltaics potential in Türkiye – A geographical information system (GIS)-based fuzzy multi-criteria decision making (MCDM) approach. *Computers & Industrial Engineering*, 197. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110598>
- Sena, D., Elif, E., Ufuk, K., & Gul E, K. (2024). Assessing agrivoltaics potential in Türkiye – A geographical information system (GIS)-based fuzzy multi-criteria decision making (MCDM) approach. *Computers & Industrial Engineerin*, 197. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110598>.
- Serwan, M., & Tim, P. (2001). Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. *Renewable Energy*, 24, 59-71. doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00169-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00169-5).
- Siddiqui, M., Everett, J., & Vieux, B. (1996). Landfill Siting Using Geographic Information Systems a Demonstration. *Journal of Environmental Engineering*, 122(6), 515-523.
- STATES, O. O. (1992). *Código Civil Colombiano*. Obtenido de https://www.oas.org/dil/esp/codigo_civil_colombia.pdf
- Tek, K. (2024). *geospatial-data-analysis-python*. Obtenido de <https://www.udemy.com/course/geospatial-data-analysis-with-python/?referralCode=5B58238C5392672D17B7>
- Velasco Herrera, J. A., Vazquez Montoya, I., Aguilar Gomez, L., & Mendoza Escobar, S. A. (2013). Los sig aplicados a la localización de zonas potenciales para la disposición final de residuos sólidos Urbanos (RSU). *LACANDONIA*, 7(2), 109-114.
- Yanwei, S., Danfeng, Z., Ying, L., & Run, W. (2023). Spatial modelling the location choice of large-scale solar photovoltaic power plants: Application of interpretable machine learning techniques and the national inventory. *Energy Conversion and Management*, 289. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117198>
- Yueh Lin, H., & Jung Kao, J. (2005). Grid Based Heuristic method for multidactor landfill siting. *Journal of computing in civil Engineering*, 19(4), 369-376.

**AUTOMATIZMO DE BUSQUEDA PREDIAL PARA
TERRENOS DONDE SE DESARROLLARÁN
PROYECTOS FOTOVOLTAICOS**



Zakariva, N., Raid Mahmood, F., & Safwa Waleed, A. (2024). Multi-criteria decision making (MCDM) approach for identifying optimal solar farm locations: A multi-technique comparative analysis. *Renewable Energy*,, 237 Part C. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121787>.