

# 2017

Universidad de Manizales,  
Facultad de Ciencias e Ingeniería

María Fernanda Obando Chaparro

## **[ Identificación del lugar óptimo de instalación de un parque eólico en el departamento del Atlántico ]**

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar al título de  
Especialista en Información Geográfica

**IDENTIFICACIÓN DEL LUGAR ÓPTIMO DE INSTALACIÓN DE UN PARQUE  
EÓLICO EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLANTICO**

**MARÍA FERNANDA OBANDO CHAPARRO**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2017**

**IDENTIFICACIÓN DEL LUGAR ÓPTIMO DE INSTALACIÓN DE UN PARQUE  
EÓLICO EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLANTICO**

**MARÍA FERNANDA OBANDO CHAPARRO**

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar  
al título de Especialista en Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2017**

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
1. ÁREA PROBLEMÁTICA .....	2
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. JUSTIFICACIÓN.....	4
4. MARCO TEÓRICO .....	6
4.1 Sistema de información geográfica –SIG-.....	6
4.1.1 Elementos de un SIG.....	7
4.1.2 Funciones de un SIG. ....	7
4.1.3 Operaciones y análisis de datos en los SIG. ....	8
4.2 Evaluación multicriterio-EMC- .....	10
4.2.1 Componentes de la EMC en entornos SIG.....	10
4.3 Energías renovables .....	11
4.3.1 Energías renovables alternativas por fuentes no convencionales. ....	11
4.3.2 Energía eólica.....	11
4.3.3 Parque eólico.....	12
4.4. DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO.....	12
4.5 ANTECEDENTES .....	14
4.5.1 Método para localización óptima de centrales de energías Renovables	14
4.5.2 Estudio de localización de un parque eólico offshore en la costa asturiana mediante análisis multicriterio. ....	14
4.5.3 Aplicación de un modelo de decisión multicriterio para la implantación de energías renovables en un sistema energético. ....	15
4.5.4 Planificación de parques eólicos mediante sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos. ....	15
4.5.5 Evaluación y caracterización de las zonas incompatibles con la implantación eólica en Andalucía mediante la aplicación de un modelo locacional con Sistemas de Información Geográfica y Técnicas de análisis multicriterio. ....	16
5. METODOLOGÍA .....	17
5.1 TIPO DE TRABAJO .....	17

5.2 PROCEDIMIENTO.....	17
5.2.1 Fase 1. Levantamiento de información.....	18
5.2.2 Fase 2. Adecuación de los datos.....	19
5.2.3 Fase 3. Modelo de restricciones.....	19
5.2.4 Fase 4. Evaluación de criterios.....	20
5.2.5 Fase 5. Ponderación.....	20
6. RESULTADOS.....	21
6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS.....	21
6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	29
7. CONCLUSIONES.....	30
8. RECOMENDACIONES.....	31
BIBLIOGRAFÍA.....	32

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Elementos de un SIG.....	7
Figura 2. Operaciones en los SIG.....	9
Figura 3. Localización del departamento del Atlántico.....	12
Figura 4. División político administrativa.....	13
Figura 5. Procedimiento general.....	17
Figura 6. Resultado proceso de Adecuación de Datos.....	23
Figura 7. Zonas restringidas.....	25
Figura 8. Evaluación de Criterios.....	27
Figura 9. Selección lugares.....	28
Figura 10. Lugar óptimo.....	28

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Fuentes de información para cada criterio .....	18
Cuadro 2. Buffers aplicados.....	22
Cuadro 3. Pesos ponderados .....	26
Cuadro 4. Áreas evaluación.....	26

## **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO A ASPECTOS NORMATIVOS A CONSIDERAR DEL SECTOR ENERGETICO COLOMBIANO .....	35
ANEXO B. LOCALIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO .....	36
ANEXO C. RELIEVE.....	37
ANEXO D. SUPERFICIE DE AGUA .....	38
ANEXO E. ÁREAS PROTEGIDAS .....	39
ANEXO F. POMCAs .....	40
ANEXO G. OTROS PROYECTOS .....	41
ANEXO H. RESTRICCIONES EN EL ÁREA DE ESTUDIO .....	42
ANEXO I. EVALUACIÓN DE CRITERIOS.....	43
ANEXO J. ALTERNATIVAS.....	44
ANEXO K. LUGAR ÓPTIMO.....	45



## RESUMEN

A lo largo de este documento se expone una metodología cuyo objetivo es el de identificar el lugar óptimo de instalación de un parque eólico en el departamento del Atlántico. Para alcanzar el objetivo propuesto se realizó la integración de un análisis multicriterio con las aplicaciones ofrecidas por un Sistema de Información Geográfica. Durante el desarrollo se muestra: la base teórica sobre la que se fundamentan los procesos realizados, el orden en el que dicho procesos fueron ejecutados y los resultados obtenidos. La selección del sitio se logró a través de un análisis, en el que las variables identificadas para la instalación de un parque eólico se clasificaron como limitantes o factores, según el tipo de impacto que podrían ejercer. Luego, se evaluaron dichos criterios, calificando los rangos y asignando pesos a cada uno, para posteriormente realizar una sumatoria de pesos ponderados, un proceso de álgebra de mapas y obtener tres alternativas idóneas, de entre las cuales se seleccionó la que sería el lugar óptimo.

**PALABRAS CLAVES:** Análisis Multicriterio, Sistema de información geográfica, Parque eólico, Atlántico.

## **ABSTRACT**

This document presents a methodology to identify the most suitable location of a wind farm in the Atlántico department. In order to reach the proposed objective, a multicriteria analysis with the applications offered by a Geographic Information System was carried out. In its development, it shows theory over this process is based, the procedure and the final results. The selection of the place was achieved through an analysis, in which the variables for the installation of a wind farm were classified as limitations or as factors, depending on the type of impact they could create. Then, these criteria were evaluated, grading the ranges and assigning weights to each one, later perform sum of weighted weights and a process of map algebra were carried out to obtain three suitable alternatives, of which were selected the one that would be the optimal.

**KEY WORDS:** Multi criteria analysis, Geographic Information System, Wind farm & Atlántico.

## INTRODUCCIÓN

La toma de decisiones es un proceso que el hombre realiza a diario, cualquier elección, por improvisada que parezca, busca alcanzar un objetivo y lleva consigo un análisis de variables, que aunque frecuentemente no es evidente, siempre influye en los resultados obtenidos.

Identificar la ubicación de un punto, para realizar en dicha localización cualquier actividad productiva es una muestra cotidiana de un proceso de toma de decisión, y es aquí, donde los sistemas de información geográfica entran a jugar un papel fundamental, puesto que gracias a la posibilidad que brindan para realizar diferentes geoprocesos con los datos geográficos, y aplicando metodologías para la selección de alternativas, es posible obtener una respuesta objetiva para la pregunta: ¿qué lugar es mejor para?

La actual situación de incertidumbre frente a la estabilidad de la prestación de servicio de energía eléctrica y la potencialidad de uso de recursos naturales renovables (más específicamente del viento en Colombia) para disminuir dicha incertidumbre son el motivo para realizar este documento.

En el transcurso de los últimos 20 años, varias han sido las metodologías propuestas para identificar el lugar idóneo de instalación de un parque eólico. En los últimos años y gracias al avance tecnológico, el desarrollo y masificación de herramientas geográficas ha sido posible integrar metodologías para la toma de decisiones a los ambientes SIG.

Cada proyecto, por su particularidad y por las características del área donde se pretende ejecutar carga consigo unas variables, las cuales, en definitiva, determinarán su viabilidad. El análisis, manejo e interpretación que se haga de estas variables es lo que finalmente determina un resultado exitoso; y es por eso, que no es posible replicar una metodología ya probada en otro espacio sin antes realizar alguna modificación que la adapten a la nueva área de estudio.

## 1. ÁREA PROBLEMÁTICA

Los parques eólicos son centrales eléctricas donde la producción de la energía eléctrica se consigue a partir del viento, mediante aerogeneradores que aprovechan las corrientes de aire. A la hora de seleccionar áreas para diseñar o emplazar este tipo de proyectos se maneja incertidumbre con respecto a la disponibilidad del recurso eólico, la capacidad de las subestaciones a las que se conectarán los parques, las distancias y los recorridos de las líneas de tensión, el tipo de coberturas en el área de interés y la presencia o no de comunidades.

Los datos anteriormente mencionados son criterios o factores de decisión que deben ser analizados de manera conjunta para determinar la ejecución o no de un proyecto de este tipo y dado que los proyectos deben ser técnicamente viables, ambientalmente sostenibles y socialmente aceptados es primordial tener en cuenta la importancia relativa que cada uno de estos datos tiene con respecto a los otros.

Adicionalmente, todos los criterios de selección tienen una característica geoespacial que les otorga una ubicación específica, y contienen atributos o subcriterios cuantificables que permiten compararlos entre sí, según el nivel jerárquico en el que se ubiquen.

Partiendo del mapa nacional de vientos elaborados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) se tiene que los departamentos con mayor recurso eólico se encuentran en la costa norte del país, incluyendo el departamento del Atlántico. Si bien este departamento no es el de mayor potencial es el departamento con la ciudad capital más poblada al norte del país y el que cuenta con mayores equipamientos. En la actualidad el país cuenta con un único parque eólico ubicado en la alta Guajira, el parque eólico Jeparachi.

El hecho de que Barranquilla, capital del departamento del Atlántico, ciudad con importantes vías de acceso y con puerto marítimo; convierte al departamento en un lugar atractivo, con potencial para instalar proyectos de generación de energía que se puedan conectar al Sistema Nacional Interconectado (SIN).

De lo anterior surge el siguiente interrogante:

¿Cuál es el lugar óptimo para diseñar un parque eólico en el departamento del Atlántico?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar, sobre la base de aplicación de un sistema de información geográfica y de la técnica de evaluación multicriterio cuál es el lugar óptimo para instalar un parque eólico en el departamento del Atlántico, Colombia.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer los factores limitantes para el diseño de un parque eólico a partir de un modelo.
- Definir los criterios de evaluación.
- Identificar las zonas con mayor potencial para emplazar un parque eólico empleando la asignación de pesos a los criterios.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La demanda de energía eléctrica en Colombia ha tenido un aumento en los últimos tiempos y es de esperar que dicha demanda energética aumente en los próximos años como consecuencia del crecimiento demográfico y el desarrollo económico del país.

Por lo que es de vital importancia para el gobierno nacional idear estrategias que garanticen o aseguren el suministro de energía para el país, tanto en sectores conectados a la red, como en los no interconectados, además se debe propender por la búsqueda de opciones que incentiven la generación de energía por múltiples fuentes, esto con la intención de no depender de un único recurso generador de energía.

Colombia, por su potencial hídrico, emplea como principal fuente de generación las hidroeléctricas, seguida de las termoeléctricas (gas, diésel y carbón). Del total de la capacidad instalada efectiva del país, las plantas hidráulicas generan un 67,9%, seguidas de las térmicas por un 31,5%, el 0.6% restante provienen de la cogeneración y eólicos.

Que más del 60% de la energía generada en un país provenga de una fuente cuyo suministro no es constante y este asociado a factores climáticos es preocupante; con cada cambio en los regímenes estacionales de temperatura en el país los embalses, estructuras donde se almacena el agua, cambian su caudal. Con la llegada de una sequía severa y las actuales condiciones de generación, es probable que los colombianos se vean obligados a sobrellevar los efectos de un racionamiento.

Por lo que, la utilización de fuentes renovables alternativas de energía eléctrica surge como una opción para reducir esta dependencia y ampliar la cobertura a zonas que actualmente no cuentan con un suministro permanente de energía. De acuerdo con un estudio del Programa de Asistencia en Gestión del Sector Energético del Banco Mundial (ESMAP), la explotación del gran potencial eólico del país podría cubrir más de la totalidad de sus necesidades actuales de energía.

Adicionalmente la preocupación mundial por la cantidad de recursos agotados en la producción de energía eléctrica y la necesidad de la misma, es un impulso para elaborar procedimientos que determinen la mejor alternativa para diseñar un proyecto de generación de energía que reduzca la emisión de gases de efecto invernadero y asegure el abastecimiento energético en países en vía de desarrollo.

Finalmente, los protocolos internacionales a los que se encuentra adscrito Colombia hacen que se promueva la configuración de políticas de promoción de la

generación de energía eléctrica a través de fuentes alternativas no convencionales y se sancionen leyes que definan los actores y las responsabilidades de quienes podrían intervenir en el desarrollo de este tipo de proyectos de generación eléctrica.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA –SIG-

Para ESRI (ArcGIS Resources), la casa matriz del software comercial más empleado en la producción cartográfica, los sistemas de información geográfica son un medio para mostrar y analizar la información referenciada espacialmente. Son herramientas que generan, y aplican métodos de análisis geográfico para respaldar el trabajo y toma de decisiones de las organizaciones.

Otra definición nos dice que, los SIGs son una integración organizada de hardware, software y datos espaciales diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión (NCGIA, 1990).

También, un SIG es un caso particular de SI<sup>1\*</sup> en el que la información aparece georreferenciada es decir incluye su posición en el espacio utilizando un sistema de coordenadas estandarizado resultado de una proyección cartográfica. En su publicación Francisco Alonso-Sarria (2005) sugiere que los SIGs implican:

- El almacenamiento de la información
- La posibilidad de permitir la consulta de datos particulares con cierta facilidad y desde diferentes puntos.
- El análisis de datos para obtener un mejor conocimiento de las vicisitudes que atraviesa un lugar específico.
- La generación de argumentos para la toma de decisiones.

Confirmando así que, los SIGs tienen amplios campos de aplicación, lo que les permite ser utilizados en cualquier actividad que tenga un componente espacial. Estos buscan resolver situaciones problema, respondiendo principalmente ¿Qué hay? ¿Dónde? ¿Qué ha cambiado?

Si bien los SIGs dan la impresión de ser aplicaciones prácticas, basadas en un programa en concreto, es importante destacar que, estos trabajan una metodología propia y poseen un núcleo teórico importante en el que se combinan diferentes disciplinas (Nuñez & Lantada, 2004).

El elemento fundamental de un SIG es el dato espacial, el cual hace diferenciar a los SIGs de otras bases de datos especializadas, para Gómez y Barredo (2005)

---

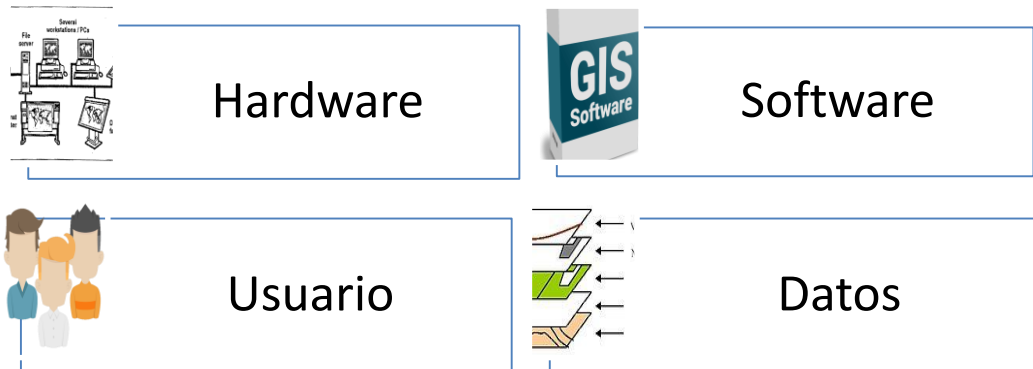
<sup>1</sup> SI (Sistema de Información) consiste en la unión de información en formato digital y herramientas informáticas (programas) para su análisis con unos objetivos concretos dentro de una organización (empresa, administración, etc.).



estos datos representan el centro en torno al cual giran todas las posibles aplicaciones de los SIG, el dato espacial contiene características de localización (X, Y) Y características temáticas (Z), en las que se asienta la base de todas las posibles operaciones que se pueden realizar con un SIG. Sin embargo, el dato espacial no es el único elemento que forma a un SIG.

**4.1.1 Elementos de un SIG.** Un SIG, básicamente está compuesto por cuatro elementos: Hardware, software, datos y usuario (ver **Figura 1**). El software representa la plataforma física donde se asienta el SIG, el software se encarga de realizar las operaciones y la manipulación de los datos, el dato que es el elemento con el que se realizan todas las operaciones y el usuario son las personas que gestionan y desarrollan las posibilidades que ofrecen la interacción entre los elementos, para producir resultados, soluciones a situaciones problema.

**Figura 1. Elementos de un SIG**



**Fuente adaptado de Maguire, D., Goodchild, M., & Rhind, D. (1997) (1997).**

Así mismo, los SIGs emplean funciones que los diferencian de los sistemas automatizados de diseño o de almacenamiento de datos, las capacidades cartográficas, de manejo de datos y analíticas que ofrecen, permiten responder preguntas derivadas de un problema espacial.

**4.1.2 Funciones de un SIG.** Según Gómez y Barredo (2005) las funciones que se constituyen como elementos básicos del análisis espacial, y definen el flujo de operaciones de un proyecto SIG, se pueden agrupar en cuatro conjuntos fundamentales:

- Entrada de datos
- Gestión de datos
- Transformación y análisis de datos
- Salida de información

En primer lugar, y de manera general, las funciones de entrada de datos son las que permiten la introducción, edición y visualización de datos geográficos. En segundo lugar, las funciones de gestión permiten la extracción de datos de la base de datos, controlando así su almacenamiento, recuperación y actualización. La tercera función, la transformación y análisis de datos son las que atribuyen valor a los datos, y finalmente, las funciones de salida son las que permiten hacer la transferencia de los datos para poderlos visualizar.

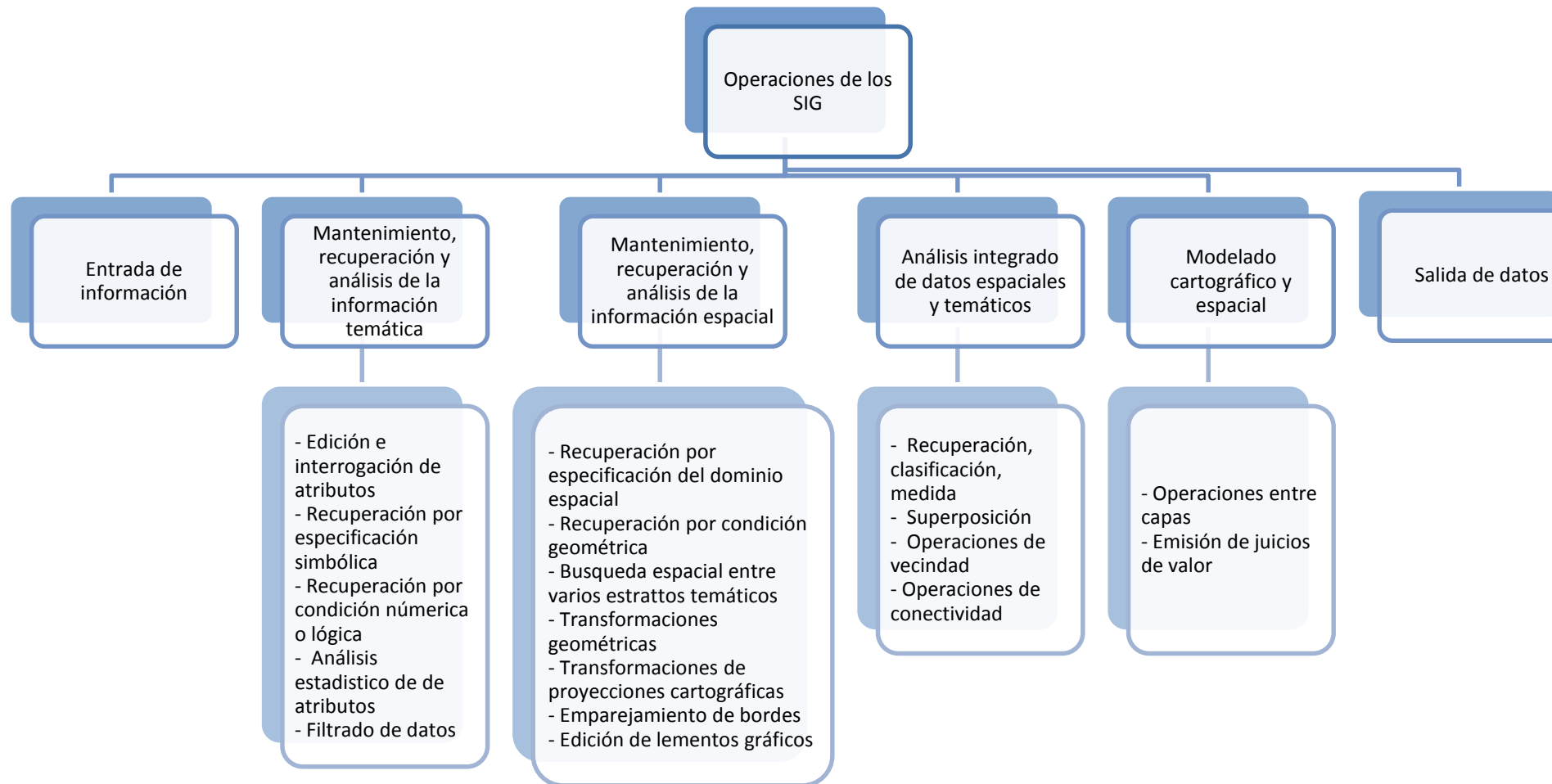
Dependiendo del objetivo establecido y del software empleado se contará con ciertas operaciones de análisis, las cuales se constituyen como elementos básicos del análisis espacial, y definen el flujo de operaciones de un proyecto SIG.

**4.1.3 Operaciones y análisis de datos en los SIG.** Las operaciones son diversas y se pueden realizar sobre un componente o temática espacial, o, sobre procesos que involucren ambos componentes. Gómez y Barredo (2005) dividen en seis grupos dichas operaciones:

- Entrada de información.
- Mantenimiento, recuperación y análisis de la información temática.
- Mantenimiento, recuperación y análisis de la información espacial.
- Análisis integrado de datos espaciales y temáticos.
- Modelado cartográfico y espacial.
- Salida de datos.

Gómez y Barredo también enlistan las principales operaciones para cada uno de los componentes, ver **Figura 2**Figura 2

**Figura 2. Operaciones en los SIG.**



**Fuente: Adaptado a partir de Gómez Delgado, M., & Barredo Cano, J. (2005)**

## 4.2 EVALUACIÓN MULTICRITERIO-EMC-

La EMC puede definirse como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones. Su finalidad es “investigar un número de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto” (Voogd, 1999).

Para Carver (1991) la decisión multidimensional y los modelos de evaluación, de los que la EMC hace parte, ofrecen herramientas para el análisis de propiedades complejas de las alternativas de selección. La estructura matemática para describir la toma de decisiones se basa en la teoría de optimización multiobjetivo, en la cual los objetivos complementarios y conflictivos son descritos como un problema de decisión con múltiples objetivos.

Como la EMC se sitúa en el ámbito de la teoría de la decisión, dicha teoría puede orientarse en dos direcciones: positiva o descriptiva, y normativa o prescriptiva. La primera intenta dilucidar el ¿cómo son?, mientras que la segunda plantea el ¿cómo deben ser? El enfoque que concierne a este trabajo es el normativo.

Los métodos de evaluación y decisión multicriterio comprenden la selección entre un conjunto de alternativas factibles, la optimización con varias funciones objetivo simultáneas y un agente decisor y procedimientos de evaluación racionales y consistentes (Martínez & Escudey, 1998).

**4.2.1 Componentes de la EMC en entornos SIG.** Los elementos que conformarán el proceso EMC en el contexto de este SIG serán:

- **Objetivos y alternativas.** Los objetivos son un aspecto básico dentro del desarrollo de una EMC puesto que definen la función a desarrollar, por su parte, las alternativas son un objeto espacial, que representan un sitio individual y que presentan ciertas características.
- **Criterios.** Son el punto de referencia para tomar una decisión. Pueden ser factores o limitantes.

Por un lado, los factores “realzan o detractan la capacidad de asentamiento de una alternativa específica para la actividad en consideración, por lo que debe ser medido en una escala continua” (Eastman, Kyem, Toledano, & Jin, 1993). Se puede decir que son las dimensiones relevantes que afectan significativamente a los objetivos, por lo que deben expresar las preferencias de los implicados en la toma de decisión y deben incluir aspectos vitales cuantitativos y cualitativos a tener en cuenta en la toma de decisión (FAO, 2000).

Por otro lado los limitantes son criterios que restringe o limitan en su totalidad el objetivo o meta de una de las alternativas en consideración (Ordóñez, Quentin, & Cabrera, 2015)

- **Regla de decisión.** Es el procedimiento mediante el cual se evalúa, una función mediante la cual se define la selección de las alternativas. También, “es el procedimiento utilizado para combinar criterios y comparar posteriormente los resultados de tal forma que se llegue a una decisión” (Ordóñez, Quentin, & Cabrera, 2014)
- **Evaluación.** Conjunto de operaciones y análisis con los que se ponen en funcionamiento las reglas de decisión previamente definidas.
- **Matrices.** Son la manera de representar las relaciones entre criterios y alternativas. Con ellas se examinan los elementos del problema aisladamente por medio de comparaciones de a pares. Las evaluaciones o juicios son emitidos por cada analista o grupo de interés

### 4.3 ENERGÍAS RENOVABLES

Según Fernández (2011) se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Además, la energía renovable podría definirse como aquella que no consume recursos y además no contamina (Castells, 2012).

Según el origen de la fuente de la que se obtiene la energía se habla de Energía generada por fuentes convencionales, o no convencionales. Las fuentes convencionales de energía, son aquellos recursos de energía que son utilizados de forma intensiva y ampliamente comercializados; en el país son ejemplos de estas el carbón, el gas natural y el petróleo.

**4.3.1 Energías renovables alternativas por fuentes no convencionales.** Las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), son aquellos recursos energéticos renovables disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente, ejemplos de estas en Colombia son la biomasa, la geotérmica, la eólica, la solar y la hidráulica.

**4.3.2 Energía eólica.** Se refiere a la energía producida por el viento, una fuente de energía renovable, y cuyo principal uso es la generación de energía eléctrica a través de un proceso de transformación que se realiza al interior de un

aerogenerador, donde la energía cinética generada por las corrientes del aire se convierte en energía mecánica y posteriormente en eléctrica.

**4.3.3 Parque eólico.** Los parques eólicos son lugares dedicados a la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento del viento, o recurso eólico, se componen de uno o más aerogeneradores, siendo la suma de las potencias nominales de cada uno de éstos la que determina la capacidad de generación de un parque.

Un parque eólico conectado a la red<sup>2</sup>, se configura mediante la instalación integrada de un conjunto de varios aerogeneradores, interconectados eléctricamente mediante redes eléctricas propias, que comparten una misma infraestructura de accesos y control. La conexión a la red eléctrica de distribución se realiza mediante la correspondiente transformación de tensión dependiendo de la capacidad técnica de las redes existentes y de la propia instalación (Agencia Insularde energía de Tenerife).

#### 4.4. DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO

El Atlántico es uno de los 32 departamentos del territorio colombiano (ver Figura 3 y Anexo B) está ubicado al norte del país, en la región Caribe, y se ubica en la confluencia del río Magdalena con el mar Caribe, cuenta con área de 331,9 Ha, siendo uno de los de menor superficie en el país (Departamento Nacional de Planeación y Gobernación del Atlántico, 2011).

**Figura 3. Localización del departamento del Atlántico**



**Fuente: Elaborado por el autor**

<sup>2</sup> A la red del Sistema Interconectado Nacional (SIN). Una conexión de los sistemas eléctricos regionales y hace posible el funcionamiento del sector eléctrico en Colombia(...) En el que participa toda la cadena productiva: generadores, transmisores, distribuidores y comercializadores (Twenergy, 2016).

Sus límites son los siguientes:

- Al norte limita con el mar Caribe.
- Al este con el departamento del Magdalena.
- Al oeste y el sur con el departamento de Bolívar.

Ambientalmente el territorio se divide en tres grandes sub-zonas hidrográficas: vertiente Occidental del Río Magdalena, Canal del Dique y Arroyos que vierten directo al Mar Caribe. La cobertura total de los cuerpos de agua corresponde a 21.697H; mientras que, político-administrativamente está dividido en 23 municipios (Gobernación del Atlántico, 2016).

**Figura 4. División político administrativa**



<b>Norte</b>	1. Barranquilla (capital de Atlántico) 2. Galapa 3. Malambo 4. Puerto Colombia 5. Soledad	<b>Centro-Oriente</b>	6. Baranoa 7. Palmar de Valera 8. Polonuevo 9. Ponedera 10. Sabanagrande 11. Sabanalarga 12. Santo Tomás	<b>Occidente</b>	13. Juan de Acosta 14. Piojó 15. Tubará 16. Usiacurí	<b>Sur</b>	17. Campo de la cruz 18. Candelaria 19. Luruaco 20. Manatí 21. Repelón 22. Santa Lucía 23. Suán
--------------	---	-----------------------	--	------------------	---	------------	---

**Fuente: Elaborado por el autor**

Político-administrativamente está dividido en cuatro provincias (Norte, Sur, Centro-Oriente y Occidente) y en 23 municipios (Gobernación del Atlántico, 2016)(Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)

## **4.5 ANTECEDENTES**

El diseño de parques eólicos es un tema que los últimos años ha despertado el interés del sector generador de energía eléctrica a nivel mundial, causando que cada día se propongan y promuevan investigaciones y/o consultas cuyo objetivo sea el de buscar la manera óptima de diseñar parques eólicos, atendiendo las características específicas de cada lugar.

En este apartado se realiza una breve descripción de documentos, organizados cronológicamente, publicados en los últimos 16 años, que abordan la temática de la planificación y el diseño de parques eólicos haciendo uso de los SIG y de las herramientas de análisis multicriterio.

### **4.5.1 Método para localización óptima de centrales de energías Renovables.**

Este documento de grado elaborado por Andrés Fernández Roa (2010), sugiere una metodología para la localización de centrales de generación eólica y fotovoltaica que se conectan a la red energética de Chile.

Durante el proceso Fernández recopila información acerca de los aspectos más importantes de cada una de las tecnologías de interés, para posteriormente seleccionar la herramienta matemática de decisión más adecuada para lograr su objetivo.

En este caso el autor realiza la evaluación multicriterio a través del método Promethee, haciendo uso del software GAIA, dicha evaluación la realiza sobre criterios de tipo técnico como: el factor de planta, la disponibilidad de vías de acceso, distancia a punto de conexión, costo marginal de la barra de conexión, capacidad futura y acceso a puertos.

Es un documento interesante en tanto que realiza el análisis para dos tipos de fuentes no convencionales, la eólica y la solar fotovoltaica permitiendo destacar los procedimientos en común de estos dos tipos de tecnologías.

**4.5.2 Estudio de localización de un parque eólico offshore en la costa asturiana mediante análisis multicriterio.** En el año 2012 (Caballero Gonzalez & Gracia Cascales) expusieron, en un artículo, un estudio de localización de un parque eólico offshore en la costa asturiana mediante análisis multicriterio. En este artículo las autoras combinan las metodologías AHP (Analysis Hierarchic Procces) y TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) para



determinar la localización de un futuro parque eólico offshore en el litoral de Asturias.

En la metodología examinan los elementos que, según criterios de los autores, influyen en la toma de decisión en el diseño del parque; este artículo es importante puesto que dentro de sus criterios de análisis incluye los impactos ambientales y sociales potencialmente generados sobre las poblaciones próximas a la zona de instalación.

Aquí toman como insumo el mapa de zonificación ambiental del Estudio Estratégico Ambiental del Litoral Español para la instalación de parques eólicos marinos, elaborado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía español (IDAE) en el año 2009; lo que constituye en un gran avance, puesto que, al incluir más variables de estudio, genera resultados más objetivos.

**4.5.3 Aplicación de un modelo de decisión multicriterio para la implantación de energías renovables en un sistema energético.** Para obtener su título de Máster en Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo Agroforestal (2014), Manuel Frías Herreros aplicó un modelo de decisión multicriterio para la implantación de energías renovables en un sistema energético.

En este trabajo el autor desarrolla un modelo de análisis multicriterio sobre las tecnologías de generación energética de fuentes renovables (carbón, gas, nuclear, biomasa, eólica, solar fotovoltaica, hidráulica y geotérmica), tomando como sus criterios de análisis los factores ambientales, sociales y económicos.

En este documento el autor basa su análisis en información estadística; en su propuesta el modelo no contempla la inserción de un sistema de información geográfica, lo cual es un contra. Sin embargo, todo el análisis estadístico y la información fuente de los datos constituyen un gran insumo a la hora de organizar y modelar la información que se tiene de cada uno de los criterios de evaluación.

**4.5.4 Planificación de parques eólicos mediante sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos.** El autor Alberto Falces (2015) presenta una metodología que combina la programación de un algoritmo genético con un SIG, esto para determinar la posición óptima de un conjunto de aerogeneradores en España.

A lo largo de seis capítulos el autor realiza descripciones generales de la situación del sector eléctrico, de fuentes eólicas en el mundo, también estudia y desarrolla algoritmos y hace referencia de la información que agrupará y recolectará para la elaboración del SIG.

Conceptualmente es un insumo significativo por la descripción que realiza de los criterios de diseño, sin embargo, el estudio del autor solo contempla como criterio

de análisis la producción energética anual esperada, el cual, si bien es importante para determinar la rentabilidad de un proyecto de generación de energía eléctrica, rezaga otros criterios relacionados con medio ambiente y sociedad.

**4.5.5 Evaluación y caracterización de las zonas incompatibles con la implantación eólica en Andalucía mediante la aplicación de un modelo locacional con Sistemas de Información Geográfica y Técnicas de análisis multicriterio.** En este documento los autores, (Díaz Cuevas & M.F.), no proponen lugares para instalar parques, aquí, toman lugares donde ya han sido instalados aerogeneradores y en ellos ponen a consideración las limitaciones territoriales que existen y que no fueron tomadas con la importancia que merecían durante las etapas de diseño del proyecto.

En el trabajo los autores evalúan y localizan, mediante un SIG y una técnica de Evaluación Multicriterio (EMC), las zonas del territorio Andaluz que presentan incompatibilidad con este tipo de proyectos.

Este documento amplió la perspectiva acerca de cómo deben ser calificados los criterios, ya que, durante la vida útil, o fase de operación, de un parque eólico es posible distinguir cuáles son sus impactos y con esto es posible modelar escenarios donde dichos impactos sean reducidos o eliminados, teniendo en cuenta las características bióticas, abióticas, socioculturales y técnicas de cada territorio.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 TIPO DE TRABAJO

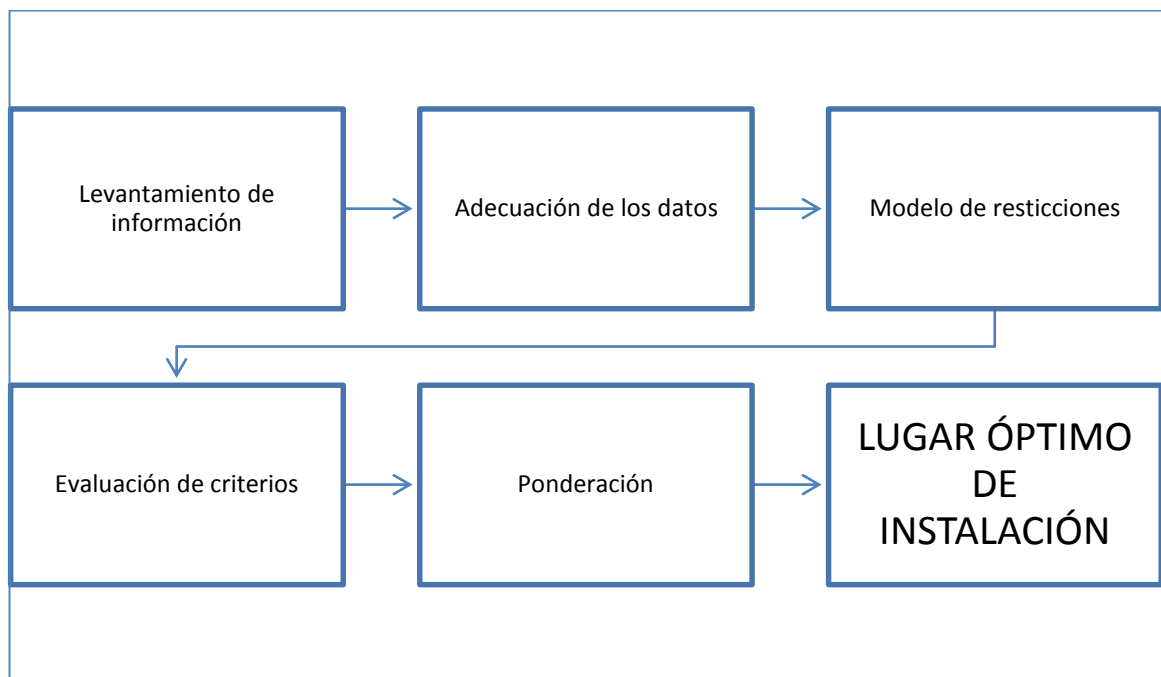
Este trabajo propone una metodología para proponer el diseño de un parque eólico.

En el proceso se recopila información acerca de los criterios técnicos, bióticos, abióticos y geopolíticos, para posteriormente seleccionar la información que será de utilidad y luego realizar la EMC, haciendo uso del software ArcGIS.

### 5.2 PROCEDIMIENTO

La **Figura 5** presenta las cinco fases que se desarrollaran para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en este trabajo.

**Figura 5. Procedimiento general**



**Fuente:** *Elaborado por el autor*

Ya habiendo definido la zona de estudio, que en este caso será el departamento del Atlántico, se procede con la búsqueda de información secundaria existente. Posteriormente se adecua dicha información, se le aplican una serie de geoprocursos y se definen los criterios, los factores y limitantes. A partir de estos se inicia la consecución y generación de información espacial temática.

Luego, se procede a la ponderación de cada una de las capas temáticas, definiendo preliminarmente, en este paso las posiciones deseables o indeseables para la instalación del parque eólico.

Aquí se parte de lo general hacia lo específico, Esta metodología se basa en la creación de cuatro modelos que, con su aplicación buscan obtener, como resultado un mapa que contenga el escenario óptimo para la instalación de un parque eólico.

**5.2.1 Fase 1. Levantamiento de información.** La localización de un parque eólico viene condicionada por criterios técnicos, económicos y ambientales. Para este análisis se asumirán como criterios los siguientes:

- Uso actual y propuesto de la tierra en las zonas seleccionadas en base al punto anterior.
- Topografía del terreno, que pueda considerarse como adversa.
- Proximidad a vías, basando se aquí en aspectos de distribución de suministros.
- Distancia a lugares ambientalmente sensibles, previendo en estos casos la ocurrencia de impactos negativos en estas zonas.
- Cercanía a centros poblados, relacionado con la aceptación pública del proyecto.

Cada uno de estos seis criterios tiene un componente espacial que le permite ser usado dentro de un SIG. A continuación, se muestra (Ver **Cuadro 1**) la información empleada en cada componente, así como el ente que la genero.

**Cuadro 1. Fuentes de información para cada criterio**

CRITERIO	INFORMACIÓN	FUENTE
Uso de la tierra	Coberturas de la tierra del departamento del Atlántico, escala 1:100.000	Corporación Autónoma Regional del Atlántico –CRA-
Topografía	Modelo digital del terreno NASA	DEM del sensor ALOS PALSAR
Superficies de agua	Cartografía base, escala 1:100.000	Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC
Vías	Cartografía base, escala 1:100.000	IGAC
Centros poblados	Cartografía base, escala 1:100.000	IGAC Ministerio del interior
Comunidades étnicas	Comunidades étnicas, escala 1:100.000	Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC-
Lugares ambientalmente sensibles	Sistema Nacional de áreas protegidas Áreas de protección y conservación regional	Parques Nacionales Naturales –PNN- CRA

CRITERIO	INFORMACIÓN	FUENTE
Otros proyectos	Ductos, líneas de tensión, títulos mineros y proyectos eléctricos.	IGAC, SIAC

**Fuente:** Autor

**5.2.2 Fase 2. Adecuación de los datos.** Este proceso consiste en la revisión de cada uno de los datos obtenidos y su almacenamiento. Lo primero es crear las carpetas donde se dónde se almacenará la información generada. Entonces, se organizarán de la siguiente manera:

1. Modelo datos: Aquí se guardará la Geodatabase.
2. Insumos: Lugar donde estarán los documentos, tablas, shape files, imágenes, planos CAD, tal y como fueron suministrados por las autoridades
3. AMC: Donde se almacenarán tablas y resultados arrojados por el AMC.

Luego, se debe realizar una verificación de los datos suministrados por las diferentes entidades, revisando si corresponden, o no, a lo que realmente hay en campo, adicionalmente se comprueba que los campos de los features class contengan información.

Los datos se proyectan en un mismo sistema de Coordenadas, se crea una Gedatabase y se procede a su almacenamiento.

**5.2.3 Fase 3. Modelo de restricciones.** Esta etapa consiste en la aplicación de clips, generación de buffer, rasterización<sup>3</sup> de capas, a todos aquellos datos que representan una limitante (bien sea técnica, ambiental o normativa) para la instalación del parque.

Las capas rasterizadas serán los componentes de una sumatoria y con el resultado de esta operación se creará un raster booleano que representará las restricciones.

Los buffers que se aplicarán serán valores, que para el caso de los cuerpos de agua se tomaran de las restricciones ambientales impuestas por los POMCAs, para las vías por la ley 388 de 1997 y para las líneas de tensión por lo que dispone el RETIE.

---

<sup>3</sup> El tamaño de pixel que se empleará será de 30, esto debido a que los insumos cartográficos obtenidos para trabajar vienen en una escala 1:100.000 y en su mayoría fueron generados a partir de imágenes landsat, cuya resolución espacial es de 30metros.

En aras de optimizar tiempo en análisis posteriores, en esta fase, se construirá un modelo en ArcGIS, haciendo uso de la herramienta ModelBuilder.

**5.2.4 Fase 4. Evaluación de criterios.** Después de observar las condiciones físicas, bióticas y político administrativas del área, y de haber extraído las zonas consideradas como restricción, se procede a la definición de esos criterios realzan la capacidad de ejecución de un proyecto específico, esta evaluación deberá ser medida en una escala continua.

Este proceso consiste en la clasificación de cada uno de los criterios. Se harán rangos para cada uno y a esos rangos se les asignará un valor. En esta también se construirá un modelo.

**5.2.5 Fase 5. Ponderación.** El siguiente paso es determinar los pesos de cada criterio para así seleccionar la que seleccionar el área óptima para diseñar el parque, generar un reporte y una salida grafica indicando donde se localizan dichas áreas.

Este resultado será el producto obtenido al multiplicar los raster con las restricciones por los criterios; al raster obtenido deberá realizársele una conversión a polígono, para así poder determinar la extensión de cada una de las potenciales áreas para instalar un parque eólico. Adicionalmente se realizarán dos consultas, la primera, en la que se determine cuáles de las alternativas tiene un área superior a 10 Ha y la segunda, que indique de esas alternativas con áreas superiores a las 1 Has, cual está más cerca de la subestación o punto de conexión.

Aquí también se empleará la herramienta ModleBuilder.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

La información tipo shape y raster que se adquirió fue la siguiente:

1. Centros poblados
2. Veredas
3. Resguardos indígenas
4. Vías
5. Canal doble
6. Canal sencillo
7. Ciénaga
8. Drenaje doble
9. Drenaje sencillo
10. Embalse
11. Isla
12. Jagüey
13. Laguna
14. Curvas de nivel
15. DTM región Caribe, Colombia
16. Ecosistemas
17. Áreas importantes para la conservación de las aves
18. Sitios RAMSAR
19. Limite reserva forestal Ley segunda
20. Parque Nacional Natural
21. Área nacional prioridad de conservación
22. Nueva área nacional prioridad de conservación
23. Parque Regional Natural
24. Reserva Natural de la sociedad civil
25. Zonificación ambiental POMCA Cuenca Caribe
26. Zonificación ambiental POMCA Río Magdalena
27. Áreas proyectos eléctricos licenciados
28. Ductos
29. Líneas de tensión
30. Proyectos mineros

Esta información base y sin procesar fue almacenada en la carpeta Insumos.

A excepción de las dos capas de zonificación de POMCAS, los datos venían con una cobertura nacional, por lo que fue necesario aplicar clips para descartar todas aquellas zonas que estaban por fuera del área de estudio. Previo a este proceso, toda la información fue proyectada en el mismo sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogota (WKID: 3116).

A las capas vector de tipo línea se les aplicó un buffer, que representa su área de influencia, esto se realizó principalmente con la intención de convertir todas las capas vectoriales en capas tipo polígono.

Las capas tipo línea y los buffers que se les asignó son los que se muestra en el cuadro (ver **Cuadro 2**)

**Cuadro 2. Buffers aplicados**

CAPA	BUFFER (m)
Vías	100
Canal doble	30
Canal sencillo	30
Ciénaga	30
Drenaje doble	30
Drenaje sencillo	30
Embalse	30
Jagüey	30
Laguna	30
Ductos	30
Líneas de tensión	30

**Fuente: Autor**

Por las características temáticas de las capas fue posible realizar uniones entre estas, reduciendo de esta manera el número de capas con las que se venía trabajando y de 30 capas iniciales quedar con 11, las capas finales y los elementos que las componen son los que se enlistan a continuación:

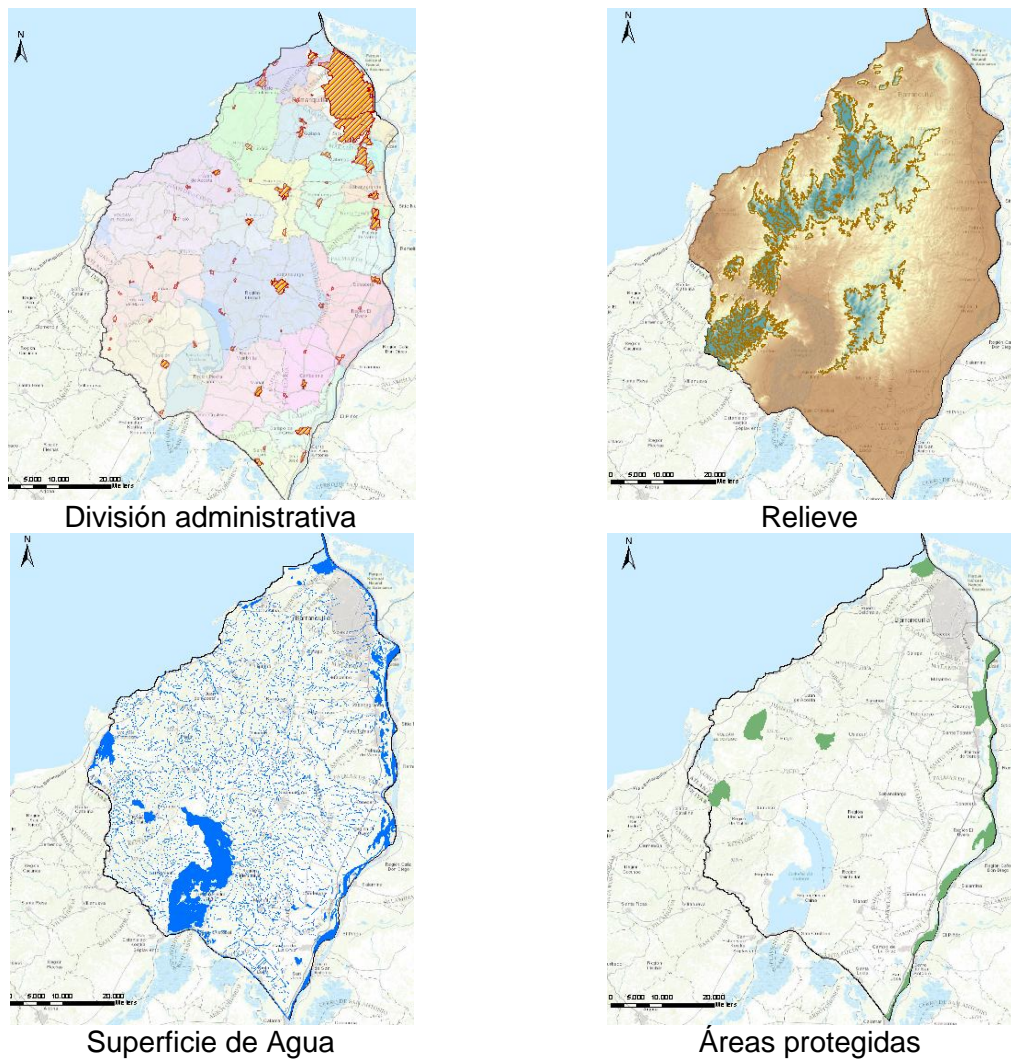
1. Centros poblados
2. Veredas
3. Resguardos indígenas
4. Vías
5. Superficie de agua:
  - a. Canal doble
  - b. Canal sencillo
  - c. Ciénaga
  - d. Drenaje doble
  - e. Drenaje sencillo
  - f. Embalse
  - g. Jagüey
  - h. Laguna
6. Área protegidas
  - a. Área nacional prioridad de conservación
  - b. Nueva área nacional prioridad de conservación
  - c. Parque Regional Natural
7. Zonificación ambiental POMCA Cuenca Caribe
8. Zonificación ambiental POMCA Río Magdalena

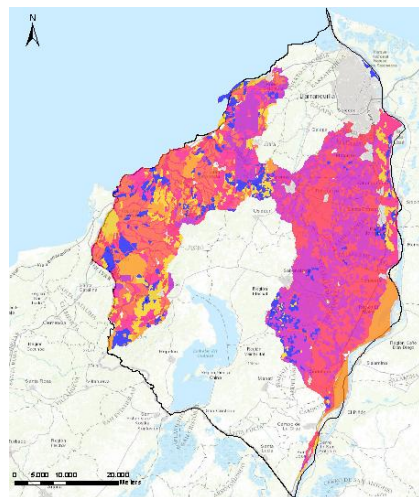


- 9. Curvas de Nivel
- 10. DTM
- 11. Otros proyectos
  - a. Ductos
  - b. Líneas de tensión
  - c. Proyectos mineros

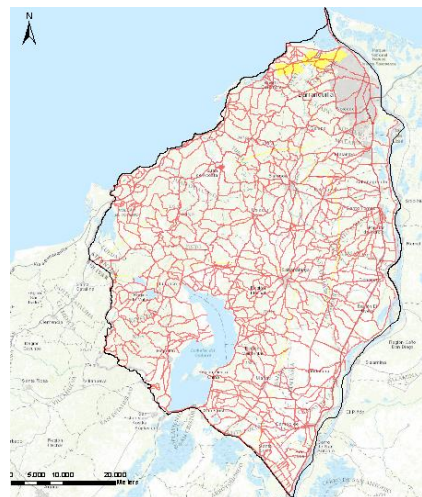
Gráficamente el resultado se manifiesta (Ver anexos de la C a la G):

**Figura 6. Resultado proceso de Adecuación de Datos**





POMCAS



Otros proyectos y vías

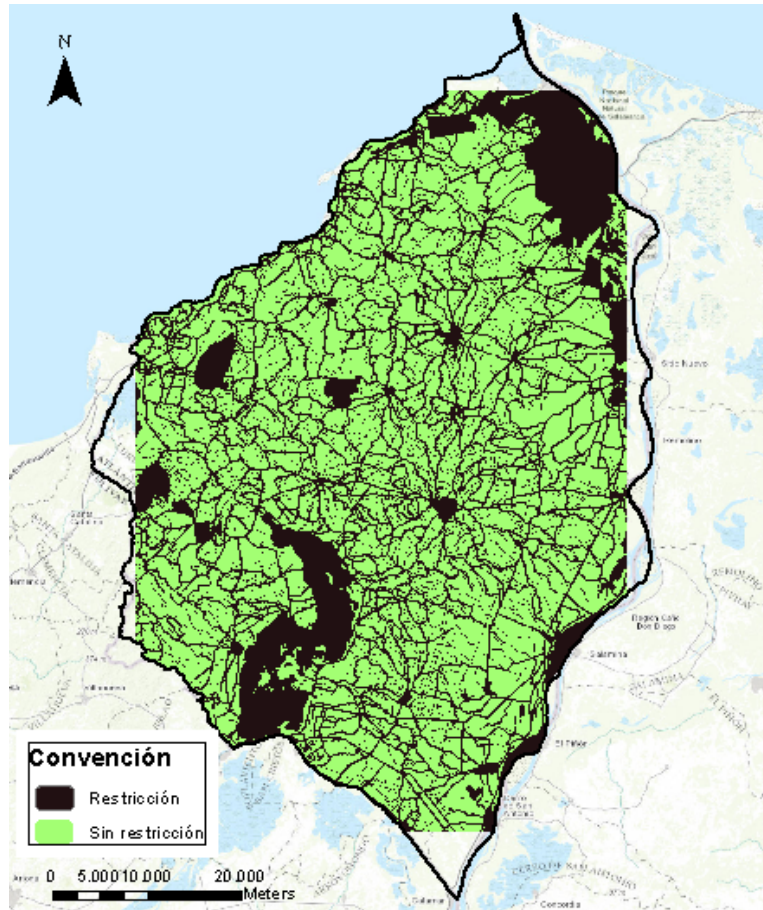
**Fuente: Autor**

Dando continuación con el proceso de identificación del lugar óptimo para la instalación de un parque eólico, lo siguiente, fue identificar donde estaban localizadas las que podrían ser restricciones para el diseño.

En este caso dichas zonas fueron aquellas en las que por la cobertura o uso actual no era posible desarrollar la actividad de instalación del parque eólico, o bien porque técnicamente no era factible o porque el uso era incompatible. Dichas zonas son los 62 centros poblados existentes en el departamento; la red vial del área de estudio; las 8 áreas protegidas, de carácter nacional y regional; las zonas donde a la fecha se tienen licencias de proyectos, mineros, eléctricos y por donde pasan ductos y líneas de tensión; y, las zonas que presenta como cobertura una superficie de agua.

El producto fue una capa raster de tipo booleano, donde el cero representa las celdas con restricciones para el diseño del parque y el uno las celdas donde es viable desarrollar la instalación, ver **Figura 7** (Ver anexo H). este producto se obtuvo tras rasterizar las capas de restricción, realizar una unión entre estas y finalmente clasificar los valores del raster, asignado valores de entrada igual a uno para los píxeles con algún tipo de información y cero para los píxeles vacíos.

**Figura 7. Zonas restringidas**



**Fuente:** Autor

Para evaluar los criterios, paso siguiente en el desarrollo de la metodología planteada, se realizó una sumatoria de ponderados, para esto se asignó un peso o ponderación a todos aquellos criterios que se constituían como factores. Además, también se definió la escala de evaluación.

El proceso básicamente consistió en la superposición de varios rasters utilizando una escala de medición común y un peso, según su importancia, para cada uno. En este caso los criterios evaluados fueron pendientes, zonificación del suelo según lo estipulado en los POMCAs (Cuenca Caribe y Rio Magdalena) y ecosistemas.

El **Cuadro 3**, expone la calificación fijada. Al criterio de pendientes se le asignó un peso de 20%, en cuanto que al del POMCA uno del 65%; y al de ecosistemas de 15 la escala que se empleó para la evaluación fue una escala en intervalos de 1, en el rango de calificación de 1 a 3.

**Cuadro 3. Pesos ponderados**

RASTER	% INFLUENCIA	RANGO	ESCALA
Pendiente	20	0-7	3
		7-12	2
		>25	1
POMCA	65	Zona de Ecosistema estratégico	1
		Zona de Ecosistema estratégico priorizado	1
		Zona de producción	3
		Zona de recuperación ambiental	1
		Zona de rehabilitación productiva	2
		Zona de transición	2
		Zona de uso múltiple restringido	3
		Zona Urbana	1
Ecosistemas	15	Aguas Continentales	1
		Zonas urbanas	1
		Pastos	3
		Vegetación secundaria	1
		Bosques naturales	1
		Cultivos	3

**Fuente: Autor**

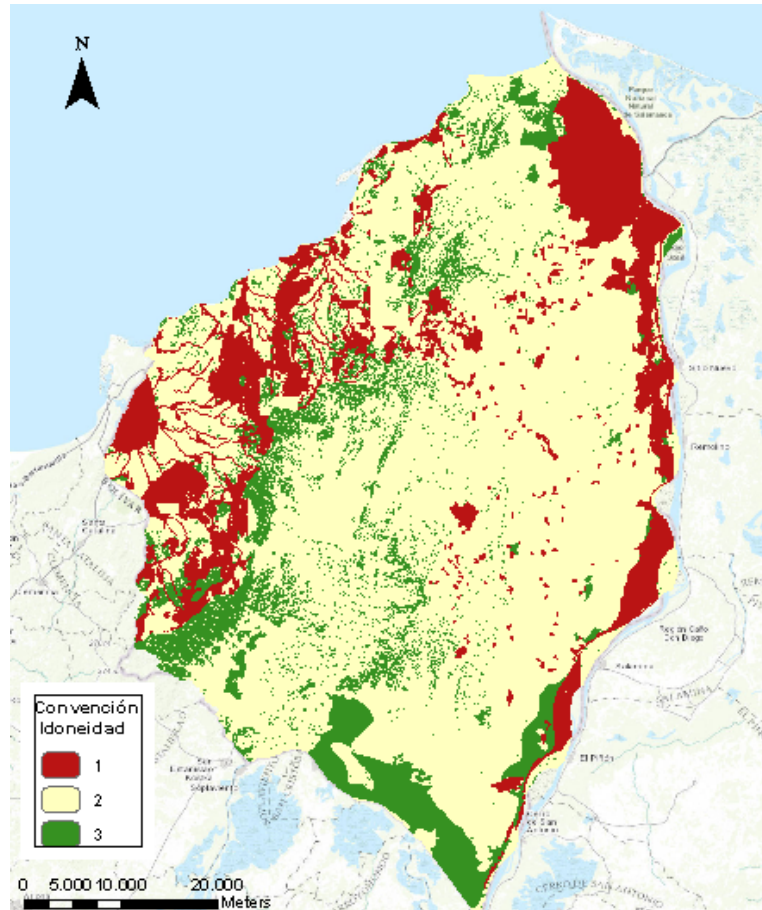
Al correr el modelo se obtuvo como resultado de la sobre posición de pesos un raster que clasificó el área de estudio en tres categorías según su idoneidad para posiblemente instalar un parque solar (Ver **Figura 8** y Anexo I). En dicha clasificación el valor 1 representado con el color rojo en la figura indica idoneidad baja; el dos, de color beige, idoneidad media y el tres, de color verde, idoneidad alta. Las áreas y los porcentajes de área que tienen cada una de estas categorías son mostrada a continuación:

**Cuadro 4. Áreas evaluación**

ID	CATEGORÍA	ÁREA (Ha)	PORCENTAJE (%)
1	Idoneidad baja	58748,563828	68
2	Idoneidad media	225867,277007	18
3	Idoneidad alta	46591,922259	14

**Fuente: Autor**

**Figura 8. Evaluación de Criterios**



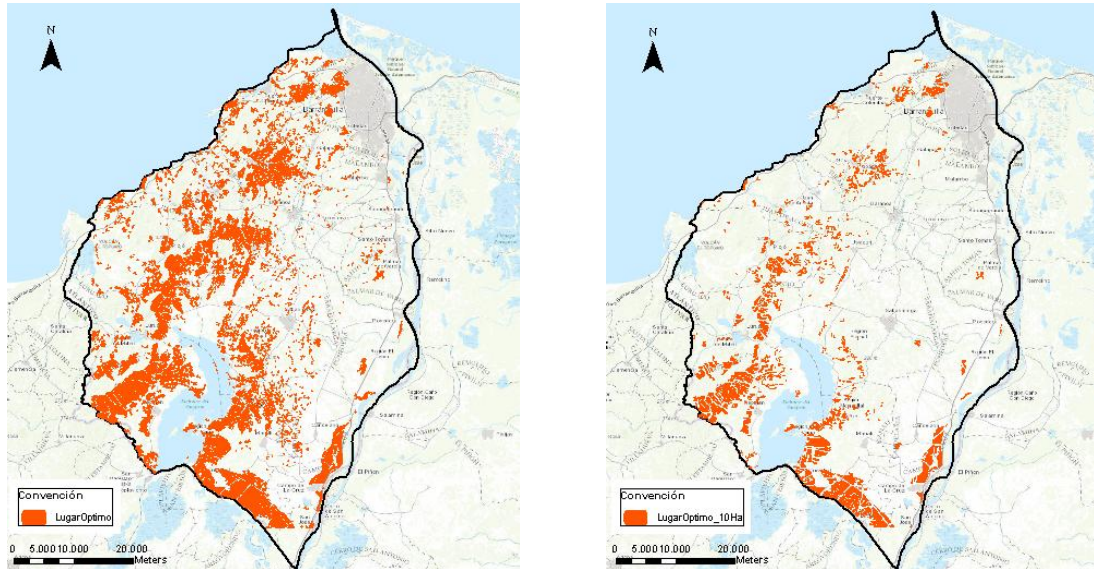
**Fuente: Autor**

Finalmente para determinar el lugar óptimo para el diseño de un parque eólico se multiplicó el resultado del modelo de restricciones con el de evaluación de criterios y se realizó una consulta para seleccionar aquellas áreas disponibles, el resultado de esto fue una generación de 5013 polígonos con un área total de 30438,4525 Ha, distribuidos en el departamento (Ver

**Figura 9 y Anexo J).**

Sin embargo, el 92% de estas áreas corresponde a zonas con extensiones inferiores a diez hectáreas, por lo que para identificar donde estaban ubicados los polígonos de mayor extensión, se realizó una consulta y luego se generó un nuevo polígono con las áreas de más de 10 Ha.

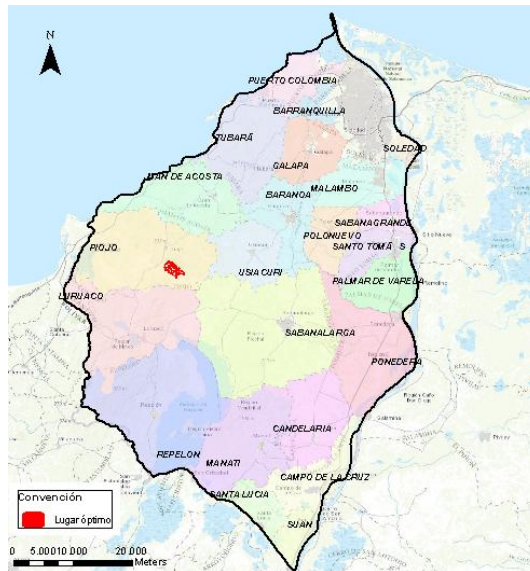
**Figura 9. Selección lugares**



**Fuente: Autor**

Finalmente, se seleccionaron los tres polígonos de mayor extensión, y de estos tres se tomó como el mejor lugar, el más cercano a sabana larga, municipio que cuenta con la subestación eléctrica de mayor capacidad del departamento de estas tres alternativas dos estaban ubicadas en el municipio de Santa Lucia, al sur del departamento y una en Piojó, al noroccidente del departamento La seleccionada fue la ubicada en Piojó, ver **Figura 10** y Anexo K.

**Figura 10. Lugar óptimo**



## 6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los procesos de toma de decisión son procesos de selección, que buscan alcanzar un objetivo a través de la valoración de los criterios que influyen en la consecución de ese objetivo planteado, dichos criterios pueden tener un impacto positivo (factores) o negativo (limitantes o restricciones), por lo que su calificación es trascendental en el proceso.

Para la identificación del área óptima de instalación de un parque eólico se tomó como factores la zonificación de uso del suelo de dos de los POMCAS de la región, ecosistemas y pendientes del área de estudio; y como limitantes o restricciones los centros poblados, la red vial, las áreas protegidas, las zonas con proyectos licenciados (mineros, eléctricos, ductos o líneas de tensión), y, las zonas que presentan como cobertura una superficie de agua.

Por el amplio rango de aplicación de los SIG y por contar con diferentes capas de datos, fue posible realizar un análisis con más de un criterio de evaluación. Su carácter holístico permitió proponer modelos y análisis espaciales que favorecieron la selección de un área con características especiales.

Y, gracias a esa particularidad fue posible realizar operaciones matemáticas entre las 11 capas raster generadas con los datos iniciales. En el modelo de restricciones, a las áreas con algún tipo de restricción se les calificó con un valor de cero, mientras que las áreas sin restricción se les dieron un valor de uno.

Todas aquellas áreas con zonas restringidas se convirtieron en áreas descartables, en tanto que las que obtuvieron la calificación de uno continuaron en

el proceso para después sobreponerse con el resultado de la evaluación de criterios. El producto de esta operación fueron 5013 polígonos idóneos de entre los que se seleccionaron los tres de mayor extensión, para luego elegir de entre estos tres el que sería el lugar óptimo de instalación.

En el desarrollo de proceso se generaron cuatro modelos con la herramienta ModelBuilder del software ArcGis: Adecuación de Datos, Modelo de restricciones, evaluación de criterios y lugar óptimo; la creación y aplicación de estos modelos agilizó los procesos, a la vez, que de una manera gráfica estructuró visualmente las fases de este proyecto.



## 7. CONCLUSIONES

- Se constituyen como factores limitantes para el diseño de un parque eólico a todos aquellos criterios que tienen un impacto negativo sobre el diseño del mismo. Con la información base con la que se trabajó se obtuvo que los factores son las áreas donde por coberturas no sería posible (técnica, ambiental o normativamente) instalar un aerogenerador, o alguna infraestructura necesaria para el funcionamiento del parque. Es decir, las zonas donde está establecido un centro poblado, un área de protección ambiental, una superficie de agua, o donde se realiza una actividad económica licenciada.
- Gracias a que variables que se podían clasificar en rangos y las que les era posible asignarles un valor según su influencia sobre el proyecto, se tomaron como criterios de evaluación los ecosistemas, las pendientes y la zonificación ambiental de los POMCAS del Rio Magdalena y la cuenca Caribe. Siendo aquí el de mayor la zonificación, puesto que es con base en esta que se formulan los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios, los cuales finalmente determinan las actividades compatibles para cada uso del suelo.
- Después de realizar los análisis de sobre posiciones se determinó que dos de las tres zonas de mayor potencial para la instalación de un parque eólico, se ubican al sur occidente del departamento, en el municipio de Santa Lucia, la tercera se ubica en el municipio de Piojó, al occidente del departamento.
- Por ser la zona de mayor extensión, sin restricciones, una pendiente apropiada y un uso de suelo compatible, el polígono ubicado en el municipio de Piojó es el lugar óptimo para instalar un parque eólico en el departamento del atlántico.

## 8. RECOMENDACIONES

- La evaluación de los criterios es una actividad que debe realizarse en colaboración a un equipo multidisciplinario e trabajo, con expertos en el área de conocimiento de cada uno de los criterios, esto para ampliar la perspectiva y disminuir la subjetividad en el ejercicio.
- Para obtener más categorías en el resultado final y limitar aún más las áreas potenciales se podría cambiar la escala de evaluación por una más amplia.
- La organización a la hora de almacenar las capas que se van generando es vital a la hora de construir el modelo, capas mal rotuladas o con nombres parecidos podrían generar confusiones que ejecutadas se convertirán en errores.
- Esta metodología se podría aplicar, con un mayor nivel de detalle para las alternativas, adicionándole una capa de datos catastrales, y de allí obtener un análisis de riesgos.

## BIBLIOGRAFÍA

Agencia Insularde energía de Tenerife. (s.f.). Información general sobre energía eólica. Santa Cruz de Tenerife, España.

Alonso Sarria, F. (2005). *Sistemas de Información Geográfica. Correcciones a las imágenes de satélites*. Murcia: Universidad de Murcia.

Carver, S. (1991). Integrating multicriteria evaluation with geographical information systems. *International Journal od Geographical Information Systems* , 321-339.

Castells, X. E. (2012). *Energías renovables*. Maadrid: Ediciones Diaz de Santos.

Departamento Nacional de Planeación y Gobernación del Atlántico. (2011). Visión de Desarrollo Territorial Departamental. Visión Atlántico 2020: La ruta para el desarrollo. Bogotá, Colombia. Recuperado el 08 de 04 de 2017

Díaz Cuevas, P., & M.F., P. L. (2015). *Evaluación y caracterización de las zonas incompatibles con la implantación eólica en Andalucía mediante la aplicación de un modelo locacional con Sistemas de Información Geográfica y Técnicas de*. Universidad de Zaragoza.

Eastman, J., Kyem, P., Toledano, J., & Jin, W. (1993). *GIS and decision making*. Ginebra: United Nations Institute for Training and Research -UNITAR-.

ESRI. (s.f.). *ArcGIS Resources*. Recuperado el 15 de Mayo de 05, de Introducción a SIG: <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n000000t000000.htm>

ESTUDIO DE LOCALIZACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO OFFSHORE EN LA COSTA ASTURIANA MEDIANTE ANÁLISIS MULTICRITERIO2012XVI Congreso Internaional de de Ingeniería de ProyectosValencia

Falces de Andrés, A. (2015). *Planifiación de parques eólicos mediante sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos*. Universidad La Rioja.

FAO. (2000). *El AHP y su aplicación para determinar los usos de las tierras. El caso de Brasil*. Santiago de Chile: Proyecto GCP/RLA/126/JPN.

Fernández Roa, A. (2010). MÉTODO PARA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE CENTRALES DE ENERGÍAS. *Memoría para optar al título de Ingeniero Civil electricista* . Chile: Universidad de Chile.

Frias Herreros, M. (2014). *Aplicación de un modelos de decisión multicriterio para la implantación de energías renovables en un sistema energético*. Universidad de Valladolid.

Gobernación del Atlántico. (2016). Plan de desarrollo 2016-2019. Barranquilla, Colombia.

Gómez Delgado, M., & Barredo Cano, J. I. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y evlauación multicriterio en la ordenación del territorio*. México: Alfaomega Grupo Editor.

*La dimensión económica del desarrollo sostenible*2011Alicante, EspañaEditorial Club Universitario

Maguire, D., Goodchild, M., & Rhind, D. (1997). *An Overview and definitions of GIS*. New York: Geographical Information Systems.

Martínez, E., & Escudey, M. (1998). *Evaluación y decisión multicriterio. Reflexiones y experiencias*. Santiago e Chile: Universidad de Santiago.

NCGIA. (1990). *National Center for Geographic Information and Analysis*. Sta. Barbara: University of California.

Núñez, A., & Lantada, N. (2004). *Sistemas de información Geográfica. Prácticas con ArcView*. Recuperado el 2017 de Mayo de 5, de Recuperado el 05 de Mayo de 2017, de [https://books.google.de/books?id=gZR1xLUBRxwC&pg=PA13&dq=sistema+de+informacion+geografica+definicion&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=sistema%20de%20informacion%20geografica%20definicion&f=false](https://books.google.de/books?id=gZR1xLUBRxwC&pg=PA13&dq=sistema+de+informacion+geografica+definicion&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=sistema%20de%20informacion%20geografica%20definicion&f=false)

Ordoñez, P., Quentin, E., & Cabrera, P. (Julio de 2014). *Propuesta de metodología Geomática basada en evaluación multicriterio*. Recuperado el 2017 de Mayo de 5, de [https://www.researchgate.net/profile/Pablo\\_Cabrera\\_Barona/publication/266326696\\_Propuesta\\_de\\_metodologia\\_Geomatica\\_basada\\_en\\_Evaluacion\\_Multicriterio\\_para\\_el\\_trazado\\_de\\_ductos\\_petroleros/links/55f1d8e708aef559dc492f5f/Propuesta-de-metodologia-Geomatica-ba](https://www.researchgate.net/profile/Pablo_Cabrera_Barona/publication/266326696_Propuesta_de_metodologia_Geomatica_basada_en_Evaluacion_Multicriterio_para_el_trazado_de_ductos_petroleros/links/55f1d8e708aef559dc492f5f/Propuesta-de-metodologia-Geomatica-ba)

Ordóñez, P., Quentin, E., & Cabrera, P. (2015). Propuesta de metodología Geomática basada en evaluación multicriterio para el trazado de ductos petroleros. *PRSCO 2014*, (pág. 20). Loja, Ecuador.

Pacheco, J. F., & Contreras, E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterios para progrmas y proyectos*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.

Twenergy. (8 de Junio de 2016). *GUÍA PARA ENTENDER EL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL COLOMBIANO*. Recuperado el 5 de Mayo de 2017, de <https://twenergy.com/co/a/guia-para-entender-el-sistema-interconectado-nacional-colombiano-2233>

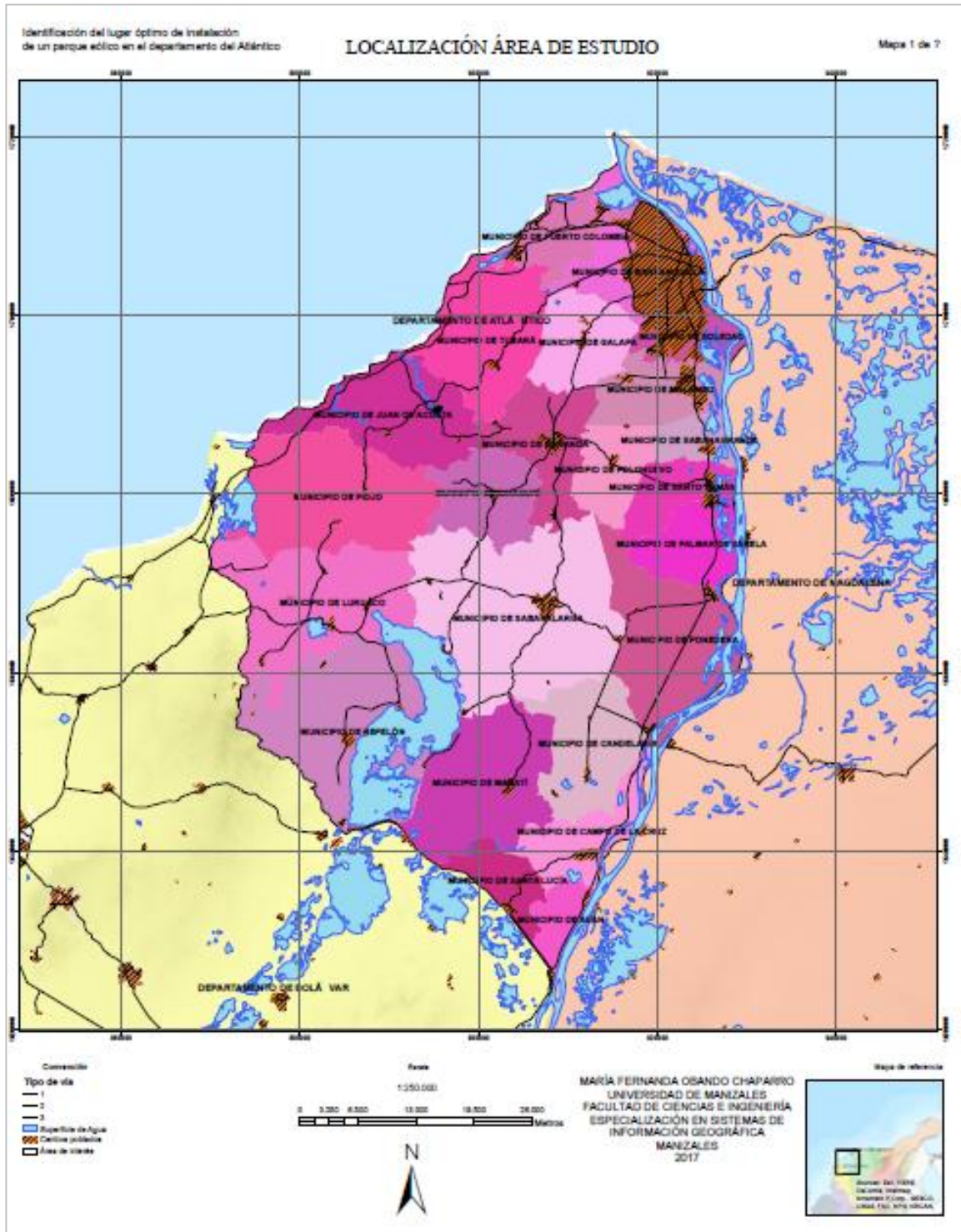
Voogd, H. (1999). *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. Londres.

## ANEXO A ASPECTOS NORMATIVOS A CONSIDERAR DEL SECTOR ENERGETICO COLOMBIANO

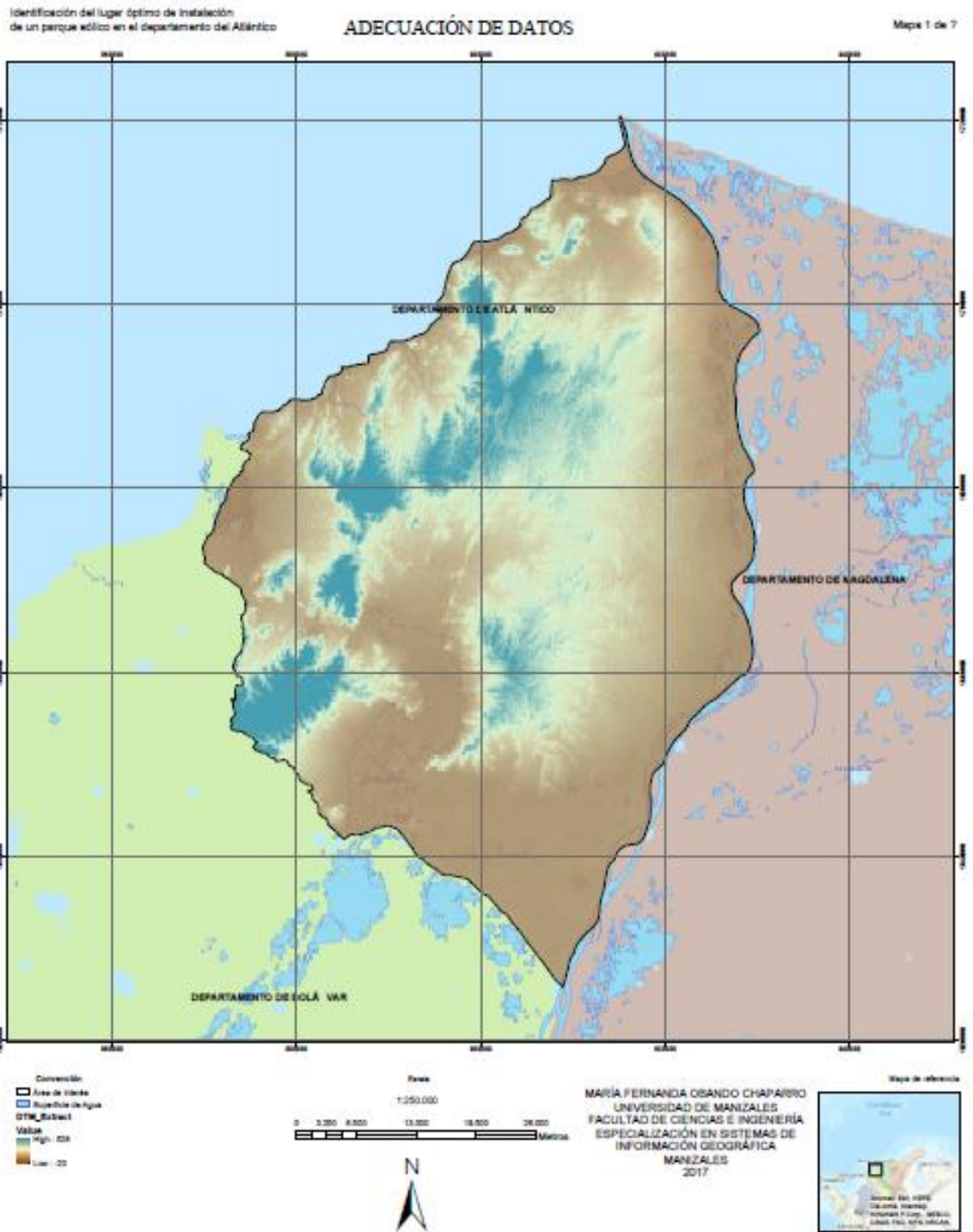
<b>Norma</b>	<b>Aspecto</b>
Ley 1715 de 2014,	"Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.", que busca además, promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda.
Resolución MinAmbiente 1312 de 11 agosto de 2016	"Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de proyectos de uso de fuentes de energía eólica continental y se toman otras determinaciones"
Resolución MinAmbiente 1283 de 8 agosto de 2016	"Por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables - FNCER y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014 y se adoptan otras determinaciones"
Decreto 2143 de 2015	"Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo III de la Ley 1715 de 2014."
Resolución UPME 0281 de 2015	"Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala"
Resolución CREG 024 de 2015	"Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN)"
Decreto 1623 de 2015	"Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas"
Decreto 2492 de 2014	"Por el cual se adoptan disposiciones en materia de implementación de mecanismos de respuesta de la demanda"
Decreto 2469 de 2014	"Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración"

**Fuente. Elaborada a partir de (Ministerio de Minas y Energía, Colombia)**

## ANEXO B. LOCALIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

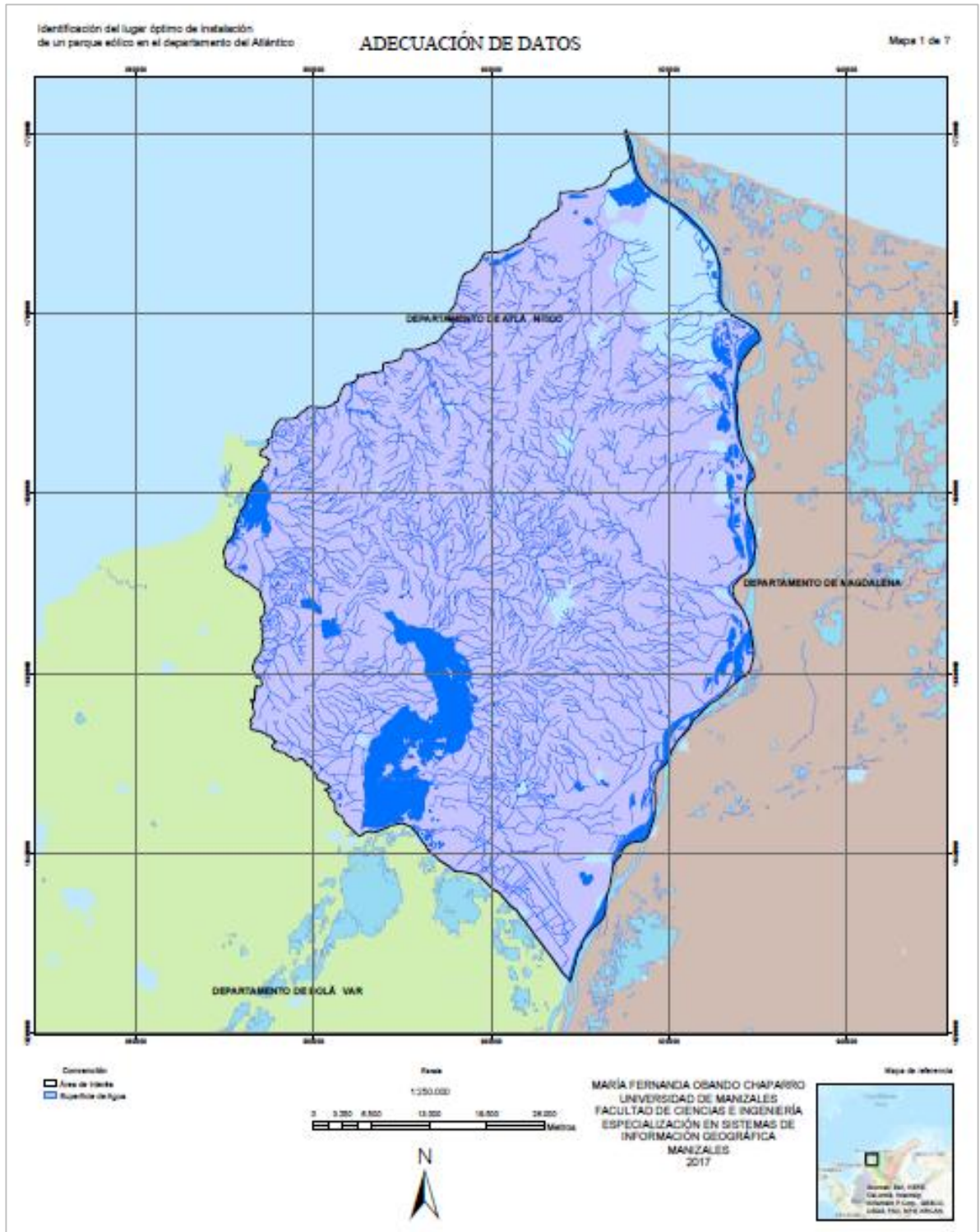


# ANEXO C. RELIEVE

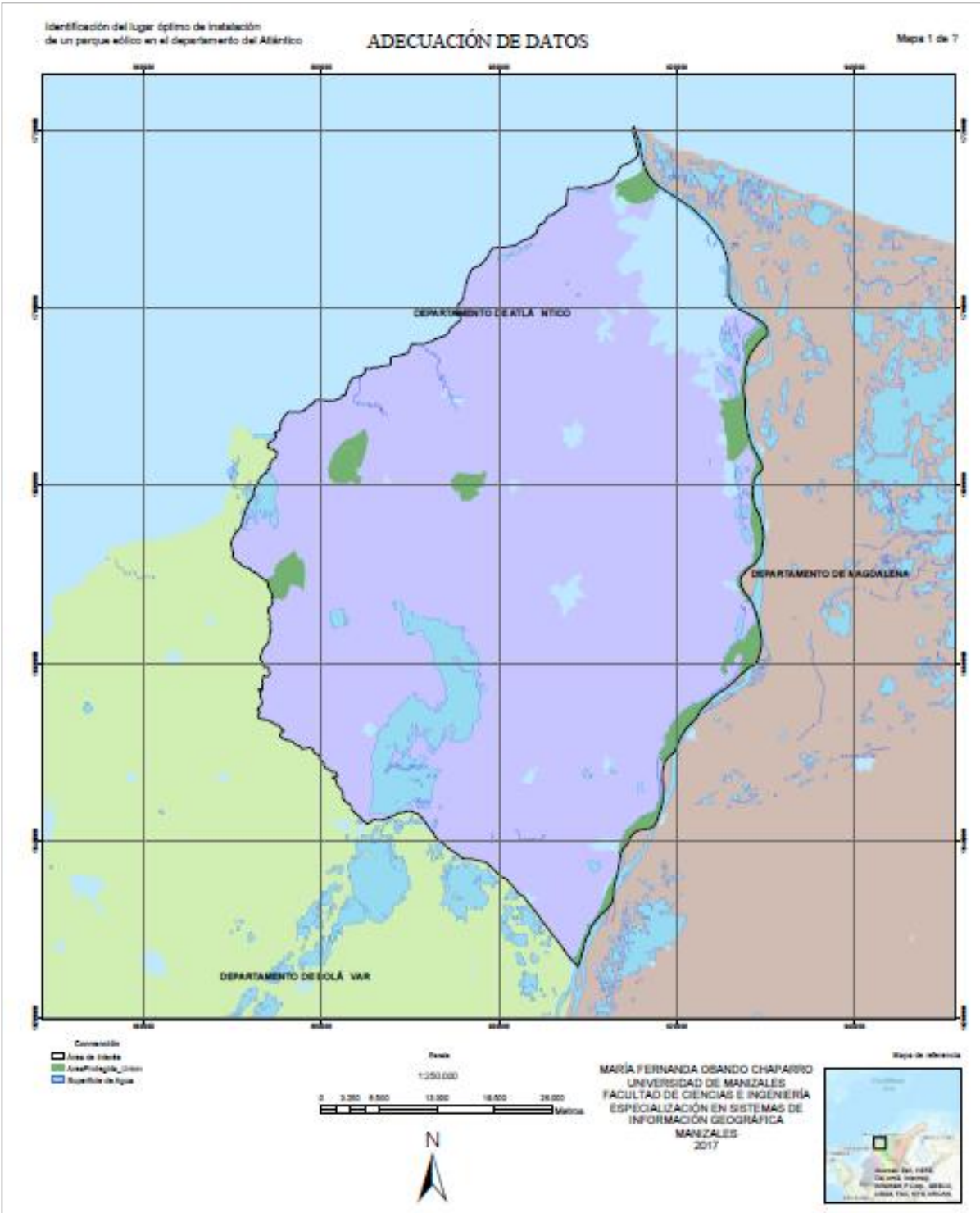




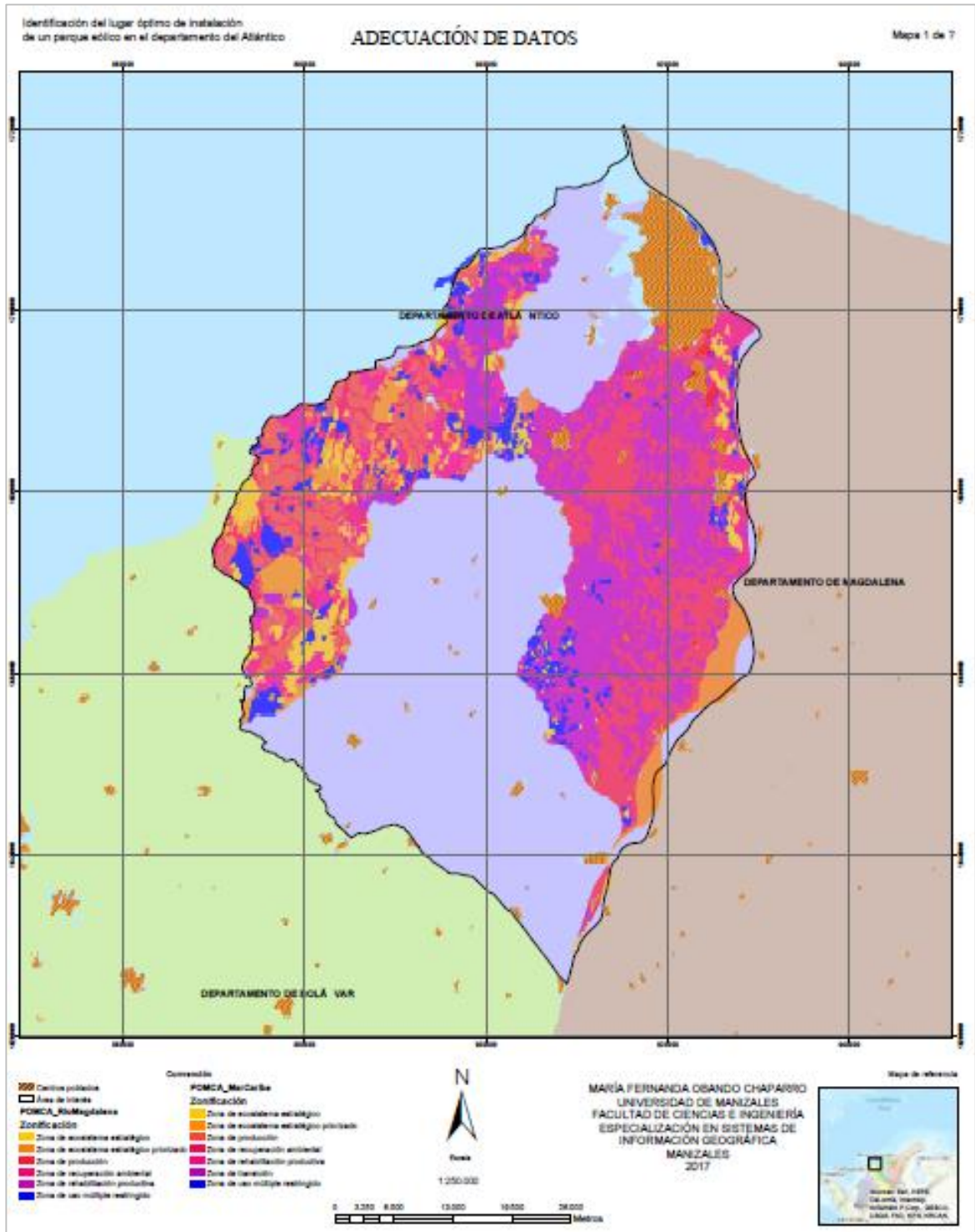
## ANEXO D. SUPERFICIE DE AGUA



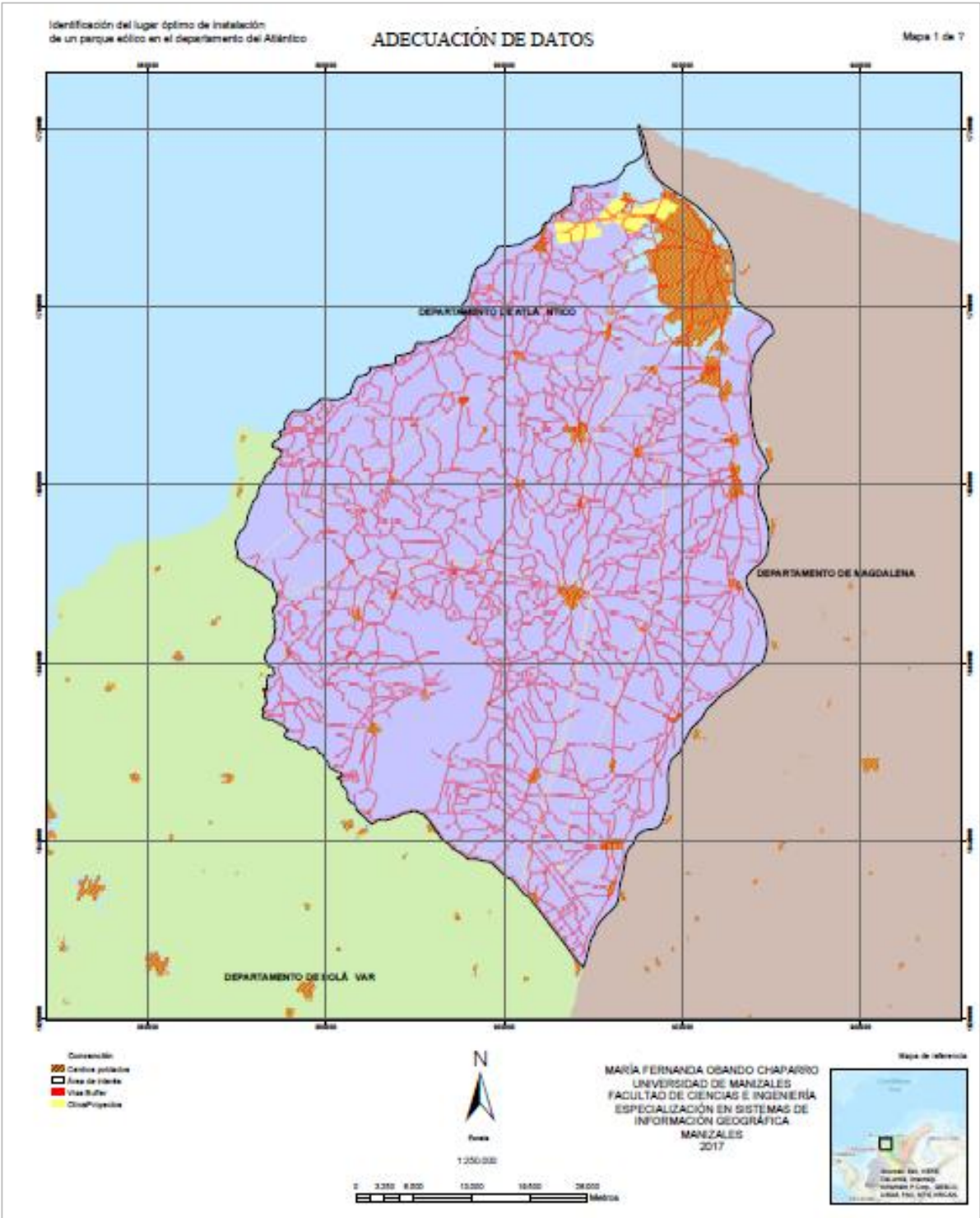
# ANEXO E. ÁREAS PROTEGIDAS



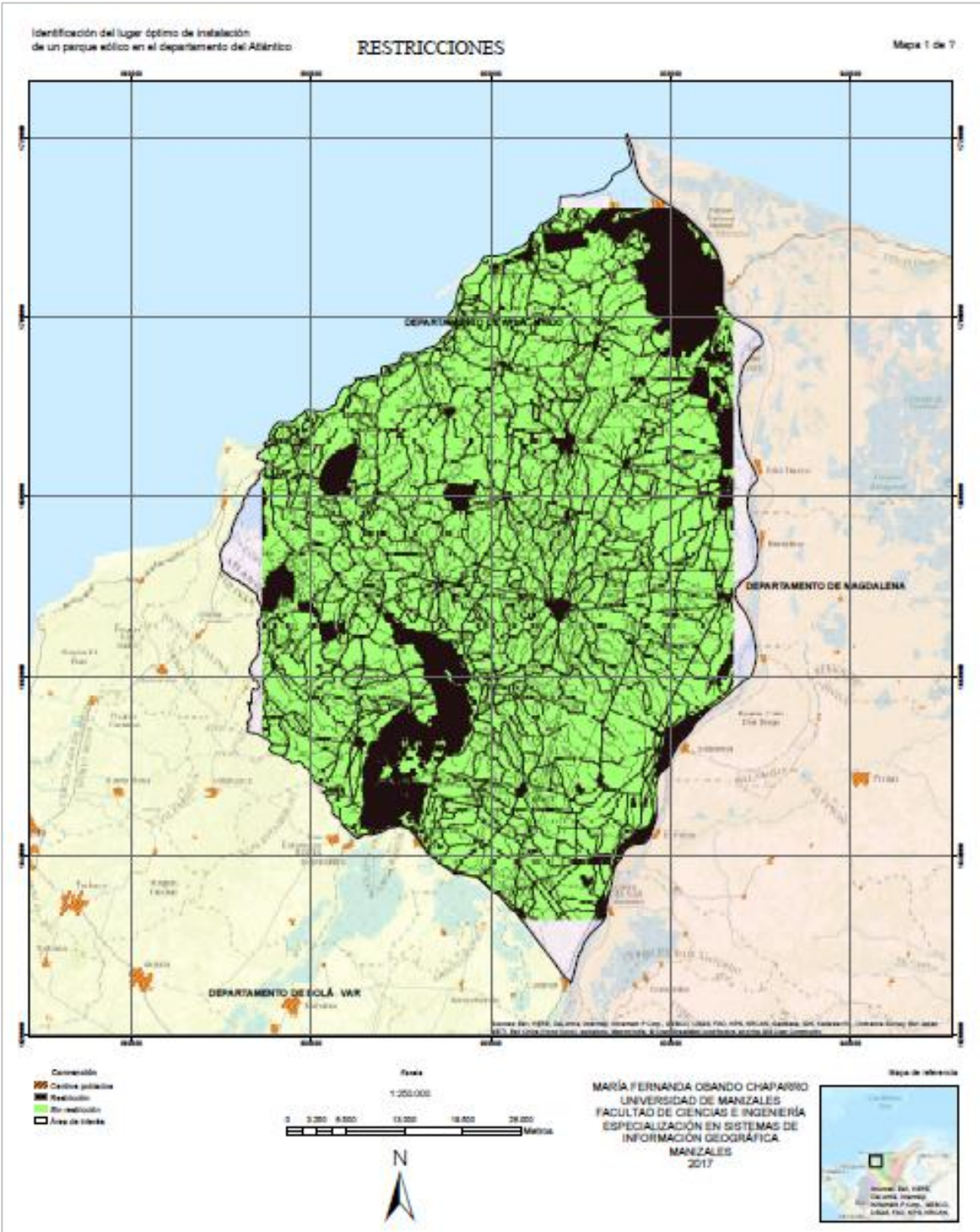
# ANEXO F. POMCAs



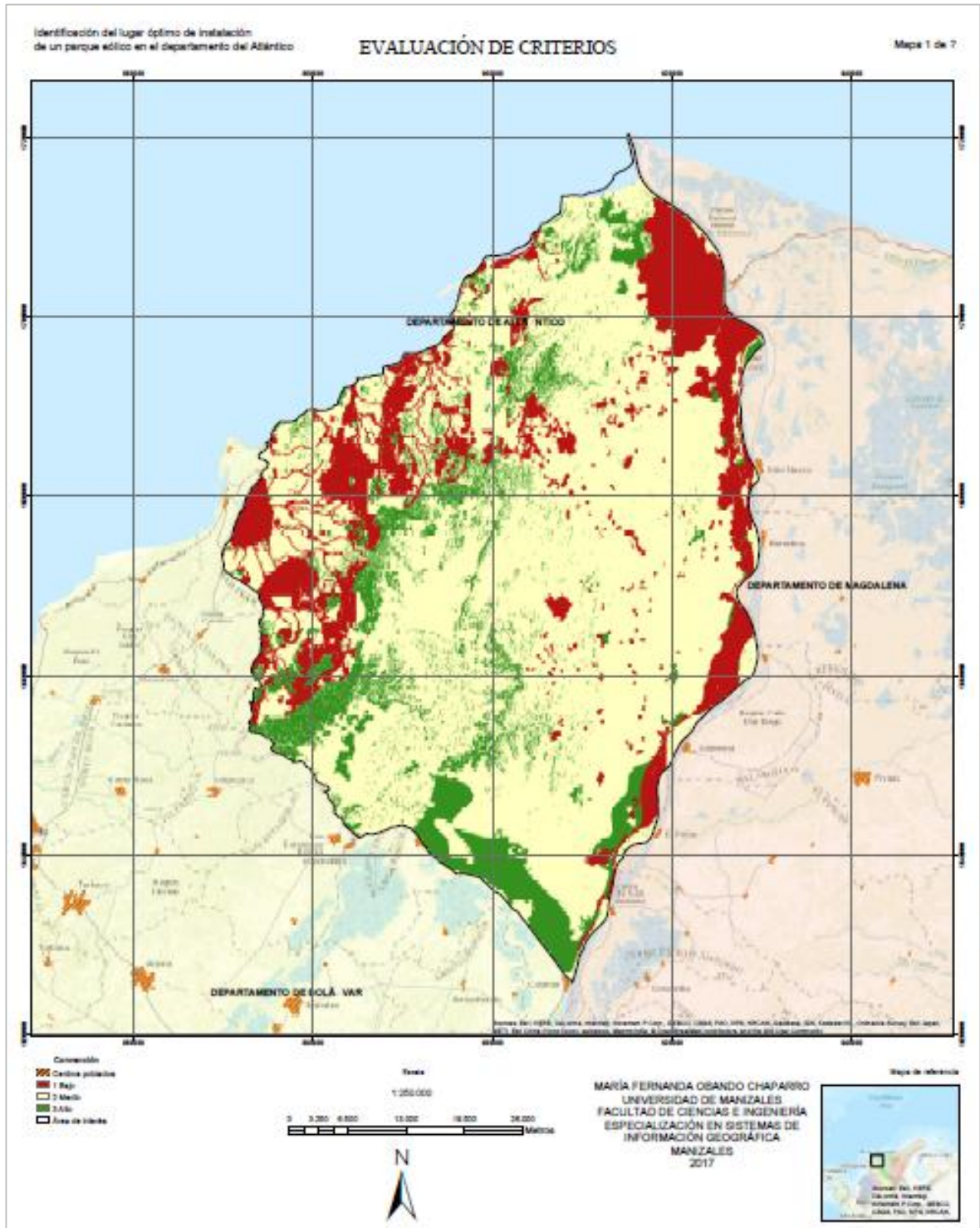
# ANEXO G. OTROS PROYECTOS



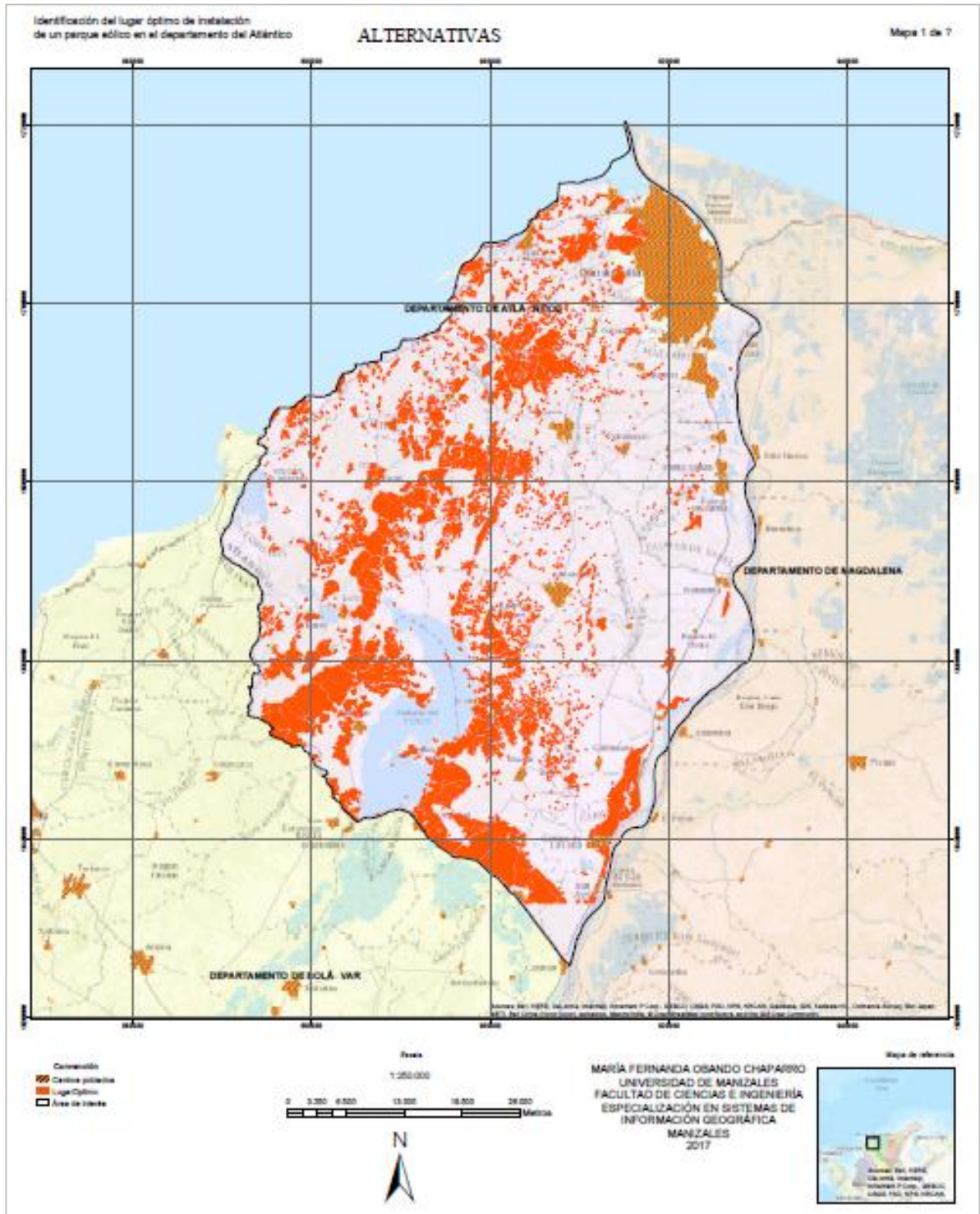
# ANEXO H. RESTRICCIONES EN EL ÁREA DE ESTUDIO



# ANEXO I.EVALUACIÓN DE CRITERIOS



# ANEXO J. ALTERNATIVAS



# ANEXO K. LUGAR ÓPTIMO

