

ANÁLISIS CONCEPTUAL DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA
EN LA PROVINCIA DE SOTO NORTE EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER

RONALDO GRANADOS PEÑALOZA

VALENTINA JÁCOME MEZA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2025

ANÁLISIS CONCEPTUAL DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA
EN LA PROVINCIA DE SOTO NORTE EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER

RONALDO GRANADOS PEÑALOZA

VALENTINA JÁCOME MEZA

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero/a de Petróleos

Director Erik Giovany Montes Páez

Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

BUCARAMANGA

2025

DEDICATORIA

A ti, papá, porque, aunque la vida no nos dio la oportunidad de compartir este momento, cada paso que di en este camino fue por ti. No hay día en el que no te piense, en el que no desee que estuvieras aquí para verme cumplir este sueño que tantas veces imaginamos juntos. Me enseñaste a luchar, a ser fuerte, a nunca rendirme, y aunque tu ausencia ha sido la prueba más difícil de todas, me aferro a la certeza de que, desde donde estés, me sigues acompañando, orgulloso de lo que he logrado. Te amo con todo mi corazón y siempre te llevaré conmigo.

A mi madre, quien ha sido mi refugio y mi motor, la que con su amor y paciencia ha estado a mi lado en cada caída y cada triunfo. Gracias por ser esa luz que me guía, por apoyarme en cada locura, por seguir creyendo en mí incluso cuando yo dudaba. Sé que, al igual que papá, has dado todo por verme llegar hasta aquí, y no hay palabras suficientes para expresar lo agradecido que estoy por tenerte. Este logro es tan tuyo como mío.

A mi perro Duke, mi silencioso compañero en las noches más difíciles, cuando la vida se volvía pesada y las fuerzas parecían agotarse. En esos momentos en los que la soledad y la desesperanza me abrazaban, ahí estabas tú, con tu lealtad inquebrantable, recordándome que la vida, a pesar de todo, siempre tiene algo hermoso por ofrecer. No sabes cuánto significó para mí tu compañía en este proceso.

A mis hermanos Zamir, Heberth y Mabel, porque caminar juntos este sendero ha sido un regalo. Crecimos soñando con un futuro mejor, y hoy, más que nunca, valoro el amor y la complicidad que nos une. Gracias por estar ahí, por ser mi familia, mi hogar en cualquier parte del mundo.

A mis amigos y amigas, porque sin ustedes este camino habría sido mucho más difícil y solitario. A Valentina, más que mi compañera de tesis, mi mejor amiga, la persona que

ha estado conmigo en cada etapa de esta travesía universitaria. Gracias por tu paciencia infinita cuando estuve lejos, por tu apoyo incondicional, por hacer que este proceso fuera más llevadero. Sin ti, este camino habría sido otro, y no tan bonito como lo fue. A Walter, con quien compartí incontables experiencias. A Edgar, mi "compa", porque lo logramos, como un día nos prometimos en aquella clase de Química 2, cuando todo parecía tan lejano.

A Mario, quien fue mi soporte en esos momentos en los que ni yo mismo sabía hacia dónde iba. A mi tío Jaime, porque cuando tuve que dejar mi pueblo para venir a la ciudad, él estuvo ahí, apoyándome y dándome consejos. A mi tía Olga, por su apoyo incondicional, por su amor inquebrantable y por estar siempre ahí. A mi nonita Socorro, por sus oraciones y bendiciones.

A mis amigos Garri, Coneo, Marcos, Darío y tantos otros que, aunque no los nombre a todos, saben lo importantes que han sido en este camino. Gracias por cada risa, por cada momento compartido, por hacer de esta etapa algo más ligero y llevadero. A quien fue un capítulo importante en mi vida, por los momentos compartidos y las lecciones aprendidas, siempre guardaré un cariño especial.

Este logro no es solo mío. Es de cada persona que, de una forma u otra, ha sido parte de este viaje. Cada uno dejó una huella en mi vida, y por eso, siempre llevaré un pedazo de ustedes conmigo. Gracias por ser parte de mi historia.

Ronaldo Granados Peñaloza

DEDICATORIA

Con el corazón lleno de gratitud, dedico este trabajo a mis padres, quienes con su esfuerzo incansable, amor infinito y apoyo incondicional han sido el pilar fundamental en cada paso que he dado en mi vida. Su guía y sacrificio han sido la base sobre la que he construido mis sueños. A mi abuela Martha, cuyo amor y oraciones han sido un refugio y una fortaleza en este camino. Su fe en mí ha sido un motor que me impulsó a seguir adelante en cada desafío.

A mis abuelos Clara y Luis, que estuvieron en el comienzo de este viaje y que ahora me acompañan desde el cielo en su final. Su amor y enseñanzas siguen vivos en mi corazón y en cada logro alcanzado. A mi hermana, quien es mi mayor inspiración y mi razón para ser mejor cada día. Quiero ser un ejemplo para ella, motivarla a perseguir sus sueños y ayudarla a construir un futuro lleno de oportunidades.

A mi tío Luis, un hombre admirable, un apoyo incondicional en mi vida. Su fortaleza, su generosidad y su confianza en mí me han impulsado a seguir adelante. Es mi orgullo y mi ejemplo a seguir.

A Cristian, quien estuvo a mi lado en la mayor parte de este camino. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles, por alentarme cuando quise rendirme y por celebrar conmigo cada meta alcanzada. Tu apoyo incondicional hizo que este viaje fuera más llevadero y especial.

A Jenifer, una amiga inigualable, que ha estado a mi lado en cada etapa, apoyándome sin dudar y creyendo en mí incluso cuando yo no lo hacía. Su amistad ha sido un refugio y una motivación constante.

A Ronaldo, más que un compañero de tesis, mi mejor amigo, que estuvo presente desde el inicio hasta el final. Compartimos desafíos, aprendizajes y risas, dejando una amistad sincera que siempre valoraré. Gracias por tu paciencia y cariño. A Paula, mi

personita especial, quien con su alegría y apoyo constante me motivó a ser mejor. Gracias por no dejarme caer y por recordarme siempre que todo esfuerzo vale la pena. A su familia, por su cariño y hospitalidad. A Walter, con quien compartí desvelos, aprendizajes y desafíos. Gracias por la paciencia, el apoyo mutuo y por demostrarme que juntos todo es más llevadero.

A todos mis compañeros, amigos y familiares que de una u otra manera formaron parte de este proceso, brindándome su apoyo, comprensión y compañía. Cada uno de ustedes dejó una huella en este camino y por eso les estaré siempre agradecida.

Valentina Jácome Meza

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este libro agradecemos a: Ante todo, agradecemos a Dios, quien nos ha dado la fortaleza, la sabiduría y la paciencia para recorrer este camino. Su guía ha sido un refugio en los momentos difíciles y el impulso para seguir adelante en cada desafío.

A la Universidad Industrial de Santander, nuestra segunda casa durante estos años, por brindarnos una formación académica de excelencia y las herramientas para crecer profesional y personalmente. A cada espacio, cada reto y cada oportunidad que encontramos en sus aulas, gracias por ser parte fundamental de este aprendizaje.

Al director de tesis, el Ing. Erik Montes, por su confianza, su orientación y por brindarnos no solo su conocimiento, sino también la oportunidad de crecer profesionalmente más allá de la universidad. Su apoyo ha sido clave en el desarrollo y estaremos siempre agradecidos.

Al grupo de investigación GALILEO UIS, que fue una pieza fundamental en las últimas etapas. Gracias por darnos la oportunidad de aprender, investigar y seguir desarrollando potencial en un entorno de excelencia académica.

A la selección de fútbol de la universidad, por acogernos como uno más desde el primer día, brindándonos un espacio de compañerismo y amistad que hizo de esta experiencia universitaria aún más enriquecedora.

A los compañeros, quienes fueron más que colegas de estudio; gracias por su apoyo y por compartir este camino lleno de desafíos y aprendizajes. Cada momento compartido hizo de esta etapa una experiencia invaluable.

A todos aquellos que, de una u otra manera, apoyaron en este proceso, el más sincero agradecimiento.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	20
1.1. OBJETIVO GENERAL	20
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. GENERALIDADES.....	21
2.1. TECNOLOGÍA EÓLICA.....	21
2.1.1. Tipos de tecnologías eólicas.....	22
2.1.2. Componentes de un parque eólico onshore	25
2.2. PRINCIPIOS DE LA ENERGÍA EÓLICA.....	26
2.3. PANORAMA GLOBAL ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA.....	29
2.4. ACTUALIDAD DE LA INDUSTRIA EÓLICA.....	31
3. METODOLOGÍA	34
4. IDENTIFICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA EÓLICA.....	39
4.1. MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA EÓLICA	39
4.1.1. Instrumentos	40
4.1.2. Datos Satelitales y Bases Climáticas.....	45

4.1.3.	Softwares.....	46
4.1.4.	Análisis Comparativo entre los Softwares y Bases de Datos	53
4.1.5.	Selección de Metodología	62
5.	RECOPILACIÓN DE DATOS GEOGRÁFICOS, METEOROLÓGICOS Y AMBIENTALES DE LA PROVINCIA SOTO NORTE, SANTANDER.....	65
5.1.	GEOGRAFÍA Y CARACTERÍSTICAS NATURALES.....	66
5.1.1.	Topografía	67
5.1.2.	Hidrografía	68
5.1.3.	Ecosistemas y Biodiversidad	70
5.1.4.	Actividad económica y uso del suelo	70
5.2.	RECOPILACIÓN DE DATOS METEREOLÓGICOS DE SOTO NORTE	72
5.2.1.	Temperatura	72
5.2.2.	Precipitación	73
5.2.3.	Vientos.....	74
5.2.4.	Datos ambientales de la Provincia de Soto Norte.....	75
5.2.5.	Ecosistemas	77
5.2.6.	Gestión ambiental y conservación	78
5.3.	SELECCIÓN DE ÁREAS ÓPTIMAS	79
5.3.1.	Zona de interés 1: Vetás, Santander.	81
5.3.2.	Zona de interés 2: Charta.	83
5.3.3.	Zona de interés 3: Tona.....	84

6. CUANTIFICAR TEÓRICAMENTE EL POTENCIAL DE RECURSOS DISPONIBLES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA EN LA PROVINCIA SOTO NORTE DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER.....	87
6.1. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS EN SAM	88
6.1.1. Configuración simulador SAM	89
6.2. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	96
6.2.1. Valor presente neto (VPN):.....	97
6.2.2. Factores determinantes en el costo del proyecto	100
6.2.3. Proyección de producción e ingresos	101
6.2.4. Tasa Interna de Retorno (TIR).....	102
7. CONCLUSIONES	105
8. RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA	109

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de flujo continuo de aire U a través de un área determinada en un lapso.....	27
Figura 2. Capacidad de energía eólica global y adiciones anuales entre los años 2014 y 2023.	30
Figura 3. Top 10 países en capacidad de energía eólica añadida en el año 2023.....	31
Figura 4. Principales proveedores de turbinas eólicas en 2023	33
Figura 5. Metodología para el análisis del potencial de energía eólica	38
Figura 6. Anemómetro de cazoletas.....	41
Figura 7. Anemómetro de hélice	42
Figura 8. Anemómetro de hilo caliente	43
Figura 9. Interfaz de SAM.....	47
Figura 10. Modelo de turbina eólica en OpenFAST	51
Figura 11. Mapa de elevación de la Provincia de Soto Norte.....	68
Figura 12. Mapa Hídrico de la Provincia Soto Norte	69
Figura 13. Mapa de uso y cobertura de suelo de la Provincia Soto Norte.....	71
Figura 14. Mapa de Temperatura Máxima de la Provincia Soto Norte.....	73
Figura 15. Mapa de Velocidad y Dirección del Viento de la Provincia Soto Norte.....	75
Figura 16. Mapa Rugosidad provincia Soto Norte.....	76
Figura 17. Mapa de elevación de la provincia Soto Norte	78
Figura 18. Mapa de áreas Optimas de Proyectos eólicos	80
Figura 19. Datos histórica Vetás, Santander. Velocidad del viento vs Tiempo	82
Figura 20. Rosa de los vientos de Vetás, Santander.	82
Figura 21. Datos histórica Charta, Santander. Velocidad del viento vs Tiempo	83
Figura 22. Rosa de los vientos de Charta, Santander.....	84
Figura 23. Datos histórica Tona, Santander. Velocidad del viento vs Tiempo	85
Figura 24. Rosa de los vientos, Tona, Santander	86

Figura 25. Selección de área óptima para parque eólico	89
Figura 26. Inicio simulador SAM.....	90
Figura 27. Selección de modelo a simular	90
Figura 28. Selección de modelo de financiamiento	91
Figura 29. Ingreso de datos Software SAM.....	92
Figura 30. Curva de potencia de la turbina “GE 2.5xl” en SAM.....	93
Figura 31. Distribución espacial de las turbinas en el parque eólico modelado.	94
Figura 32. Rosa de los vientos Vetas, Santander	95
Figura 33. Mapa de calor de Velocidades del viento	96
Figura 34. Análisis del proyecto económico de energía	98
Figura 35. Ingreso de datos costos de capital SAM	99

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparativo de instrumentos de medición de viento	44
Tabla 2. Comparativo de herramientas y simulación de energía Renovable	55
Tabla 3. Restricciones y criticidades	65
Tabla 4. Estructura de financiamiento	103
Tabla 5. Indicadores Clave	103

GLOSARIO

AEROGENERADOR: dispositivo que convierte la energía del viento en energía eléctrica a través de una turbina eólica.

CAPACIDAD INSTALADA: cantidad total de energía que una planta o sistema de generación es capaz de producir bajo condiciones normales de operación.

EFICIENCIA ENERGÉTICA: capacidad de un sistema para utilizar la menor cantidad de energía posible para realizar una tarea, maximizando el rendimiento y reduciendo el desperdicio energético.

ENERGÍA EÓLICA: energía obtenida a partir del viento, que se transforma en electricidad mediante aerogeneradores.

ENERGÍA RENOVABLE: energía obtenida de fuentes naturales que se reponen de forma continua, como el viento, el sol y el agua.

ESTUDIO DE VIABILIDAD: análisis que determina si un proyecto de energía, como una planta eólica, es viable técnica y económicamente en una determinada ubicación.

LCOE (COSTO NIVELADO DE ENERGÍA): indicador económico que calcula el costo total de generar electricidad por unidad, considerando los costos de inversión, operación y mantenimiento a lo largo del tiempo.

MATRIZ ENERGÉTICA: conjunto de fuentes de energía que un país o región utiliza para generar electricidad, como hidroeléctrica, solar, eólica, entre otras.

POTENCIAL EÓLICO: capacidad de una región para generar energía mediante el aprovechamiento de la energía cinética del viento, determinado por factores como la velocidad del viento y la topografía.

RECURSO EÓLICO: cantidad de energía disponible en el viento en un área específica, basada en la velocidad y consistencia del viento a lo largo del año. **SOSTENIBILIDAD:** concepto que se refiere a la capacidad de satisfacer las necesidades actuales sin agotar los recursos naturales ni dañar el medio ambiente para las generaciones futuras.

TURBINA EÓLICA: máquina que captura la energía del viento y la convierte en electricidad, generalmente mediante un generador conectado a las aspas de la turbina.

VELOCIDAD DEL VIENTO: medida de cuán rápido se mueve el aire, fundamental para determinar el potencial de generación eólica en una zona.

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS CONCEPTUAL DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA EN LA PROVINCIA DE SOTO NORTE EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER*

AUTORES: RONALDO GRANADOS PEÑALOZA, VALENTINA JÁCOME MEZA

PALABRAS CLAVE: ENERGÍA EÓLICA, POTENCIAL ENERGÉTICO, ENERGÍA RENOVABLE, AEROGENERADORES, SOSTENIBILIDAD, EFICIENCIA ENERGÉTICA.

DESCRIPCIÓN: Actualmente, el país avanza hacia la consolidación de las energías renovables, con especial énfasis en la energía eólica, que se perfila como una de las alternativas más viables para diversificar la matriz energética y contribuir a la sostenibilidad ambiental. En este contexto, esta investigación recopila y analiza diversas metodologías utilizadas para determinar el potencial de energía eólica, evaluando sus ventajas y desventajas con el fin de seleccionar la más adecuada para la provincia de Soto Norte en el departamento de Santander. Teniendo en cuenta este objetivo, se lleva a cabo una recopilación detallada de datos geográficos, meteorológicos y ambientales en la zona mencionada anteriormente, considerando factores como la velocidad y dirección del viento, la topografía y las restricciones ambientales. A través del software System Advisor Model (SAM), se realiza una simulación que permite cuantificar teóricamente el potencial eólico de la zona seleccionada, proporcionando una visión integral sobre la viabilidad técnica del recurso. Además, se ha llevado a cabo un análisis financiero detallado para evaluar la rentabilidad del proyecto, incluyendo la estimación de costos de inversión, operación y mantenimiento, así como el cálculo del costo nivelado de energía (LCOE). Este análisis permite determinar la viabilidad económica de la implementación de un parque eólico en la región y su potencial impacto en la transición energética del país.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Petróleos. Director: Erik Giovany Montes Páez. Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos.

ABSTRACT

TITLE: CONCEPTUAL ANALYSIS OF THE POTENTIAL FOR WIND ENERGY GENERATION IN THE PROVINCE OF SOTO NORTE IN THE DEPARTMENT OF SANTANDER

AUTHOR: RONALDO GRANADOS PEÑALOZA, VALENTINA JÁCOME MEZA

KEY WORDS: Wind Energy, Energy Potential, Renewable Energy, Wind Turbines, Sustainability, Energy Efficiency.

DESCRIPTION: Currently, the country is moving towards the consolidation of renewable energies, with special emphasis on wind energy, which is emerging as one of the most viable alternatives to diversify the energy matrix and contribute to environmental sustainability. In this context, this research compiles and analyzes various methodologies used to determine the wind energy potential, evaluating its advantages and disadvantages in order to select the most appropriate for the province of Soto Norte in the department of Santander. With this objective in mind, a detailed compilation of geographic, meteorological and environmental data is carried out in the aforementioned area, considering factors such as wind speed and direction, topography and environmental restrictions. Through the System Advisor Model (SAM) software, a simulation is carried out to theoretically quantify the wind potential of the selected area, providing a comprehensive view of the technical feasibility of the resource. In addition, a detailed financial analysis has been carried out to evaluate the profitability of the project, including the estimation of investment, operation and maintenance costs, as well as the calculation of the levelized cost of energy (LCOE). This analysis allows us to determine the economic feasibility of implementing a wind farm in the region and its potential impact on the country's energy transition

*Degree work

**School of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Petroleum Engineering. Director: Erik Giovany Montes Páez. Master in Hydrocarbon Engineering.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado, titulado "Análisis conceptual del potencial de generación de energía eólica en la Provincia de Soto Norte en el Departamento de Santander", surge como una respuesta a la necesidad creciente de diversificar la matriz energética de Colombia mediante el uso de fuentes renovables. En el contexto de la transición energética global y la lucha contra el cambio climático, las energías limpias como la solar y la eólica han ganado protagonismo por su bajo impacto ambiental y su madurez tecnológica. Esta investigación forma parte de las iniciativas desarrolladas por el grupo de investigación GALILEO y el proyecto INERCIA, contribuyendo a la construcción de un inventario nacional de recursos energéticos renovables y proponiendo una evaluación técnica, ambiental y económica de la viabilidad eólica en una región estratégica como lo es Soto Norte.

El primer capítulo, titulado Generalidades, ofrece un marco conceptual sobre la energía eólica. Se abordan los principios básicos de funcionamiento, los tipos de aerogeneradores, así como las ventajas y desventajas de esta fuente de energía. Además, se presenta un panorama general sobre su implementación a nivel mundial y su papel dentro del desarrollo sostenible. En el segundo capítulo, Metodología, se describe el enfoque investigativo adoptado, el cual es de tipo descriptivo. Este capítulo detalla los procedimientos seguidos para analizar las características ambientales, climáticas y geográficas de la región, así como los métodos empleados para garantizar la rigurosidad del estudio.

El tercer capítulo, Identificación de las metodologías para la determinación del potencial de energía eólica, se enfoca en una revisión bibliográfica exhaustiva para evaluar diversas metodologías de análisis. Se comparan alternativas según su aplicabilidad, precisión y eficiencia, y se selecciona la más adecuada para el caso de estudio, sentando las bases para el cálculo del potencial eólico. El cuarto capítulo, Recopilación de datos geográficos, meteorológicos y ambientales, presenta la información recolectada sobre la región de Soto Norte. Este capítulo analiza aspectos como la

velocidad del viento, la topografía y las restricciones ambientales, los cuales son esenciales para modelar el potencial técnico de generación de energía eólica. En el quinto y último capítulo, Cuantificación teórica del potencial de generación de energía eólica, se lleva a cabo el cálculo del potencial de generación en la región utilizando el software SAM (System Advisor Model).

Se incluyen simulaciones detalladas, análisis de sensibilidad y una evaluación financiera basada en indicadores clave como el LCOE, el VPN y la TIR, con el fin de establecer la viabilidad económica del proyecto. Finalmente, se concluye que, a pesar de que la región presenta ciertas condiciones geográficas favorables, la baja velocidad del viento, las restricciones ambientales y los altos costos de inversión limitan la viabilidad del proyecto. Se recomienda mejorar la calidad de los datos climáticos, incentivar el apoyo gubernamental y considerar regiones con condiciones más óptimas para futuros desarrollos.

Este trabajo, aunque evidencia la inviabilidad del proyecto en Soto Norte, constituye un aporte valioso al conocimiento nacional sobre energías renovables y puede servir como guía para estudios similares en otras regiones del país.

1. OBJETIVOS

Para el desarrollo del presente trabajo de grado se propone un objetivo general con la intención de esclarecer la principal intención del trabajo de grado. Asimismo, se establecen dos objetivos específicos que desglosan temas asociados directamente al propósito principal.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar de forma conceptual el potencial de generación de energía eólica en la provincia de Soto Norte en el departamento de Santander.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Analizar las metodologías disponibles para la determinación del potencial de energía eólica, teniendo en cuenta sus ventajas y desventajas para ser aplicadas en el contexto colombiano.
- ✓ Recopilar datos geográficos, meteorológicos y ambientales que permitan calcular el potencial de energía eólica en la Provincia Soto Norte del Departamento de Santander.
- ✓ Cuantificar teóricamente el potencial de recursos disponibles para la generación de energía eólica en la Provincia Soto Norte del Departamento de Santander.

2. GENERALIDADES

La transición energética es sin duda la representación del cambio tecnológico que se da a partir de una nueva revolución industrial, cambio que viene tanto tecnológicamente como humanamente. Si bien somos conscientes de los cambios ambientales de nuestra época, que poco a poco van empeorando, debemos tener en cuenta que a medida que crezcamos como sociedad tecnológica el abastecimiento de energía que necesitaremos para poder seguir avanzando será mayor, esa tendencia no ha disminuido ni disminuirá mientras crezcamos como sociedad.

En todo el mundo este hecho se presenta, sin embargo, no todos los países pueden realizar una transición a energía cien por ciento renovables, por eso, ¿Es necesaria una transición energética completa en Colombia? El plan de desarrollo para incorporar estas tecnologías es algo que también hay que tener en cuenta.

2.1. TECNOLOGÍA EÓLICA

La energía eólica se basa en aprovechar la energía cinética del viento para generar electricidad a través de aerogeneradores. Esta tecnología ha evolucionado de manera significativa en las últimas décadas, y existen diferentes tipos y configuraciones de tecnologías eólicas que se pueden emplear dependiendo del entorno geográfico y las necesidades energéticas de cada proyecto. En el ámbito de las energías renovables, la energía eólica ha emergido como una de las más prometedoras debido a su capacidad para generar electricidad a gran escala sin emitir gases de efecto invernadero.

Las tecnologías eólicas se dividen principalmente en dos categorías: Onshore (en tierra) la cual ha dominado en el mercado global debido a su menor costo de instalación y accesibilidad. Por otra parte, Offshore (en el mar) ha tenido relevancia especialmente en Europa y Asia, donde se busca aprovechar los vientos más fuertes. De acuerdo con Sorensen, "las instalaciones onshore tienden a ser más económicas en cuanto a su construcción y mantenimiento, ya que el acceso es más sencillo y no implica los retos

que plantea un entorno marítimo. Sin embargo, las turbinas offshore ofrecen la ventaja de aprovechar vientos más fuertes y constantes, lo que permite una mayor producción energética por unidad instalada"¹. Al respecto, el Global Wind Energy Council (GWEC), "en 2023, la energía eólica offshore representó un 10% de la capacidad instalada mundial, pero su crecimiento es más rápido que el de las instalaciones onshore, debido a la mayor disponibilidad de espacio y al potencial energético en alta mar"². Ambas tecnologías tienen un rol clave en la transición hacia una matriz energética más limpia y diversificada, lo que convierte a la energía eólica en una solución viable para mitigar el cambio climático a nivel global.

2.1.1. Tipos de tecnologías eólicas

En el mundo existen múltiples tipos de aerogeneradores los cuales se clasifican de acuerdo con su eje de rotación; principalmente se encuentran en dos tipos: de eje horizontal o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) y de eje vertical o VAWT (Vertical Axis Wind Turbines).

2.1.1.1. Aerogeneradores de eje horizontal

Estos aerogeneradores son muy habituales en parques eólicos alrededor del mundo y son ampliamente utilizados con fines comerciales. Este tipo de tecnologías se distinguen por tener el rotor ubicado sobre un eje horizontal que se encuentra perpendicular a la dirección del viento. Suelen ser instaladas a alturas que oscilan entre los 60 y 120 metros, donde la velocidad del viento se mantiene de manera constante.

¹ Sorensen, B. (2017). Renewable energy: Physics, engineering, environmental impacts, economics and planning (5a ed.). Academic Press.

² Alex. (2024, 17 abril). Global Wind Report 2024. Global Wind Energy Council. <https://gwec.net/globalwind-report-2024/>. Consultado el 5 de octubre de 2024.

Dentro de esta categoría se encuentran los aerogeneradores en tierra firme, conocidos como onshore, así como los aerogeneradores en alta mar, denominados offshore; estos son instalados en alta mar donde los vientos son más constantes y con mayor potencial energético. Los aerogeneradores de eje horizontal de pequeña escala pueden generar una potencia hasta de 100 kW y son utilizados comúnmente en residencias o áreas comerciales. Por otra parte, los aerogeneradores a gran escala abarcan una potencia hasta de más o menos 12 MW y están diseñados especialmente para parques eólicos comerciales.

Actualmente, el enfoque principal es hacia los aerogeneradores de gran escala, ya que, al ser más eficientes, reducen el costo por megavatio producido. Además, el material por el cual está compuesto es de fibra de carbono y vidrio lo que hace que tienda a ser más ligero, teniendo una mayor eficiencia aerodinámica y minimizando el desgaste estructural.

- **Ventajas** Dentro de las ventajas de estos aerogeneradores, se encuentra la capacidad y eficiencia de generación debido al tamaño de las turbinas y la altura a la que son instaladas. De igual forma, cuentan con una amplia experiencia operativa y comercial a nivel global, teniendo un mayor avance tecnológico.
- **Desventajas** Debido a su tamaño requieren superficies amplias para su instalación, principalmente para parques Onshore. Además, la instalación y mantenimiento de este tipo de aerogeneradores tiende a ser más costoso debido a su tamaño.

2.1.1.2. Aerogeneradores de eje vertical

Este tipo de aerogeneradores presenta el eje de rotación en posición vertical y no es necesario que este orientado en dirección al viento, facilitando su operación en lugares donde el viento cambia de dirección frecuentemente. Al contrario de los

aerogeneradores horizontales, los verticales son menos comunes a gran escala ya que su rendimiento es menor y generalmente son utilizados en áreas pequeñas como en áreas urbanas.

Principalmente, se tienen dos tipos de aerogeneradores verticales: Los aerogeneradores Darrieus que presentan forma de hélice y su diseño aerodinámico les permite alcanzar altas velocidades de rotación. Sin embargo, requieren de un motor para arrancar y generar electricidad debido a la baja eficiencia del arranque. Por otra parte, están los aerogeneradores Savonius que son ideales en entornos con velocidad de viento baja, si bien, son menos eficientes y su diseño sencillo los hace más robustos y son más fáciles de mantener.

- Ventajas Este tipo de aerogeneradores suelen funcionar bien en áreas donde la dirección del viento es variable y su instalación y mantenimiento es más práctica, ya que se pueden instalar en áreas que presenten menor altura.
- Desventajas La eficiencia de este tipo de aerogeneradores es menor en comparación con los de eje horizontal y debido a su tamaño reducido implica una menor capacidad de generación, por lo tanto, no son utilizados en proyectos a gran escala.
- Ventajas y desventajas de tecnologías eólicas:

Al igual que las demás fuentes de energías renovables, la energía eólica presenta una serie de ventajas y desventajas que es de suma importancia. “La energía eólica no contamina, es inagotable y frena el agotamiento de combustibles fósiles contribuyendo a evitar el cambio climático”³.

Este tipo de energía no genera gases de efecto invernadero ni otros contaminantes atmosféricos, lo que es muy bien visto desde la parte ambiental, siendo una de las

³ MORENO, J. et al. Análisis del recurso eólico en regiones montañosas de Colombia. Energías Renovables y Sostenibles, [En línea], 2022. Disponible en: Redalyc.

tecnologías más maduras y accesibles en el mercado. Siendo una opción viable para muchos países en desarrollo que buscan expandir su capacidad energética sin aumentar las emisiones de carbono.

Sin embargo, la generación de energía eólica depende de muchos factores como la disponibilidad y velocidad del viento, lo que implica que existan variaciones en la producción de la electricidad, por lo tanto, es necesario la implementación de sistemas de almacenamiento de energía como baterías o redes inteligentes para poder gestionar la intermitencia y asegurar el suministro eléctrico sin interrupciones.

Además, se debe tener en cuenta la instalación y mantenimiento de un parque eólico en áreas aisladas o de difícil acceso ya que pueden ser un desafío, incrementando significativamente los costos de inversión del proyecto.

2.1.2. Componentes de un parque eólico onshore

Los parques eólicos onshore están compuestos por diferentes elementos que están diseñados para captar la energía del viento y convertirla en electricidad de manera eficiente. El aerogenerador es el elemento principal y está conformado por:

- Rotor: Este está conformado por palas que captan el WPD del viento de la zona y lo convierten en energía cinética y gracias a su diseño aerodinámico es posible maximizar la eficiencia de conversión de la energía del viento.
- Nacelle: Este elemento es el compartimiento donde están ubicados los diferentes componentes mecánicos del aerogenerador, dentro de ellos se tiene el generador y la caja de cambios.
- Palas: tradicionalmente, son de material de fibra de vidrio reforzada con polímeros, sin embargo, con el avance de la tecnología se ha venido migrando a materiales más compuesto como la fibra de carbono que tiende a ser más ligero y presenta mayor resistencia a la fatiga mecánica.
- Torre: La torre es capaz de soportar el aerogenerador y elevar el rotor a la altura necesaria para captar de manera eficiente los vientos más fuertes y estables de

la zona. Comúnmente, el material de la torre está compuesto de acero o de hormigón y su altura varía entre los 60 y 120 metros. Según Manwell et al., "la evolución de los componentes de los parques eólicos ha permitido una mayor eficiencia en la conversión de energía, aumentando la altura de las torres y el tamaño de las palas, lo que a su vez incrementa la capacidad de generación de las turbinas"⁴.

2.2. PRINCIPIOS DE LA ENERGÍA EÓLICA

Principalmente, hay que tener en cuenta la diferencia de tres conceptos fundamentales: el viento, la energía eólica y el potencial en la energía. Conceptualmente el viento se define como el movimiento del aire en la atmósfera terrestre, generado por algunas diferencias de presión que existen debido a las variaciones de temperatura que hay en la superficie del planeta. Por otra parte, la velocidad que este posee define su fuerza y está directamente correlacionada con la cantidad de energía que existe en el viento, la cual es conocida comúnmente como energía cinética. Es válido resaltar que la velocidad mencionada, varía dependiendo de la ubicación geográfica y las condiciones ambientales de la zona, como los tipos de rocas, condiciones de agua y humedad, la vegetación, entre otros⁵.

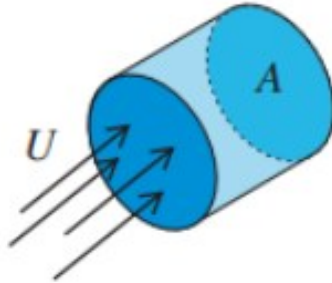
Para aprovechar al máximo esta gran fuente de energía es indispensable disponer de una fuente regular de los mismos, teniendo en cuenta también su masa y la velocidad del aire. La energía eólica consiste en la cantidad de movimiento que se puede aprovechar a partir del desplazamiento del aire para después transformarse en electricidad. Por otra parte, el potencial es la variación de dicha energía en el tiempo, en un área específica de interés. Una manera de representar este potencial energético es

⁴ J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers. (2010). WIND ENERGY EXPLAINED Theory, Design and Application Second Edition. Wiley-VCH.

⁵ LETCHER, TREVOR. Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. Academic Press, Elsevier. 2017.

tomar como referencia un área A , a través de la cual fluye un volumen U durante un intervalo de tiempo dt .

Figura 1. Esquema de flujo continuo de aire U a través de un área determinada en un lapso



Fuente: Tomado de LETCHER, TREVOR. Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. 2017.

De la figura 1 se observa que el flujo másico está representado por la siguiente expresión donde ρ es la densidad, el área A y la velocidad de flujo U :

$$\frac{dm}{dt} = \rho * A * U \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que la energía eólica es la energía cinética obtenible del viento, es posible definirla de la siguiente manera:

$$E_c = \frac{1}{2} * m * U^2 \quad (2)$$

Derivando la anterior ecuación respecto a la masa e igualándola con la primera, se obtiene una expresión general para calcular el potencial generado por el viento:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * U^3 \quad (3)$$

En conclusión, es posible definir un término que cuantifique el potencial por unidad de área, denominado densidad del potencial eólico o (WPD, por sus siglas en inglés), el cual es clave para analizar la viabilidad de proyectos relacionados con esta energía.

$$WPD = \frac{1}{2} * \rho * U^3 \quad (4)$$

La anterior fórmula resalta la importancia de la velocidad del viento en el sistema, mostrando un comportamiento potencial cúbico, el cual ante cualquier alteración en estas velocidades ocasionará cambios significativos en los datos que se utilizarán para evaluar la viabilidad de un proyecto. Dentro de esta fórmula, la densidad del aire varía dependiendo de la presión, temperatura y humedad de la zona, cuyas fluctuaciones no son significativas en el impacto del cálculo del recurso energético⁶, por otra parte, para modelar el comportamiento del flujo eólico U y su varianza, se tiene en cuenta los parámetros estadísticos de Weibull, los cuales también dependen del número de datos que sean tomados para dicho análisis, utilizándose para esto el método de máxima similitud (ML method, por sus siglas en inglés)⁷.

⁶ CHADEE, X. T., & CLARKE, R. M. Large-scale wind energy potential of the caribbean region using near-surface reanalysis. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier, febrero de 2014. vol. 30.

⁷ Ibid.

2.3. PANORAMA GLOBAL ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA

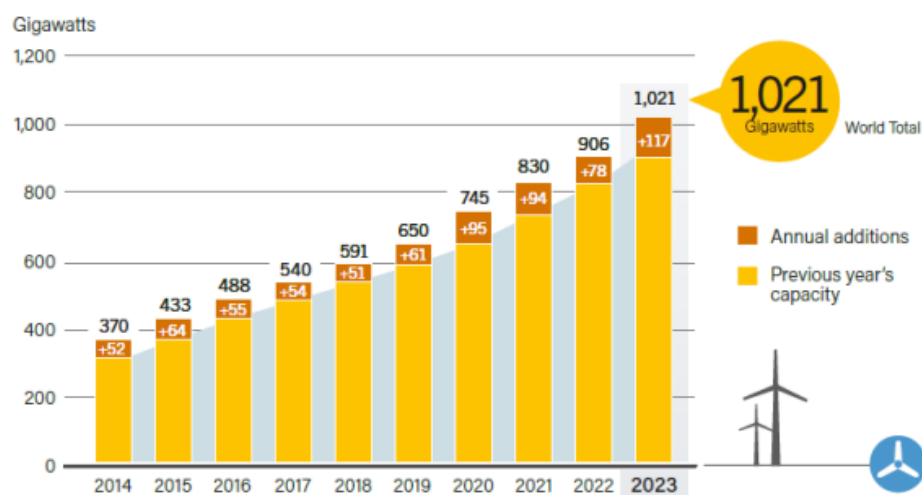
En los últimos años la energía eólica ha tenido un crecimiento exponencial comparado con otros tipos de energías. Según el último reporte de REN21⁸, en 2023 se agregó una capacidad récord de energía eólica de 117 GW a las redes mundiales, lo que elevó el total operativo en más de un 12,8%, alcanzando aproximadamente 1021 GW (figura 2), liderado principalmente por China, Estados Unidos, Brasil, Alemania e India. Más de 130 países se comprometieron a triplicar su capacidad de energía renovable para 2030, motivados por la necesidad de combatir el cambio climático, garantizar la seguridad energética de cada nación, impulsar el desarrollo económico y aprovechar la competitividad de costos de esta fuente de energía.

A pesar de los grandes esfuerzos realizados por los diferentes países, los altos precios de las materias primas, las tarifas de envío y la inflación, han sido un gran problema para el desarrollo de nuevos proyectos eólicos ya que han aumentado de forma significativa los precios de las turbinas y los costos de estos. Durante el 2023 esta “barrera” se hizo más grande debido a que la mayor parte de la inversión se realiza por adelantado, lo que, en consecuencia, hace que se frenen las nuevas instalaciones en algunos países de Europa y en Estados Unidos.

Debido a esto, la Unión Europea tomó medidas para acelerar las instalaciones y fortalecer la competitividad de la industria de fabricación de turbinas de la región.

⁸ REN21. Renewables 2021 Global Status Report. 2024. p. 80.

Figura 2. Capacidad de energía eólica global y adiciones anuales entre los años 2014 y 2023.



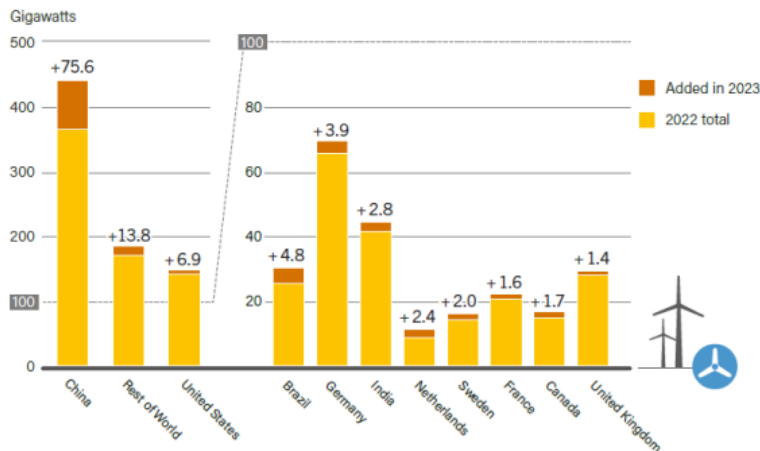
Fuente: REN21. Renewables 2021 Global Status Report. 2024. p. 81.

China por su parte, amplió su gran capacidad eólica (tanto onshore como offshore), instalando el doble de turbinas que el año anterior, solamente este país representó el 65% del mercado mundial, frente al 48,5% en 2022, dejando muy por detrás a los demás países en la generación de este recurso.

Estados Unidos ocupó un distante segundo lugar, con una ventaja significativa sobre Brasil, Alemania e India.

En conjunto, estas cinco naciones representan actualmente algo más del 80% de las instalaciones anuales, siendo Estados Unidos y China los responsables de más del 70%. Dentro del top 10 también se encuentran países como Suecia, Países Bajos, Canadá y el Reino Unido (ver figura 2).

Figura 3. Top 10 países en capacidad de energía eólica añadida en el año 2023



Fuente: REN21. Renewables 2021 Global Status Report. 2024. p. 82

2.4. ACTUALIDAD DE LA INDUSTRIA EÓLICA

En los últimos años se han estado vinculando nuevos participantes en el sector de la energía eólica, lo que ha provocado que el costo de la electricidad para estos proyectos disminuya considerablemente un 56% entre el 2010 y el 2020, pasando de 0.089 USD/kWh a 0.039 USD/kWh.

De acuerdo con una estimación, en el primer semestre de 2021, el costo nivelado de energía (LCOE) para la energía eólica terrestre fue de USD 41 por MWh y de USD 79 por MWh en alta mar.

En ese orden de ideas, la disminución de los costos se debe a diversos factores, como el desarrollo de turbinas más eficientes y de mayor potencia, capaces de captar más energía del viento, y las economías de escala alcanzadas en proyectos de mayor

envergadura, que disminuyen los costos asociados a la instalación, operación y el mantenimiento por unidad de este.

En el año 2023, los cinco mayores fabricantes de turbinas fueron Goldwind (China), Envision (China), Vestas (Dinamarca), Windey (China), Mingyang (China), con un total combinado de más de 155 MW en instalaciones. Goldwind se convirtió en el principal proveedor de turbinas en el mundo, en cambio, Envision ascendió tres posiciones para ocupar el segundo lugar. Vestas cayó dos posiciones hasta el tercer lugar comparándolo con el 2022, Windey y Mingyang ocupan el cuarto y quinto lugar, siendo el último mencionado, el mayor fabricante de turbinas eólicas marinas del mundo en el último año.

Desde 2021, la intensa competencia de los precios de los distribuidores en China ha motivado a los fabricantes locales de turbinas a expandirse hacia los mercados internacionales, sin embargo, en 2023, el 97% de los proyectos de estos proveedores se realizaron en su territorio nacional. En contraste, en Europa, los principales actores del sector eólico fueron Vestas, Siemens Gamesa, Nordex Group, GE Vernova y Enercon. Los fabricantes chinos apenas alcanzaron una instalación total de 194,1 MW en Europa, de los cuales solo 8,4 MW se instalaron en países de la UE27.

En la figura 4, se muestran los principales proveedores de turbinas eólicas en 2023, destacando el liderazgo de Goldwind y Envision, impulsados por el crecimiento en China. Empresas como Vestas, Siemens Gamesa y GE Vernova tienen una presencia más diversificada en mercados occidentales. El predominio de fabricantes chinos refleja su creciente competitividad en la industria eólica global. En general, se refleja cómo el mercado de turbinas eólicas sigue evolucionando, con China consolidando su liderazgo en la fabricación y con los proveedores occidentales adaptándose a la competencia y la demanda en distintas regiones.

Figura 4. Principales proveedores de turbinas eólicas en 2023



Fuente: GWEC releases Global Wind Turbine Supplier Ranking. 2023. Disponible en <https://gwec.net/wind-turbine-manufacturers-see-record-year-driven-by-growth-in-homemarkets/>

Para concluir este capítulo, es importante resaltar, como la energía eólica ha demostrado ser una de las fuentes renovables más prometedoras gracias a su capacidad de generar electricidad sin emisiones contaminantes y con un recurso inagotable como lo es el viento.

Su evolución ha marcado avances tecnológicos que han mejorado la eficiencia de los aerogeneradores y optimizando el aprovechamiento de la energía cinética del viento y su conversión en energía mecánica y posteriormente en electricidad. Con una industria en constante innovación, la energía eólica se proyecta como un pilar clave en la transición hacia un modelo energético más sostenible.

3. METODOLOGÍA

Tomando en cuenta lo mencionado por Hernández et al. (2016)⁹, el principal objetivo de la investigación descriptiva es analizar y describir con detalle las propiedades y características de distintos fenómenos grupos o procesos. Este enfoque no se limita a la recopilación de datos, sino que también incluye su análisis para detectar patrones y tendencias. En este trabajo, permitió identificar las condiciones ambientales, climáticas y geográficas de la región, facilitando una comprensión más clara del entorno y estableciendo una base sólida para evaluar el potencial de la energía eólica y su aprovechamiento eficiente de esta misma fuente de energía renovable.

Por otro lado, el enfoque mixto, descrito por Hernández & Torres (2020)¹⁰, integra métodos cuantitativos y cualitativos en una investigación, permitiendo aprovechar las ventajas de ambos. A través de este método, fue posible analizar información numérica relacionada con las tendencias climáticas y las velocidades registradas del viento, junto con información cualitativa obtenida de fuentes documentales, lo que aportó un entendimiento más profundo y contextual sobre cómo implementar la energía eólica en la región.

Finalmente, el método deductivo, tal como lo explican Hernández & Torres (2020)¹¹, parte de principios generales para derivar conclusiones aplicadas a casos particulares. Esta metodología estructuró el análisis de la energía eólica en la provincia de Soto Norte al utilizar teorías y datos globales sobre tecnologías eólicas y modelos económicos, asegurando que los resultados fueran sólidos y aplicables al contexto local.

⁹ Ibid., p. 203.

¹⁰ GUAJARDO CANTÚ, Gerardo y ANDRADE DE GUAJARDO, Nora E. Contabilidad para no contadores [en línea]. 2 ed. México: McGraw-Hill Interamericana. 2012, 425 p. [Consultado el 6 de diciembre de 2016]. Disponible en: Base de datos McGraw Hill. <http://ezproxy.uao.edu.co:2061/book.aspx?i=372>

¹¹ Ibid., p.248

Esta investigación toma como punto de partida un análisis del potencial de generación de energía eólica en la provincia de Soto Norte, ubicada en el departamento de Santander, Colombia. La región, situada en la cordillera Oriental, se caracteriza por una combinación de factores climáticos, geográficos y topográficos que la posicionan como un área prometedora para el aprovechamiento de fuentes de energía renovable, en particular la eólica.

En el contexto global actual, donde la transición energética hacia fuentes sostenibles es usada para mitigar los efectos del cambio climático, se busca contribuir a la identificación de alternativas que promuevan el desarrollo económico y social de las comunidades locales, al tiempo que se alinean con las metas de sostenibilidad nacional e internacional. Soto Norte, con su formación ambiental y condiciones meteorológicas, presenta un caso de estudio para encontrar la capacidad del territorio en términos de generación energética sostenible.

El desarrollo se basa en la recopilación y análisis de datos geográficos, meteorológicos y ambientales, los cuales son integrados mediante el uso de herramientas tecnológicas como sistemas de información geográfica (SIG) y modelos de simulación de viento. Lo que permite establecer un diagnóstico integral que no solo identifica las áreas con mayor potencial eólico, sino que también evalúa las posibles implicaciones técnicas, económicas y sociales de implementar proyectos basados en aerogeneradores.

Se analizan aspectos como la velocidad y dirección del viento, las corrientes predominantes, la altitud y la estabilidad atmosférica, que influyen directamente en el rendimiento de los aerogeneradores. Desde una perspectiva económica, el estudio también contiene los costos iniciales de instalación, las proyecciones de generación energética y el posible retorno de la inversión, considerando incentivos y políticas gubernamentales para energías renovables.

En cuanto al impacto social, se abarca la importancia de cómo estos proyectos podrían beneficiar a las comunidades locales mediante la creación de empleo, el fortalecimiento de la infraestructura y el acceso a energía sostenible, así como los obstáculos que

podrían surgir en términos de aceptación y adaptación comunitaria, buscando establecer la viabilidad de la energía eólica en Soto Norte, y también implementar estrategias que optimicen dichas actividades Junto con recomendaciones sobre ubicación estratégica de aerogeneradores, mecanismos de financiación y modelos de gestión que involucren a las comunidades locales en el proceso de desarrollo y operación de los proyectos.

- **Etapas 1. Identificar las metodologías disponibles para la determinación del potencial de energía eólica.**

Actividad 1. Mediante una revisión bibliográfica en diferentes fuentes se realiza una recopilación de la información sobre las metodologías disponibles para la obtención de energía eólica.

Actividad 2. Se realiza un análisis de la información de cada una de las metodologías que se reunieron teniendo en cuenta las ventajas y desventajas.

Actividad 3. Se lleva a cabo la selección de la metodología más adecuada para determinar el potencial de energía eólica, basándose en el análisis de la información recopilada.

- **Etapas 2. Recopilar datos geográficos, meteorológicos y ambientales que permitan calcular el potencial de energía eólica en la Provincia Soto Norte del Departamento de Santander**

Actividad 1. se Identifican los posibles lugares de implementación de parques eólicos en los municipios del área de estudio.

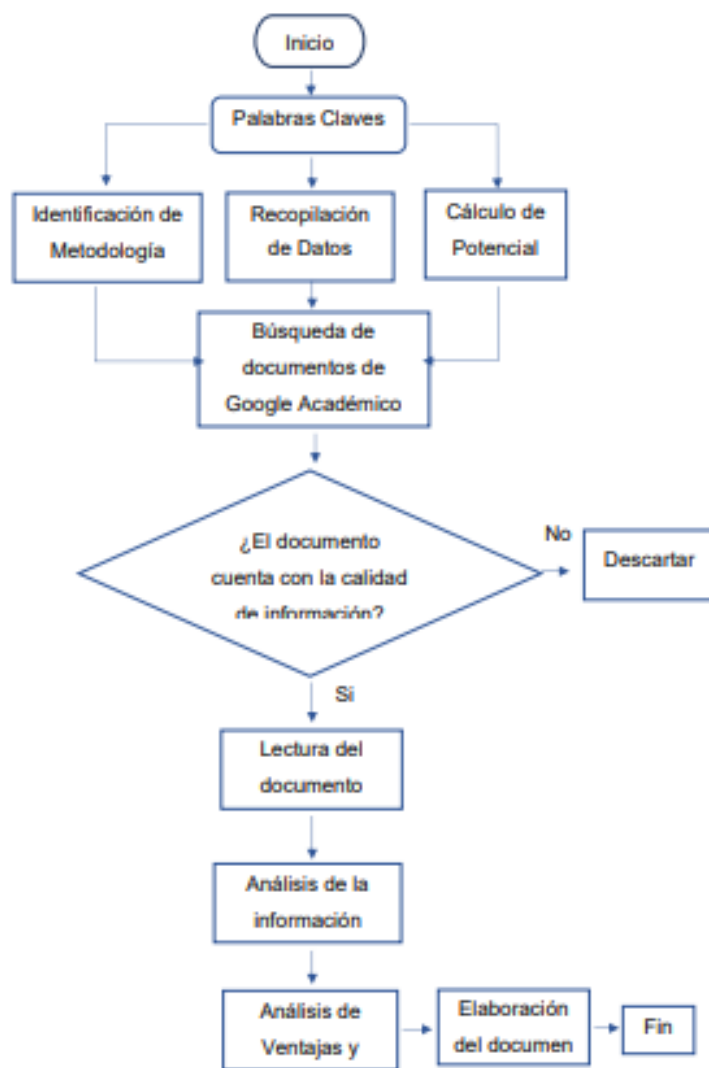
Actividad 2. Se realiza la recopilación de la información necesaria para el cálculo de los potenciales de energía eólica en los municipios de la Provincia Soto Norte del Departamento de Santander a partir de bases de datos especializadas.

- Etapa 3. Cuantificar teóricamente el potencial de recursos disponibles para la generación de energía eólica en la Provincia Soto Norte del Departamento de Santander.

Actividad 1. Se realiza una verificación de la calidad y confiabilidad de los datos contrastando valores de diferentes fuentes.

Actividad 2. Se realiza el cálculo del potencial de energía eólica usando las metodologías seleccionadas en la primera etapa del proyecto.

Figura 5. Metodología para el análisis del potencial de energía eólica



Fuente: Elaboración propia

4. IDENTIFICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA EÓLICA.

Para llevar a cabo la primera etapa del proyecto, se inicia con una exhaustiva revisión bibliográfica utilizando diversas herramientas y fuentes de información confiables, tales como Google Académico y bases de datos especializadas de diferentes bibliotecas, con el objetivo de recopilar información actualizada y relevante sobre las metodologías existentes para la obtención de energía eólica.

Este proceso implica no solo la identificación de fuentes primarias y secundarias, sino también la organización y sistematización de los datos para garantizar un enfoque riguroso en el análisis.

Posteriormente, se realiza un análisis detallado de la información recopilada, evaluando cada metodología en términos de sus características técnicas, ventajas, desventajas, complejidad de implementación y contexto de aplicación, lo que permite una comprensión integral de las distintas alternativas disponibles.

Con base en este análisis exhaustivo, se procede a seleccionar la metodología que resulte más adecuada para la determinación del potencial de generación de energía eólica, considerando criterios de precisión, aplicabilidad, eficiencia y alineación con los objetivos del proyecto, asegurando así una base sólida para las etapas posteriores.

4.1. MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA EÓLICA

La evaluación del potencial eólico implica el uso de metodologías interdisciplinarias que son herramientas analíticas, modelos matemáticos y sistemas de información geográfica (GIS). Metodologías que permiten analizar las características del viento, la interacción con el terreno y los impactos ambientales y sociales.

4.1.1. Instrumentos

La velocidad del viento es relativa, por lo tanto, es necesario utilizar un instrumento llamado “Anemómetro” el cual es imprescindible para calcular un campo de corriente en conducto de aire.

Este tipo de instrumentos se utilizan en diferentes campos de aplicación como lo son el control de campos de corriente en instalaciones técnicas, la determinación de la velocidad del aire en instalaciones de energía eólica, control de sistemas de climatización, entre otras.

4.1.1.1. Mediciones con Anemómetros

Los anemómetros son instrumentos esenciales para medir directamente la velocidad y dirección del viento a diferentes alturas, instalados generalmente en torres meteorológicas. Estos equipos permiten la recolección de datos precisos que reflejan las condiciones locales.

4.1.1.2. Anemómetro de Rotación

El anemómetro de rotación está compuesto de cazoletas o hélices unidas en un eje cuyo giro proporcional a la velocidad del viento, es registrado convenientemente; en los anemómetros magnéticos, este giro activa un diminuto generador eléctrico que facilita una medida precisa.

4.1.1.3. Anemómetro de cazoletas

El anemómetro de cazoletas consiste en tres o cuatro cazoletas montadas simétricamente alrededor de un eje vertical. Debido a que la fuerza que ejerce el aire en el lado cóncavo es mayor que en el lado convexo, la rueda de cazoletas gira. La velocidad de rotación es proporcional a la velocidad del viento.

Dicha rotación puede medirse de varios modos: contando mecánicamente el número de revoluciones, conectando el eje de la rueda de cazoletas a un pequeño generador

eléctrico y midiendo el voltaje instantáneo, o a un interruptor opto-eléctrico y midiendo su salida¹².

Figura 6. Anemómetro de cazoletas



Fuente: Sensovant Smart Sensing. 2022. Disponible en:
<https://sensovant.com/productos/meteorologia/sensores-viento-mecanicos/anemometrode-cazoletas/>

4.1.1.4. Anemómetro de hélice

El anemómetro de hélice se utiliza cuando se quiere conocer la velocidad del viento en una dirección particular. Normalmente se coloca un conjunto de dos o tres anemómetros de hélice en planos perpendiculares para obtener las componentes de velocidad sobre los ejes principales (horizontales y vertical)¹³.

¹² PA2 - Anemómetro de Cazoletas - Sensovant. Sensovant [página web]. [Consultado el 2, diciembre, 2024]. Disponible en Internet: <https://sensovant.com/productos/meteorologia/sensores-viento-mecanicos/anemometro-de-cazoletas/>

¹³ 27106-T - Anemómetro de hélice. Disponible en Internet: <https://www.directindustry.es/prod/nrg-systems/product-61562-656729.html>

Figura 7. Anemómetro de hélice



Fuente: NRG Systems. 2021. Disponible en:
<https://www.directindustry.es/prod/nrgsystems/product-61562-656729.html>.

4.1.1.5. Anemómetros de presión

Este tipo de anemómetro registra el viento mediante los efectos de la variación de la presión que actúa cuando hay movimiento del viento. Están enfocados en medir la rafagiosidad mediante galgas extensométricas ajustadas a una esfera perforada, midiendo por medio de esta, la magnitud y dirección del viento.

4.1.1.6. Anemómetros de hilo caliente

Por medio de este anemómetro es posible medir la velocidad a través de enfriamiento del viento, son utilizados principalmente en túneles de viento ya que suelen ser muy delicados¹⁴.

¹⁴ ¿QUÉ MIDEN los anemómetros de hilo caliente? - Industrial Physics [Anónimo]. Industrial Physics [página web]. [Consultado el 20, julio, 2025]. Disponible en Internet:
<https://industrialphysics.com/es/basede-conocimientos/articulos/anemometros-de-hilo-caliente-todo-lo-que-necesita-saber/>

Figura 8. Anemómetro de hilo caliente



Fuente: Valiometro. 2022. Disponible en: <https://www.valiometro.pe/anemometro-dehilo-caliente-center-332/>

4.1.1.7. Anemómetros basados en el efecto sónico

La precisión de estos anemómetros no es suficiente para estimar la producción eólica, su calibración es dificultosa porque dependen de la dirección. Estos sensores son adecuados para la caracterización de las turbulencias, ya que tienen una muy buena velocidad de respuesta y en estos estudios se suele tener la estación de medida junto al aerogenerador en el cual se quiere ver la influencia. En este caso, además del anemómetro sónico al menos se dispondría de un anemómetro convencional¹⁵.

4.1.1.8. Sensores de humedad y temperatura

Complementan los datos eólicos al analizar la influencia climática en el recurso eólico¹⁶.

¹⁵ DJ SHERMAN; C. HOUSER y BASE ACW. Técnicas de medición electrónica para experimentos de campo en geomorfología de procesos. 14a ed. [s.l.]: [s.n.], 2013. 221 p.

¹⁶ MUÑOZ, R., et al. (2019). "Potencial eólico en Colombia: un enfoque regional". Redalyc. Disponible en: www.redalyc.org

4.1.1.9. Drones y Equipos de sensores remotos

Recientes avances tecnológicos permiten el uso de drones equipados con sensores para realizar mediciones adicionales, aunque su uso todavía es limitado¹⁷.

A continuación, en la tabla 1 se presenta una comparativa que resume las principales características de los diferentes tipos de anemómetros y otros instrumentos utilizados para la medición y análisis del viento. Esta comparación destaca su principio de funcionamiento, aplicaciones, ventajas y limitaciones, permitiendo una mejor comprensión de su uso en estudios de energía eólica.

Tabla 1. Comparativo de instrumentos de medición de viento

Instrumento	Funcionamiento	Ventajas	Desventajas
Anemómetro de Cazoletas	Giro de cazoletas por el viento	Fácil de usar, confiable	Respuesta lenta a ráfagas
Anemómetro de Hélice	Giro de hélice en una dirección específica	Medición direccional precisa	No mide turbulencias
Anemómetro de Presión	Registra variación de presión del viento	Detecta ráfagas	Calibración compleja
Anemómetro de Hilo Caliente	Mide enfriamiento del hilo por el viento	Alta sensibilidad	Delicado y frágil
Anemómetro Sónico	Analiza propagación del sonido en el viento	Respuesta rápida, sin partes móviles	Baja precisión energética
Sensores de Humedad y Temperatura	Evalúan condiciones climáticas	Complementan análisis eólico	No miden velocidad del viento
Drones con Sensores	Capturan datos con sensores remotos	Acceso a zonas difíciles	Costos elevados

Fuente: Elaboración propia

¹⁷ GÓMEZ, J., et al. (2020). "Evaluación de herramientas para proyectos eólicos". SciELO. Disponible en: www.scielo.org

4.1.2. Datos Satelitales y Bases Climáticas

Una estación meteorológica es un conjunto de dispositivos tecnológicos que recopilan y monitorean datos sobre diversas variables como la temperatura, la velocidad y dirección del viento, la presión atmosférica, la humedad del aire, la radiación solar y otras condiciones meteorológicas que influyen en los fenómenos atmosféricos y el clima en determinada área de interés.

Existen diferentes estaciones meteorológicas que proporcionan una base de datos que permiten conocer el potencial eólico por medio de la velocidad y dirección del viento, además de la temperatura y la presión atmosférica de una región puntual. Algunas de ellas se enuncian a continuación.

Las bases de datos satelitales, como las proporcionadas por el IDEAM, la NASA y el WINDFINDER, son herramientas clave en la evaluación del potencial eólico. Estas fuentes combinan modelos matemáticos y mediciones remotas para generar estimaciones climáticas de amplias zonas geográficas.

Ventajas

- Cobertura extensa y disponibilidad inmediata¹⁸ y datos históricos que permiten estudios longitudinales¹⁹

Desventajas

- Menor precisión en áreas montañosas o de alta variabilidad topográfica.
- Dependencia de modelos predictivos que pueden presentar errores.

¹⁸ MUÑOZ, R., et al. (2019). "Potencial eólico en Colombia: un enfoque regional". Redalyc. Disponible en: www.redalyc.org

¹⁹ GALILEO, UIS. (2024). "Datos Geográficos y Mapas de Soto Norte". Grupo Galileo, Universidad Industrial de Santander.

4.1.3. Softwares

Estos permiten a todos los profesionales, ingenieros y científicos predecir el comportamiento de diversos fenómenos físicos, evaluar el rendimiento de sistemas energéticos y analizar procesos geoespaciales, entre otras aplicaciones, sin la necesidad de construir prototipos físicos costosos o realizar experimentos a gran escala.

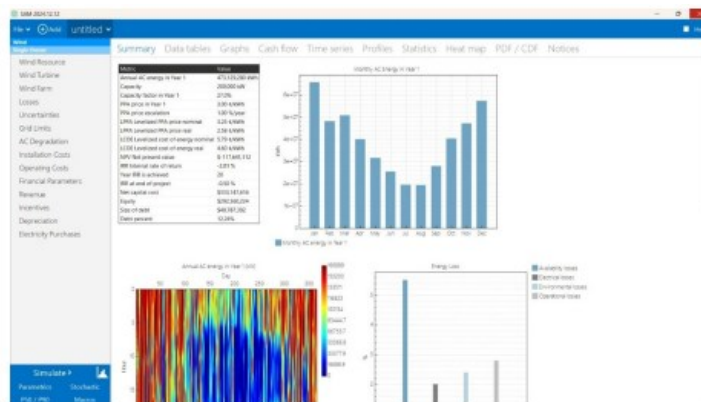
4.1.3.1. System Advisor Model (SAM)

System Advisor Model (SAM) aplica una herramienta de modelado y análisis de sistemas de energía renovable desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) de los Estados Unidos. SAM se destaca por su capacidad para realizar simulaciones detalladas del rendimiento técnico y financiero de proyectos de energía renovable, incluyendo sistemas de energía eólica, solar fotovoltaica, solar térmica, geotérmica y de biomasa²⁰.

Dentro de sus grandes características, SAM incluye un simulador de energía especializado en evaluar el rendimiento de sistemas de energía renovable en diferentes contextos. También integra un analizador financiero que genera indicadores como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación. SAM ofrece, además, una base de datos de componentes para mejorar la precisión del modelado y una herramienta de comparación de escenarios que ayuda a identificar el diseño más eficiente para el proyecto.

²⁰ SAM. Guía de Introducción de System Advisor Model (SAM). [en línea], 2022. Disponible en: https://sam.nrel.gov/images/web_page_files/sam-getting-started-for-translation-2020-12-16-spanish.pdf. Consultado el 12 de agosto de 2024

Figura 9. Interfaz de SAM



Fuente: SAM

En el ámbito de la energía eólica, SAM ofrece un conjunto completo de herramientas para modelar y analizar el rendimiento de turbinas eólicas individuales y parques eólicos completos. El software incluye una base de datos extensa de turbinas eólicas comerciales, permitiendo a los usuarios seleccionar modelos específicos o definir sus propias características de turbina. SAM utiliza datos de recurso eólico detallados, que pueden ser importados de bases de datos globales o locales, para simular la producción de energía hora por hora a lo largo de un año típico.

Ventajas

- **Análisis financiero detallado:** SAM ofrece herramientas robustas para la evaluación financiera, permitiendo a los usuarios modelar costos, ingresos, y otros aspectos económicos con gran precisión.
- **Amplia base de datos:** Incluye una extensa base de datos de recursos energéticos, tarifas eléctricas, y costos de componentes, lo que facilita la creación de modelos precisos.

- Flexibilidad en el modelado: Permite a los usuarios simular una amplia variedad de configuraciones de sistemas y escenarios financieros, adaptándose a las necesidades específicas de cada proyecto.
- Soporte y capacitación: SAM cuenta con un amplio soporte, incluyendo tutoriales, foros de usuarios, y documentación detallada, lo que facilita su adopción y uso.

Desventajas:

- Complejidad en la entrada de datos: Para obtener resultados precisos, es necesario ingresar una gran cantidad de datos detallados, lo que puede ser laborioso y propenso a errores.
- Curva de aprendizaje pronunciada: Los usuarios nuevos pueden encontrar la herramienta abrumadora debido a la cantidad de opciones y configuraciones disponibles.
- Enfoque limitado: Aunque muy poderoso para proyectos de energía renovable, puede no ser adecuado para modelar otros tipos de sistemas energéticos o aplicaciones no relacionadas con energías renovables.

4.1.3.2. ArcGIS

ArcGIS es una plataforma avanzada de Sistemas de Información Geográfica (SIG) desarrollada por Esri, ampliamente utilizada para el análisis espacial, la visualización de datos geoespaciales y la toma de decisiones informadas en diversos sectores. En el ámbito de la energía renovable, ArcGIS se emplea para evaluar zonas óptimas para proyectos eólicos, solares y otras aplicaciones energéticas. Su capacidad para integrar y analizar datos climáticos, topográficos y socioeconómicos lo convierte en una herramienta indispensable para planificadores y desarrolladores.

Facilita la superposición de capas de datos geoespaciales, como la velocidad del viento, la rugosidad del terreno y las restricciones ambientales, lo que permite identificar ubicaciones ideales para la instalación de turbinas eólicas.

Además, se incluyen análisis de exclusión para evitar la instalación en áreas protegidas, cercanas a poblaciones o en terrenos inadecuados. Se utilizan tanto datos meteorológicos históricos como en tiempo real para modelar los patrones del viento. Esto también incluye la elaboración de mapas de elevación y pendiente, lo cual es crucial para evaluar la viabilidad estructural y técnica en terrenos específicos.

Ventajas:

- **Análisis Visual Completo:** Ofrece representaciones gráficas y mapas interactivos que simplifican la interpretación de datos complejos.
- **Acceso a Extensas Bases de Datos:** Integra información de recursos globales, incluidos mapas climáticos y geográficos, reduciendo así la necesidad de adquirir datos adicionales.
- **Personalización y Escalabilidad:** Permite adaptar las herramientas y análisis a las necesidades específicas de cada proyecto, ya sea un pequeño parque eólico o una instalación de gran escala.
- **Integración con Otras Herramientas:** Es compatible con software externo como WAsP, SAM y OpenFAST, ampliando su utilidad en proyectos multidisciplinarios.

Desventajas:

- **Costo Elevado:** Las licencias comerciales pueden ser costosas, lo cual puede ser un desafío para pequeñas organizaciones o proyectos con recursos limitados.
- **Curva de Aprendizaje Pronunciada:** La amplia gama de herramientas y funciones puede resultar abrumadora para los nuevos usuarios, requiriendo capacitación inicial.
- **Enfoque Limitado a Datos Existentes:** Si los datos disponibles son incompletos o de baja resolución, los resultados obtenidos pueden ser menos precisos.

4.1.3.3. WAsP

WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) es un software especializado en la evaluación de recursos eólicos, desarrollado por el Departamento de Sistemas de Energía Eólica de la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU). Su principal función es modelar el flujo del viento y estimar el potencial de generación de energía en diversas ubicaciones, facilitando la planificación y optimización de parques eólicos. WAsP permite el análisis de datos meteorológicos para determinar la distribución y velocidad del viento en áreas específicas, identificando los lugares más idóneos para la instalación de turbinas eólicas.

Este software estima la producción anual de energía tanto de turbinas individuales como de parques eólicos completos, teniendo en cuenta factores como la topografía y las características del terreno. WAsP evalúa las pérdidas de energía que se producen por la interferencia entre turbinas, optimizando su disposición para maximizar la eficiencia del parque eólico. Este software, incluye modelos que consideran la orografía, cambios en la rugosidad del terreno y obstáculos, lo que permite obtener estimaciones precisas incluso en áreas con geografía complicada.

Ventajas:

- Gracias a sus avanzados modelos de flujo de viento, WAsP ofrece estimaciones confiables sobre la producción energética.
- Desarrollado por una institución académica líder, el software cuenta con actualizaciones periódicas y soporte técnico especializado para sus usuarios.

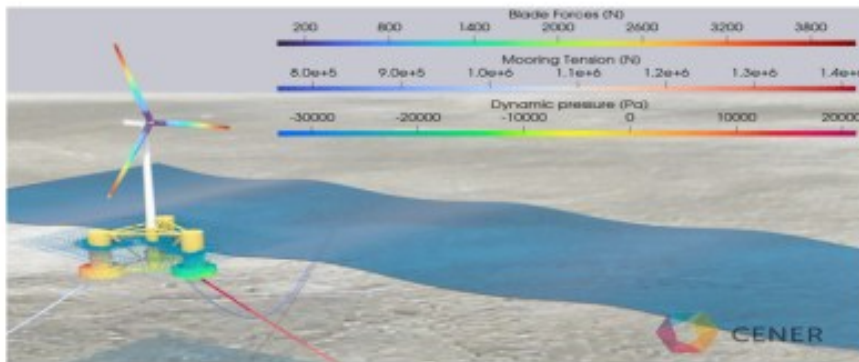
Desventajas:

- El uso de WAsP requiere conocimientos técnicos en meteorología y modelado de viento, lo que puede representar un desafío para los nuevos usuarios.
- La precisión de las estimaciones está sujeta a la calidad y disponibilidad de datos meteorológicos y geográficos detallados.

4.1.3.4. OpenFAST

OpenFAST (Open-source Framework for Aerodynamics, Structures, and Turbulence) es una herramienta de simulación aeroelástica de código abierto desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) de los Estados Unidos. Este software está diseñado específicamente para modelar y analizar el comportamiento dinámico de turbinas eólicas bajo condiciones operativas reales, convirtiéndolo en una herramienta indispensable para la industria eólica y la investigación en energías renovables²¹.

Figura 10. Modelo de turbina eólica en OpenFAST



Fuente: Guillén Campaña-Alonso, Raquel Martín-San-Román, Beatriz Méndez-López, Pablo Benito-Cia, and José Azcona-Armendáriz. (2023). OF2: coupling OpenFAST and OpenFOAM for high-fidelity aero-hydro-servo-elastic FOWT simulations.

OpenFAST se destaca por su capacidad para realizar simulaciones acopladas de aerodinámica, hidrodinámica (para turbinas offshore), control del sistema y dinámica

²¹ OpenFAST documentation — OpenFAST v4.0.0 documentation. (s/f). Readthedocs.io. Recuperado el 20 de octubre de 2024, de <https://openfast.readthedocs.io/en/main/>

estructural. En el ámbito de la aerodinámica, el software utiliza la teoría del elemento de pala (BEM) y modelos aerodinámicos dinámicos para calcular las cargas aerodinámicas en las palas de la turbina. Esto permite a los ingenieros y diseñadores evaluar el rendimiento de diferentes configuraciones de palas y optimizar su geometría para maximizar la producción de energía y minimizar las cargas estructurales²²

Una característica particularmente valiosa de OpenFAST es su capacidad para simular escenarios complejos que incluyen turbulencia atmosférica, cortadura del viento y operación en condiciones extremas. El software incorpora módulos como TurbSim para generar campos de viento turbulentos realistas, y SubDyn para modelar la dinámica de subestructuras flexibles en turbinas offshore. Además, OpenFAST permite la integración de sistemas de control personalizados, lo que facilita el desarrollo y prueba de estrategias avanzadas de control para mejorar la eficiencia y la vida útil de las turbinas²³.

Ventajas:

- Alta precisión: Proporciona resultados precisos en la simulación de la dinámica de las turbinas eólicas, incluyendo efectos de aerodinámica, elasticidad estructural y control de sistemas.
- Personalizable: Los usuarios pueden ajustar y extender el modelo para adaptarse a configuraciones específicas de turbinas y condiciones del viento.
- Interfaz con otros modelos: Puede ser utilizado en conjunto con otros modelos de simulación, como BEM (Blade Element Momentum) y CFD, para una evaluación más completa.

²² OpenFAST documentation — OpenFAST v4.0.0 documentation. (s/f). Readthedocs.io. Recuperado el 20 de octubre de 2024, de <https://openfast.readthedocs.io/en/main/>

²³ OpenFAST documentation — OpenFAST v4.0.0 documentation. (s/f). Readthedocs.io. Recuperado el 20 de octubre de 2024, de <https://openfast.readthedocs.io/en/main/>

Desventajas:

- Complejidad técnica: La configuración de simulaciones detalladas requiere un conocimiento profundo de la dinámica estructural y de los sistemas de control.
- Limitaciones en la usabilidad: No cuenta con una interfaz gráfica de usuario amigable, lo que puede hacer que la curva de aprendizaje sea más empinada.
- Dependencia de datos precisos: Para obtener resultados confiables, es necesario contar con datos precisos sobre las características de la turbina y las condiciones ambientales.

4.1.4. Análisis Comparativo entre los Softwares y Bases de Datos

El análisis comparativo de los softwares y bases de datos utilizados en la evaluación del potencial eólico en la provincia de Soto Norte se fundamenta en criterios como precisión, cobertura geográfica, costo y aplicabilidad. Cada herramienta tiene fortalezas específicas, lo que permite una evaluación multidimensional de las condiciones climáticas y geográficas de la región.

4.1.4.1. Softwares Evaluados**a. System Advisor Model (SAM)**

- Precisión: Alta, especialmente para análisis integrados de parámetros climáticos.
- Cobertura: Regional y global.
- Costo: Bajo, ya que es una herramienta gratuita y de código abierto.
- Aplicabilidad: Muy versátil; permite modelar proyectos de energía renovable en diferentes escenarios geográficos^{24, 25}

²⁴ MUÑOZ, R., et al. (2019). "Potencial eólico en Colombia: un enfoque regional". Redalyc. Disponible en: www.redalyc.org

b. WAsP

- Precisión: Alta, optimizado para áreas con flujos de viento uniformes.
- Cobertura: Local, ideal para sitios específicos con datos base confiables.
- Costo: Medio; requiere una licencia paga.
- Aplicabilidad: Excelente para modelado específico, pero limitado en escenarios con variabilidad topográfica alta²⁶.

c. ArcGIS

- Precisión: Media, aunque destaca en el análisis geoespacial y la integración de capas de datos.
- Cobertura: Regional y global.
- Costo: Alto; las licencias pueden ser un obstáculo para proyectos pequeños.
- Aplicabilidad: Herramienta robusta para análisis geoespaciales, pero menos específica para modelado de energía eólica²⁷.

A continuación, se presenta una tabla comparativa que resume las principales características de las herramientas analizadas, destacando sus propósitos, aplicaciones, requerimientos de datos, capacidades de simulación, accesibilidad y otras particularidades clave. Esta comparación facilita la selección de la herramienta más adecuada según las necesidades específicas del análisis y modelado de energía renovable.

²⁵ GÓMEZ, J., et al. (2020). "Evaluación de herramientas para proyectos eólicos". SciELO. Disponible en: www.scielo.org

²⁶ GÓMEZ, J., et al. (2020). "Evaluación de herramientas para proyectos eólicos". SciELO. Disponible en: www.scielo.org

²⁷ IDEAM. Atlas de Viento de Colombia. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2023.

Tabla 2. Comparativo de herramientas y simulación de energía Renovable

Cuadro Comparativo de Herramientas para Modelado y Simulación de Energía Renovable				
Aspecto Evaluado	System Advisor Model (SAM)	ArcGIS	WAsP	OpenFAST
Propósito Principal	Herramienta desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) para modelar y analizar el rendimiento técnico y financiero de proyectos de energía renovable. Compatible con sistemas eólicos, fotovoltaicos, solares térmicos, geotérmicos y de biomasa.	Herramienta geoespacial utilizada para identificar zonas óptimas para proyectos eólicos basada en topografía y clima.	Software especializado en modelado del flujo del viento y estimación del potencial de generación eólica.	Software de simulación aeroelástica de código abierto para analizar el comportamiento dinámico de turbinas eólicas. Diseñado por el NREL, soporta simulaciones acopladas de aerodinámica, hidrodinámica y dinámica estructural.
Áreas de Aplicación	Energía solar fotovoltaica, solar térmica, eólica,	Sistemas eólicos mediante	Sistemas de energía eólica.	Turbinas eólicas, incluyendo aerodinámica,

Cuadro Comparativo de Herramientas para Modelado y Simulación de Energía Renovable				
Aspecto Evaluado	System Advisor Model (SAM)	ArcGIS	WAsP	OpenFAST
	geotérmica, biomasa.	evaluación geoespacial.		control del sistema y dinámica estructural.
Datos Requeridos	Datos meteorológicos, perfiles de carga, costos de componentes, tarifas eléctricas, y características del sistema.	Datos topográficos, climáticos y de uso del suelo.	Datos de velocidad y dirección del viento, topografía y rugosidad del terreno.	Datos meteorológicos, propiedades estructurales, modelos de control y configuraciones aerodinámicas.
Capacidad de Simulación	Permite simulaciones técnicas y financieras detalladas.	No aplica.	Si, con enfoque en recursos eólicos.	Simula dinámicas aeroelásticas, estructurales y de control.

Cuadro Comparativo de Herramientas para Modelado y Simulación de Energía Renovable				
Aspecto Evaluado	System Advisor Model (SAM)	ArcGIS	WAsP	OpenFAST
Evaluación Económica	Incluye análisis financiero avanzado y modelado de escenarios económicos.	No disponible.	No disponible.	No se centra en análisis financieros.
Escenarios Personalizables	Admite múltiples configuraciones para evaluar escenarios técnicos y financieros.	No ofrece opciones de personalización de escenarios.	Limitado a variaciones del recurso eólico.	Permite la personalización de parámetros técnicos de las turbinas.
Interfaz y Acceso	Software de escritorio con interfaz intuitiva para expertos.	Basada en mapas interactivos para análisis geoespacial.	Plataforma de escritorio con enfoque técnico.	Basada en código abierto, requiere configuración técnica avanzada.

Cuadro Comparativo de Herramientas para Modelado y Simulación de Energía Renovable				
Aspecto Evaluado	System Advisor Model (SAM)	ArcGIS	WAsP	OpenFAST
Licenciamiento	Gratuito.	Requiere licencia comercial.	Requiere licencia comercial.	Gratuito.
Soporte Técnico	Incluye tutoriales, foros comunitarios y documentación técnica proporcionada por el NREL.	Ofrece soporte basado en licencias y acceso a recursos de mapas.	Soporte limitado a actualizaciones y documentación técnica.	Comunidad activa con soporte basado en foros y manuales técnicos.
Usos Comunes	Modelado técnico y económico de proyectos de energía renovable.	Identificación de ubicaciones óptimas para instalaciones eólicas.	Análisis detallado del potencial eólico en terrenos complejos.	Optimización de diseños y evaluación dinámica de turbinas en condiciones reales.
Accesibilidad	Nivel medio, ideal para usuarios con conocimientos	Alta, gracias a su enfoque	Media, requiere experiencia	Baja, curva de aprendizaje alta debido a

Cuadro Comparativo de Herramientas para Modelado y Simulación de Energía Renovable				
Aspecto Evaluado	System Advisor Model (SAM)	ArcGIS	WAsP	OpenFAST
	técnicos y financieros.	visual e intuitivo.	previa en modelado eólico.	su enfoque especializado.
Documentación Disponible	Extensa, incluye tutoriales, guías técnicas y foros para resolución de dudas.	Completa, con guías específicas para el análisis geoespacial.	Amplia, con énfasis en manuales técnicos y aplicaciones prácticas.	Muy completa, enfocada en simulaciones dinámicas y optimización estructural.
Fortalezas	Ofrece simulaciones detalladas, amplia base de datos de componentes y recursos, y soporte técnico robusto.	Precisión para evaluar áreas óptimas para proyectos eólicos.	Alta exactitud en estimación de recursos eólicos y modelado del flujo del viento.	Análisis avanzado de turbinas eólicas, simulaciones dinámicas y código abierto flexible.
Limitaciones	Entrada de datos compleja y curva de aprendizaje alta	Enfoque limitado a proyectos eólicos, con	Requiere datos detallados del recurso	Configuración técnica complicada para

Cuadro Comparativo de Herramientas para Modelado y Simulación de Energía Renovable				
Aspecto Evaluado	System Advisor Model (SAM)	ArcGIS	WAsP	OpenFAST
	para nuevos usuarios.	alto costo de licenciamiento.	eólico y experiencia avanzada.	principiantes, enfocada exclusivamente en turbinas eólicas.
Integración con Otras Herramientas	Compatible con bases de datos externas y otras herramientas de análisis técnico-financiero.	Se integra con sistemas de información geográfica (SIG).	Limitada a software especializado en energía eólica.	Compatible con herramientas de simulación avanzada y desarrollo personalizado.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4.2. Bases de datos evaluadas

a. IDEAM

El IDEAM proporciona una base de datos llamada Los Atlas, que contienen información de las variables meteorológicas y productos agregados. Los resultados del Atlas Climatológico de Colombia muestran una descripción espaciotemporal de las variables meteorológicas a nivel nacional, departamental e incluso local.

El documento que entrega el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, es una herramienta para el desarrollo de las energías renovables en el país, la gestión del riesgo y la toma de decisiones climáticamente inteligentes. La versión 2018 del Atlas de Clima, Radiación y Viento de Colombia, contiene amplios aportes y avances con respecto a la última edición del 2005²⁸.

- Precisión: Media, adecuada para análisis a escala nacional.
- Cobertura: Nacional, con datos climáticos históricos de estaciones locales.
- Costo: Bajo, ya que es accesible a través de instituciones públicas.
- Aplicabilidad: Ideal para obtener datos preliminares de áreas objetivo²⁹.

b. NASA:

- Precisión: Media, limitada por su enfoque global.
- Cobertura: Global, con acceso a datos climáticos de todo el mundo.
- Costo: Bajo, ya que los datos son de acceso público.
- Aplicabilidad: Útil para análisis generales, pero con limitaciones en áreas de alta variabilidad geográfica³⁰.

c. Meteostat

Es una base de datos meteorológicos y climáticos que proporciona datos detallados de miles de estaciones meteorológicas y lugares de todo el mundo. Los datos son

²⁸ CATÁLOGO NACIONAL de Estaciones. IDEAM [página web]. (12, diciembre, 2023). [Consultado el 20, septiembre, 2024]. Disponible en Internet: <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/IDEAM/vfi6-fe9z>

²⁹ GALILEO, UIS. (2024). "Datos Geográficos y Mapas de Soto Norte". Grupo Galileo, Universidad Industrial de Santander

³⁰ MUÑOZ, R., et al. (2019). "Potencial eólico en Colombia: un enfoque regional". Redalyc. Disponible en: www.redalyc.org

recopilados por diferentes miembros de la organización meteorológica mundial (OMM) y se comparten según los términos de la resolución 40 de la OMM³¹.

d. Meteoblue

Meteoblue produce datos meteorológicos de alta calidad en cualquier punto terrestre o marítimo a nivel mundial. La simulación del archivo de historia proporciona acceso a simulaciones climáticas, proporcionando información desde los últimos años. Dentro de esta información se puede encontrar la temperatura, las nubes y la velocidad y dirección del viento³²

4.1.5. Selección de Metodología

Tras evaluar diversas herramientas de modelado y simulación para proyectos de energía renovable, el System Advisor Model (SAM) se revela como la opción más adecuada para los estudios de energía eólica en Soto Norte. SAM se distingue por su capacidad para realizar simulaciones detalladas que abarcan aspectos técnicos y financieros de los proyectos renovables, consolidándose, así como una herramienta integral y efectiva para la energía eólica.

Su flexibilidad le permite adaptarse a diversas tecnologías renovables, como la energía eólica, solar fotovoltaica, solar térmica, geotérmica y biomasa, proporcionando una visión completa de los proyectos³³

Uno de los aspectos clave que justifica la elección de SAM es su habilidad para integrar una amplia variedad de datos meteorológicos, topográficos y de carga, lo cual resulta esencial para la precisión de las simulaciones. En el contexto específico de Soto Norte,

³¹ EL GUARDIÁN del Tiempo | Meteostat. The Weather's Record Keeper | Meteostat [página web]. [Consultado el 10, noviembre, 2024]. Disponible en Internet: <https://meteostat.net/es/>.

³² TIEMPO VETAS - meteoblue [página web]. [Consultado el 15, diciembre, 2024]. Disponible en Internet: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/vetas_colombia_3666092

³³ 3 GÓMEZ, J., et al. (2020). "Evaluación de herramientas para proyectos eólicos". SciELO. Disponible en: www.scielo.org

esta herramienta puede incorporar información local, como la velocidad del viento, la temperatura y las características del terreno, asegurando que los resultados sean relevantes y representativos de las condiciones particulares de la región.

- **Integración de Parámetros:** SAM facilita la incorporación de datos como la velocidad del viento, la temperatura y la topografía, lo que permite crear modelos precisos y adaptados a las condiciones específicas de Soto Norte. Esta capacidad de integración es fundamental para garantizar que las simulaciones reflejen fielmente las realidades locales, ofreciendo resultados más exactos.
- **Análisis de Sensibilidad:** Otra ventaja significativa de SAM es su capacidad para realizar análisis de sensibilidad. Esta función permite evaluar cómo las variaciones en parámetros clave, como las condiciones meteorológicas o la configuración del sistema, pueden afectar el rendimiento del proyecto. Así, se identifica de manera eficaz la posibilidad de escenarios óptimos y riesgos potenciales, un aspecto crucial en la planificación de proyectos a largo plazo.
- **Adaptabilidad Geográfica:** SAM brilla por su flexibilidad para adaptarse a contextos geográficos específicos. En Soto Norte, la posibilidad de incorporar datos geográficos regionales asegura que los resultados de las simulaciones sean precisos y contextualizados, lo que optimiza la evaluación del potencial eólico en la zona. Esta adaptabilidad, junto con la integración de datos meteorológicos y topográficos locales, garantiza simulaciones altamente relevantes para las condiciones del sitio.
- **Costo Efectivo:** SAM se distingue por ofrecer un alto rendimiento a un costo considerablemente inferior al de otras herramientas como WAsP y ArcGIS, que requieren la adquisición de licencias comerciales. La disponibilidad de una licencia gratuita y la capacidad de SAM para llevar a cabo simulaciones tanto técnicas como económicas lo convierten en una opción mucho más accesible y económica, especialmente valiosa para proyectos con restricciones presupuestarias o para evaluaciones a gran escala.

En el mismo orden de ideas, para el análisis y recolección de datos meteorológicos y climatológicos correspondientes a la ubicación objeto de estudio, se utilizarán dos bases de datos precargadas, Meteostat y Meteoblue. Ambas presentan un alto contenido informativo de calidad, que permite la integración de algunos parámetros críticos, que podrían servir de interés para esta revisión. Meteostat se centra en los datos meteorológicos históricos y en tiempo real, lo que constituye una buena base para el diseño de la línea de análisis climatológico, mientras que Meteoblue provee simulaciones meteorológicas avanzadas y modelos predictivos, específicos para la región de Soto Norte.

Esta combinación de fuentes asegura que los datos a recopilar sean robustos, esenciales para alimentar a las simulaciones en SAM, garantizando que los resultados obtenidos sean precisos y representativos.

En resumen, SAM se posiciona como la herramienta principal para la simulación y modelado en este proyecto por su versatilidad, precisión y adaptación a las condiciones geográficas específicas de Soto Norte. La fusión de datos de Meteostat y Meteoblue refuerza el análisis desde el punto de vista técnico y garantiza simulaciones exactas y de calidad.

5. RECOPIACIÓN DE DATOS GEOGRÁFICOS, METEOROLÓGICOS Y AMBIENTALES DE LA PROVINCIA SOTO NORTE, SANTANDER

En la actualidad, existen múltiples estudios que permiten calcular el potencial eólico de una región en específico, estos estudios realizan un análisis de ciertos datos estadísticos para modelar los resultados obtenidos directamente en el campo. En este contexto, el termino potencial técnico, se define como la capacidad máxima de generación de energía eólica en una región específica, basada en criterios como la topografía, la velocidad del viento y las normativas locales. Para determinar este potencial, se recopila información clave de fuentes especializadas, teniendo en cuenta las siguientes restricciones lo que facilita la selección de áreas óptimas para implementar proyectos eólicos.

Tabla 3. Restricciones y criticidades

Variable	Dimensión	Condición
Potencial de energía eólica	Física	No Rentable
Cuerpos de agua		< 165 m
Humedales		< 165 m
Rugosidad de la Superficie		Bosque
Aeropuertos		< 5500 m
Pendiente		> 20%
Área disponible		> 9 km ²
Áreas protegidas	Biótica	Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP)*
Zonas de alto valor ecosistémico		Páramos, manglares, ciénagas
Hábitats de Aves		Retiro a Halobiomas y Heliobiomas

Variable	Dimensión	Condición
Sitios de interés	Económica	< 2000 m
Impacto Visual		< 2000 m (centros poblados)
Distancia a Red Eléctrica		< 165 m
Distancia a vías		< 165 m
Distancia a áreas urbanas		< 2000 m
Zonas con alto valor arqueológico	Cultural	Áreas Arqueológicas Protegidas
Territorios étnicos		Resguardos Indígenas

Fuente: Elaboración propia

En este contexto, el Grupo de Investigación Galileo de la Universidad Industrial de Santander (UIS) contó con la colaboración del Grupo de Investigación Geomática, también de la UIS, para el desarrollo de mapas geográficos y meteorológicos que permiten una representación precisa del territorio. Esta colaboración fue fundamental para identificar áreas prioritarias para la instalación de aerogeneradores³⁴.

5.1. GEOGRAFÍA Y CARACTERÍSTICAS NATURALES

La provincia de Soto Norte, ubicada en el departamento de Santander, Colombia, se caracteriza por una geografía variada que influye de manera significativa en su potencial para el aprovechamiento de energías renovables, especialmente la energía eólica.

³⁴ GALILEO UIS. Mapas geográficos y meteorológicos para la evaluación del potencial eólico en Santander. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2023.

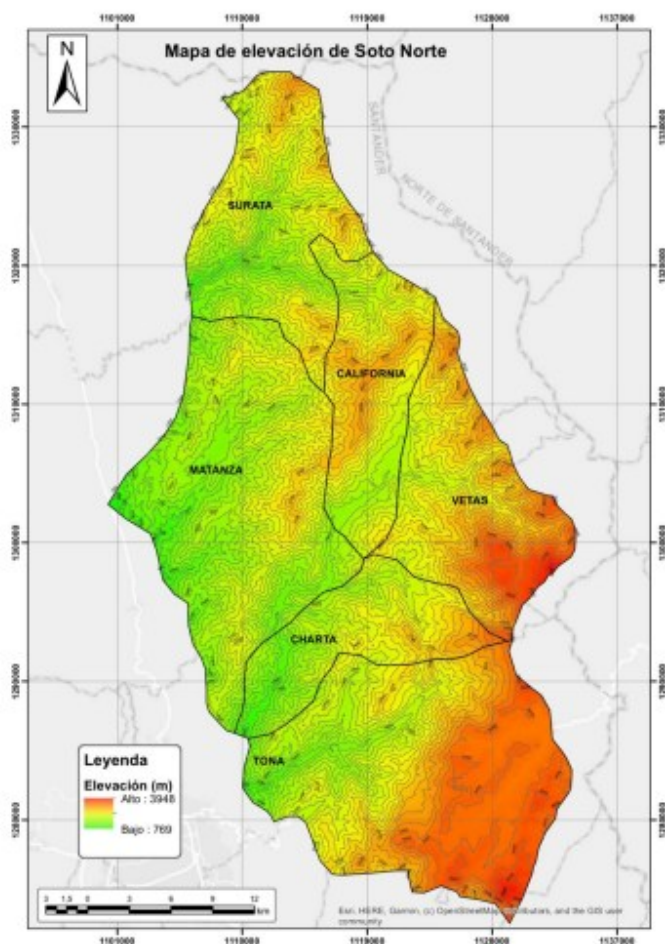
5.1.1. Topografía

La provincia presenta un relieve montañoso que abarca varias altitudes y suelos que favorecen tanto la agricultura como el aprovechamiento de recursos naturales. Las elevaciones superan los 3,000 metros sobre el nivel del mar en zonas como los páramos de Suratá, Matanza, Charta y Tona. La variación en las elevaciones de la región, como se muestra en la Figura 10, tiene un impacto directo en el potencial de la energía eólica, ya que las áreas altas presentan mayores velocidades de viento, un factor clave para la generación de energía eólica.

Esta topografía diversa ofrece un mapa de vientos que, según estudios como los de Ballesteros³⁵, puede optimizarse para la instalación de aerogeneradores, aprovechando la exposición a vientos fuertes en las zonas más altas, como los municipios de Suratá y Matanza. Estos vientos son más intensos en las crestas montañosas, donde la velocidad media anual alcanza valores significativos para la generación eólica. La implementación de proyectos eólicos requiere pendientes menores al 20%, debido a que en Soto Norte hay presencia de pendientes pronunciadas en muchas áreas podría limitar significativamente las ubicaciones adecuadas.

³⁵ BALLESTEROS, Loreta Michael Biviana. Identificación de la calidad de agua para consumo humano de la provincia Soto Norte del departamento de Santander en el año 2019-2022 a través de revisión bibliográfica. Bucaramanga: Unidades Tecnológicas de Santander, Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías, 2023

Figura 11. Mapa de elevación de la Provincia de Soto Norte



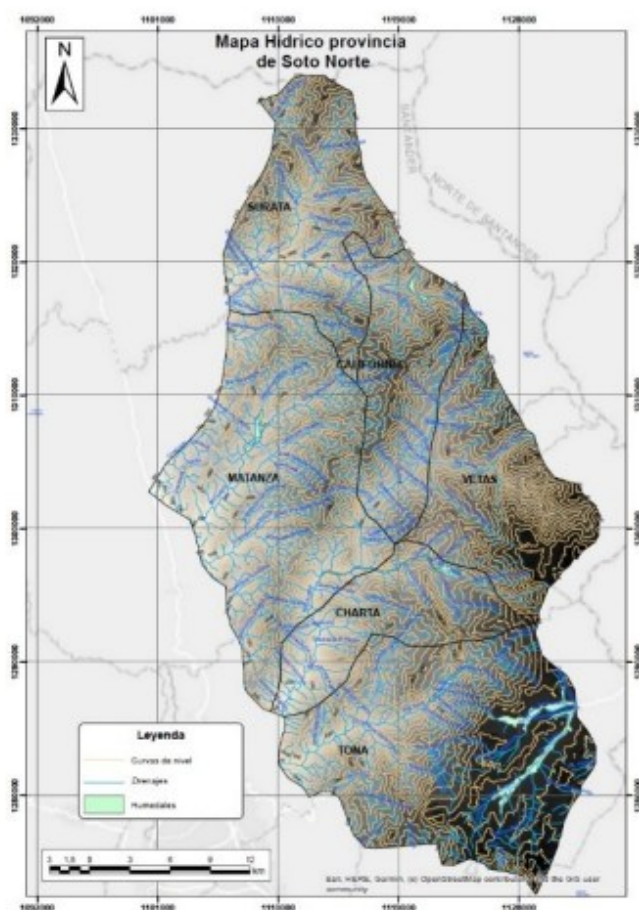
Fuente: Grupo Galileo, Universidad Industrial de Santander (UIS). Mapa Hídrico de la Provincia Soto Norte_SAM. (s.f.). [Imagen]. Insertada en Datos Gráficos.

5.1.2. Hidrografía

La región está atravesada por una compleja red de cuerpos hídricos, siendo el río Suratá uno de los más importantes debido a su papel en el abastecimiento de agua potable, agrícola y para actividades mineras. Además, la cuenca Matanza-Riachuelo en los municipios de Matanza y Suratá se caracteriza por humedales que son áreas críticas para la conservación del agua y la biodiversidad local. La distribución de los

cuerpos de agua en la provincia también influye en el diseño de proyectos de energías renovables, como la eólica, al considerar la proximidad a fuentes hídricas y la infraestructura existente para el acceso y la construcción de parques eólicos. Para la implementación de la energía eólica, es necesario que estos cuerpos de agua estén a una distancia no menor de 165 metros a la redonda.

Figura 12. Mapa Hídrico de la Provincia Soto Norte



Fuente: Grupo Galileo, Universidad Industrial de Santander (UIS). Mapa Hídrico de la Provincia Soto Norte_SAM. (s.f.). [Imagen]. Insertada en Datos Gráficos

5.1.3. Ecosistemas y Biodiversidad

Los ecosistemas de la región van desde páramos y bosques andinos en las zonas altas hasta áreas de vegetación subtropical en las zonas bajas. La biodiversidad de la provincia de Soto Norte es un recurso natural importante que debe ser considerado en cualquier desarrollo energético. Según investigaciones de Loreta Ballesteros³⁶, los páramos y bosques andinos son esenciales para la regulación hídrica y la biodiversidad, lo que resalta la necesidad de mitigar los impactos ambientales de cualquier proyecto de energía, incluida la eólica.

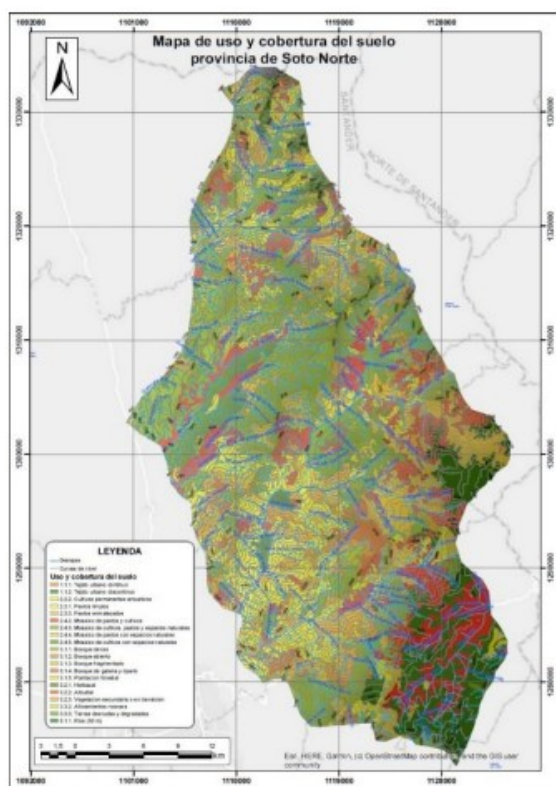
5.1.4. Actividad económica y uso del suelo

En cuanto a la actividad económica, la minería, la agricultura y el turismo son los sectores predominantes en la provincia. La minería de oro es especialmente relevante, pero también lo es la agricultura, que en muchas áreas se basa en cultivos de café, caña de azúcar y frutas. Además, la ganadería y el comercio local son actividades claves para las comunidades rurales. Para la energía eólica, las áreas agrícolas y de pastizales, que predominan en el norte y centro de la provincia, son más viables para el desarrollo de parques eólicos. Las áreas forestales, por otro lado, necesitan ser protegidas para evitar impactos negativos sobre la biodiversidad. Estas características están estrechamente vinculadas a las restricciones señaladas en la tabla mencionada anteriormente, especialmente aquellas relacionadas con zonas de alto valor ecosistémico, áreas protegidas por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), y la necesidad de mantener una distancia prudente de hábitats de aves y cuerpos de agua. Las restricciones limitan la viabilidad de proyectos eólicos en suelos destinados a

³⁶ BALLESTEROS, Loreta Michael Biviana. Identificación de la calidad de agua para consumo humano de la provincia Soto Norte del departamento de Santander en el año 2019-2022 a través de revisión bibliográfica. Bucaramanga: Unidades Tecnológicas de Santander, Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías, 2023

la conservación ambiental o en aquellos que soportan actividades de subsistencia de las comunidades locales. Además, la topografía montañosa y la baja disponibilidad de áreas planas superiores a 9 km² refuerzan la necesidad de una evaluación exhaustiva del mapa de uso del suelo para identificar posibles ubicaciones que cumplan con las condiciones impuestas.

Figura 13. Mapa de uso y cobertura de suelo de la Provincia Soto Norte.



Fuente: Grupo Galileo, Universidad Industrial de Santander (UIS). Mapa de uso y cobertura de suelo de la Provincia Soto Norte. (s.f.). Insertada en Datos Gráficos.

5.2. RECOPIACIÓN DE DATOS METEREOLÓGICOS DE SOTO NORTE

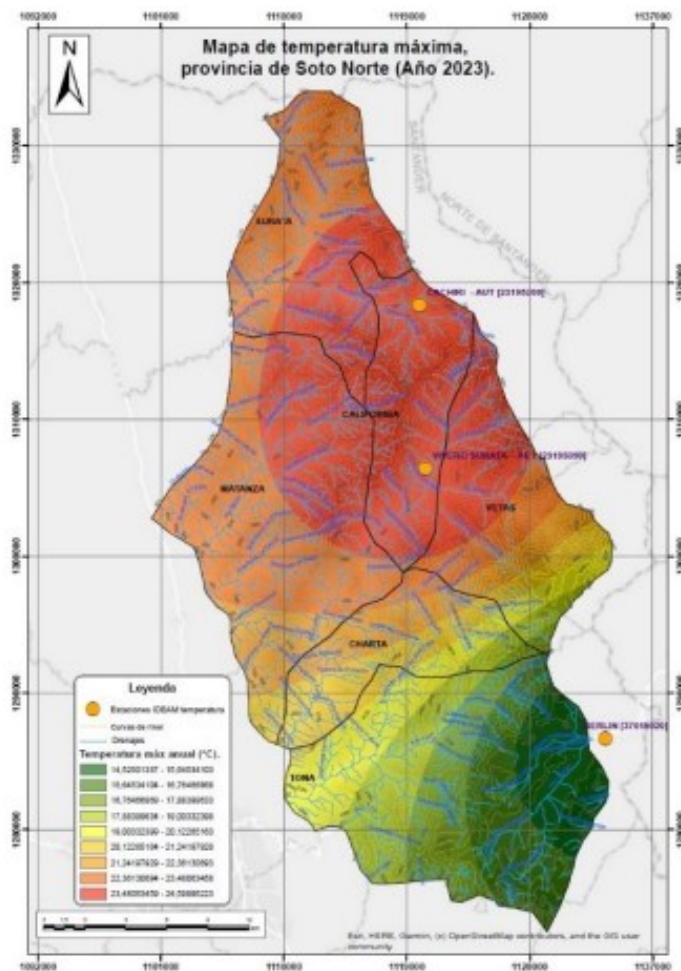
Los datos meteorológicos son fundamentales para el diseño y la implementación de proyectos de energía renovable, especialmente la energía eólica, ya que permiten determinar la viabilidad de estos proyectos en función de las condiciones climáticas de la región.

5.2.1. Temperatura

Las zonas más altas de Soto Norte, como los páramos y las montañas de Suratá y Charta, tienen temperaturas frías que oscilan entre los 5°C y los 12°C, favoreciendo el aprovechamiento de recursos naturales para la generación de energía eólica. La temperatura en la provincia de Soto Norte está influenciada por su altitud, variando desde climas fríos en las zonas de páramo hasta temperaturas más templadas en áreas de menor elevación. Estas condiciones térmicas pueden tener implicaciones para la implementación de proyectos eólicos, ya que afectan la densidad del aire y, por ende, el rendimiento de los aerogeneradores.

Según las restricciones de la tabla, aunque la temperatura no se menciona explícitamente, su impacto indirecto se relaciona con la presencia de ecosistemas sensibles, como páramos, que requieren protección debido a su fragilidad frente a cambios ambientales. Además, las bajas temperaturas en las áreas más altas pueden limitar el acceso y la instalación de infraestructura, mientras que las zonas templadas, aunque más accesibles, suelen estar cerca de cuerpos de agua o áreas pobladas, lo que restringe su uso según las condiciones establecidas. Esto resalta la importancia de un análisis integral que considere tanto las variables climáticas como las restricciones topográficas y ambientales de la región.

Figura 14. Mapa de Temperatura Máxima de la Provincia Soto Norte



Fuente: Grupo Galileo, Universidad Industrial de Santander (UIS). Mapa de Temperatura Máxima de la Provincia Soto Norte_SAM. (s.f.). Insertada en Datos Gráficos.

5.2.2. Precipitación

La provincia presenta un régimen de lluvias bimodal, con períodos de precipitaciones en primavera y otoño. Las zonas de mayor altitud reciben precipitaciones que superan los 2,000 mm anuales, lo que influye en la creación de reservorios hídricos para proyectos

hidroeléctricos. Para la energía eólica, las áreas más secas y expuestas a vientos fuertes son las más adecuadas.

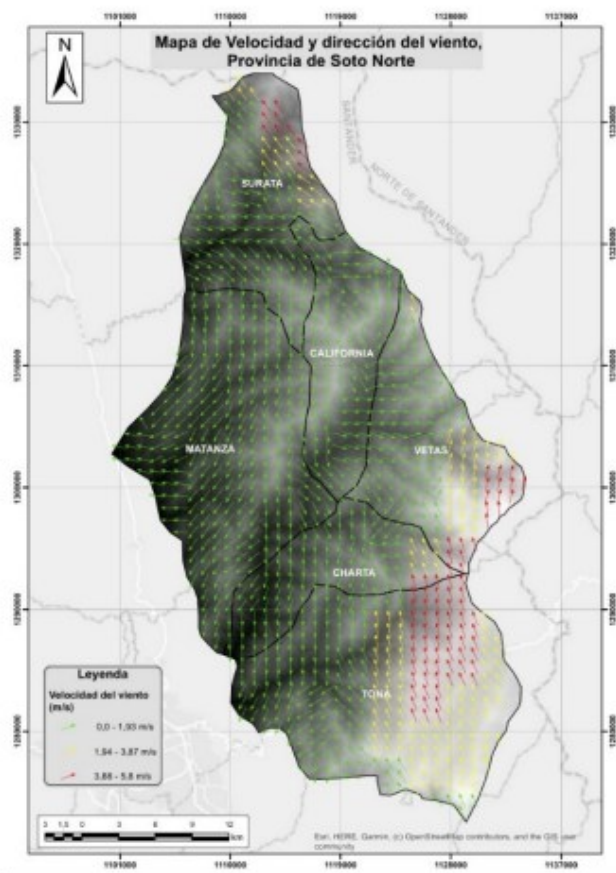
5.2.3. Vientos

La provincia de Soto Norte es favorable para la energía eólica, con vientos constantes y fuertes en las áreas montañosas, especialmente en las crestas. Según el Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia³⁷, la velocidad media de los vientos en estos sectores supera los 3 m/s, lo que hace que Soto Norte sea una región con gran potencial para el desarrollo de parques eólicos.

Por otra parte, este mapa es uno de los más importantes, sino el más importante a la hora de la construcción de proyectos eólicos ya que nos brinda información más detallada de los lugares en los que las velocidades del viento tienden a ser mayores o menores, dependiendo de la zona de interés, de su elevación, entre otras.

³⁷ (UPME, 2006) UPME. (2006). Velocidad del viento en superficie.
<https://www.upme.gov.co/Docs/MapaViento/CAPITULO1.pdf>

Figura 15. Mapa de Velocidad y Dirección del Viento de la Provincia Soto Norte



Fuente: Grupo Galileo, Universidad Industrial de Santander (UIS). Mapa de Velocidad y Dirección del Viento de la Provincia Soto Norte_SAM. (s.f.). Insertada en Datos Gráficos.

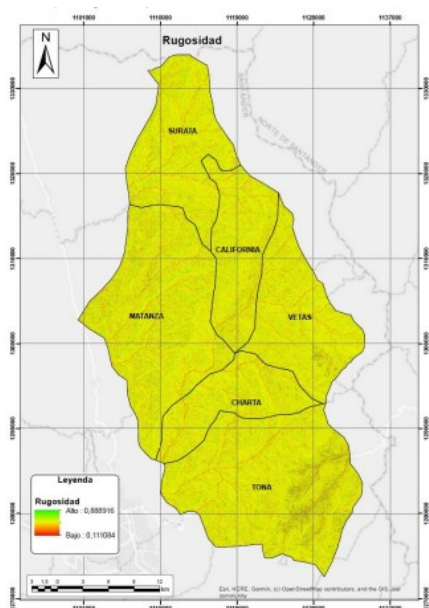
5.2.4. Datos ambientales de la Provincia de Soto Norte

La provincia de Soto Norte, ubicada en el departamento de Santander, Colombia, es una región de gran riqueza ambiental debido a su compleja topografía y diversidad climática. En esta sección, se presentan los principales aspectos ambientales que influyen en la planificación de proyectos energéticos y en la conservación de los recursos naturales.

La provincia de Soto Norte presenta una alta rugosidad en su terreno debido a su relieve montañoso, la presencia de bosques y la variedad de coberturas vegetales, como los páramos y las zonas agrícolas. De acuerdo con las restricciones mencionadas en la tabla, los terrenos con alta rugosidad no son ideales para proyectos eólicos, ya que generan mayor fricción con el viento, disminuyendo su velocidad y afectando el rendimiento de los aerogeneradores. Además, la rugosidad del terreno está asociada a ecosistemas clave, como bosques y humedales, que cuentan con restricciones adicionales para su intervención. Esto reduce las áreas disponibles para desarrollar proyectos eólicos, ya que las zonas con menor rugosidad, como valles o mesetas, suelen coincidir con áreas protegidas o cercanas a cuerpos de agua o asentamientos humanos.

Por lo tanto, es necesario realizar estudios detallados de micro localización que permitan identificar sitios con condiciones de rugosidad adecuadas dentro de los límites legales y ambientales establecidos.

Figura 16. Mapa Rugosidad provincia Soto Norte



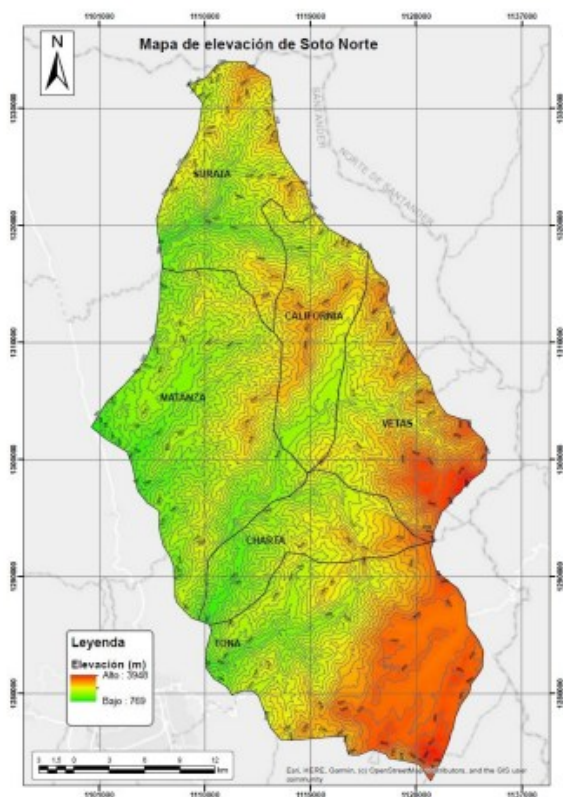
Fuente: Grupo Galileo, Universidad Industrial de Santander (UIS). Mapa Rugosidad provincia Soto Norte_SAM. (s.f.). [Imagen]. Datos Geográficos.

5.2.5. Ecosistemas

Soto Norte alberga diversos ecosistemas que varían según la altitud y las condiciones climáticas de la región. Estos son algunos de los más relevantes:

- **Páramos:** Son ecosistemas de alta montaña que juegan un papel fundamental en la regulación del agua. Situados entre los 3,000 y 4,000 metros sobre el nivel del mar, los páramos de Soto Norte capturan y liberan agua de manera lenta, lo que ayuda a mantener el caudal de los ríos durante todo el año. Además, son ricos en biodiversidad, con especies de flora y fauna endémicas que dependen de sus condiciones ambientales únicas.
- **Bosques:** En las zonas intermedias, donde la altitud varía entre los 2,000 y 3,000 metros, los bosques andinos tienen un papel importante en el almacenamiento de carbono y la protección del suelo contra la erosión. Estos bosques son hogar de numerosas especies de animales y plantas, muchas de ellas en peligro de extinción.
- **Ecosistemas Subtropicales:** En las zonas más bajas, los ecosistemas subtropicales incluyen selvas y bosques húmedos que contribuyen a la conservación de la biodiversidad. Estos ecosistemas son clave para la salud ecológica de la provincia, ya que regulan los ciclos de nutrientes y agua en la región.

Figura 17. Mapa de elevación de la provincia Soto Norte



Fuente: Grupo Galileo, Universidad Industrial de Santander (UIS). Mapa de elevación de la provincia Soto Norte_SAM. (s.f.). [Imagen]. Datos Geográficos

5.2.6. Gestión ambiental y conservación

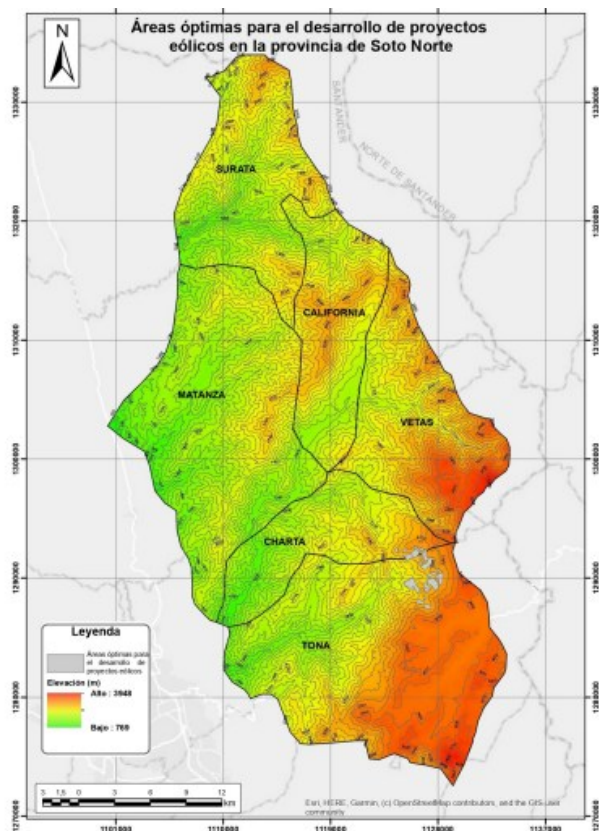
Existen actividades de conservación en Soto Norte, que incluyen la protección de los páramos, la reforestación de áreas degradadas y la promoción de prácticas mineras y agrícolas sostenibles. Sin embargo, la implementación de estas iniciativas enfrenta desafíos, como la presión económica para expandir la minería y la agricultura, y la falta de recursos para la vigilancia y el control ambiental.

5.3. SELECCIÓN DE ÁREAS ÓPTIMAS

Considerando la información previamente analizada y basada en las restricciones identificadas, se presenta a continuación el mapa que delimita las zonas óptimas para el desarrollo de proyectos eólicos en la región. El mapa presentado identifica las áreas óptimas para el desarrollo de proyectos eólicos la región de Soto Norte, Santander. Estas áreas óptimas, marcadas en color gris, representan las zonas que cumplen con las condiciones ideales para la instalación de parques eólicos, tras considerar factores como restricciones ambientales, normativas, y características geográficas.

En el municipio de Vetás, las áreas óptimas se localizan principalmente en las zonas de mayor elevación, por encima de los 3300 metros, donde se espera una mayor intensidad y estabilidad del viento. En Charta, las zonas favorables se ubican en sectores elevados hacia el norte del municipio, mientras que, en Tona, estas áreas se concentran en regiones montañosas del centro y sur. Este análisis, basado en un rango altitudinal que varía de 769 a 3948 metros, demuestra que las zonas más elevadas tienen mayor potencial para la generación de energía eólica, siendo prioritarias para el desarrollo de proyectos sostenibles en la región.

Figura 18. Mapa de áreas Óptimas de Proyectos eólicos



Fuente: Grupo Galileo, Universidad Industrial de Santander (UIS). Mapa de elevación de la provincia Soto Norte_SAM. (s.f.). [Imagen]. Datos Geográficos.

Teniendo en cuenta las áreas óptimas identificadas previamente, se realiza un análisis más detallado de cada una de las zonas de interés. Este análisis incluye el estudio de la velocidad del viento, uno de los factores clave para determinar el potencial de generación de energía eólica en cada área seleccionada.

Para ello, se recopilaban datos meteorológicos precisos obtenidos de las plataformas de MeteoBlue, los cuales permiten evaluar las características del recurso eólico en cada ubicación. En las siguientes secciones, se presentan los resultados del análisis para cada zona de interés. Cada área óptima es evaluada individualmente mediante gráficas que muestran la distribución de las velocidades del viento promedio en un año. Estas

gráficas permiten visualizar el comportamiento del recurso eólico en cada zona y establecer comparaciones entre ellas, facilitando la identificación de las áreas con mayor potencial para el desarrollo de proyectos eólicos.

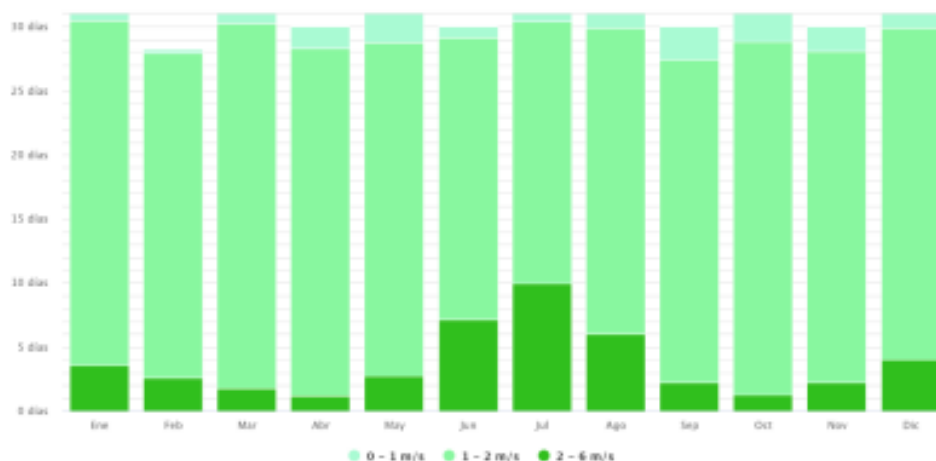
5.3.1. Zona de interés 1: Vetás, Santander.

La gráfica muestra el comportamiento de la velocidad del viento en la región de Vetás (3257 m s. n. m.) a lo largo del año. En el análisis mensual, se observa que la mayor parte del tiempo los vientos se mantienen dentro del rango de 1-2 m/s (color verde claro), lo que representa una velocidad moderada. El rango inferior, 0-1 m/s (verde muy claro), tiene una presencia notable, especialmente en algunos meses como abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre.

El rango superior, 2-6 m/s (verde oscuro), aparece en pocos días durante algunos meses, siendo junio, julio y agosto los periodos donde se registran los valores más altos en esta categoría. Particularmente julio destaca por tener una mayor cantidad de días con vientos en este rango superior.

Este comportamiento sugiere que, si bien predominan las velocidades moderadas, existen periodos, sobre todo en los meses de mitad de año, con velocidades de viento más elevadas que podrían ser más favorables para la generación eólica. Sin embargo, la intensidad promedio del recurso podría no ser suficiente para maximizar la eficiencia de los aerogeneradores sin un diseño optimizado que considere la variabilidad estacional. Es necesario considerar este análisis en conjunto con otros parámetros para determinar la viabilidad de proyectos eólicos en esta región.

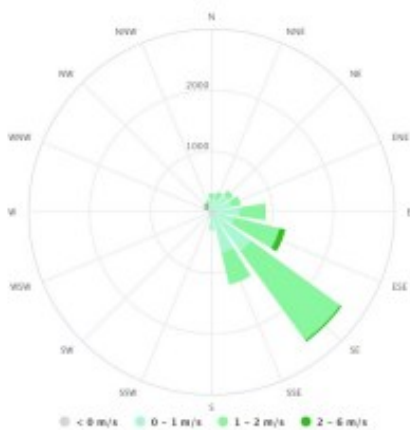
Figura 19. Datos histórica Vetas, Santander. Velocidad del viento vs Tiempo



Fuente: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/vetas_colombia_3666092

La rosa de los vientos de Vetas muestra una predominancia de vientos provenientes del ESE, con velocidades que oscilan mayormente entre 1 y 2 m/s. Aunque hay presencia de vientos más fuertes (2-6 m/s), estos son menos frecuentes. Esta información es crucial para evaluar el potencial eólico de la región, ya que la dirección y la velocidad del viento son factores determinantes en la eficiencia de los aerogeneradores.

Figura 20. Rosa de los vientos de Vetas, Santander.



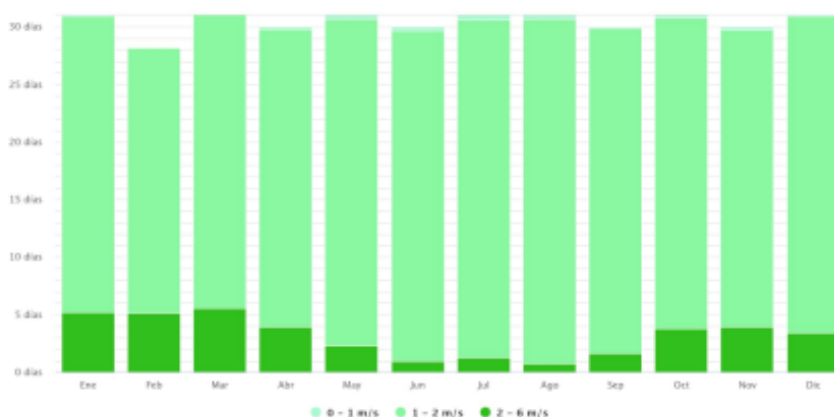
Fuente: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/vetas_colombia_3666092

5.3.2. Zona de interés 2: Charta.

La gráfica muestra el comportamiento de la velocidad del viento en la región de Charta (2000 m s. n. m.) a lo largo del año. En el análisis mensual, se observa que la mayor parte del tiempo los vientos se mantienen dentro del rango de 0-1 m/s (color verde claro), lo que representa una velocidad baja. El rango superior, 1-2 m/s (verde medio), aparece la mayor parte del tiempo durante todos los meses, siendo un viento moderado que podría limitar el potencial para generación eólica en esta zona.

El rango aún superior, 2-6 m/s (verde oscuro), aparece en pocos días durante algunos meses, siendo enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre los periodos donde se registran los valores más altos en esta categoría. Este comportamiento sugiere que, aunque existen periodos con velocidades de viento adecuadas, la intensidad promedio del recurso podría no ser suficiente para maximizar la eficiencia de los aerogeneradores sin un diseño optimizado. Es necesario considerar este análisis en conjunto con otros parámetros para determinar la viabilidad de proyectos eólicos en esta región.

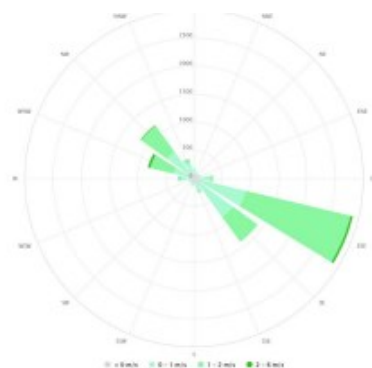
Figura 21. Datos histórica Charta, Santander. Velocidad del viento vs Tiempo



Fuente: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/chartres_francia_3026467

La rosa de los vientos de Charta muestra una clara predominancia de vientos provenientes del ESE, con velocidades que se concentran mayormente en el rango de 1 a 2 m/s. Si bien existen vientos más fuertes (2-6 m/s), estos son menos frecuentes y también se orientan principalmente hacia el ESE.

Figura 22. Rosa de los vientos de Charta, Santander



Fuente: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/chartres_francia_3026467

5.3.3. Zona de interés 3: Tona.

La gráfica muestra el comportamiento de la velocidad del viento en la región de Tona (1893 m s. n. m.) a lo largo del año. En el análisis mensual, se observa que la mayor parte del tiempo los vientos se mantienen dentro del rango de 1-2 m/s (color verde claro), lo que representa una velocidad moderada que podría limitar el potencial para generación eólica en esta zona.

El rango superior, 2-6 m/s (verde oscuro), aparece en pocos días durante algunos meses, siendo julio y diciembre los periodos donde se registran los valores más bajos en esta categoría. Por otro lado, los vientos de intensidad baja, de 0-1 m/s (color verde

muy claro), tienen una presencia mínima, lo que indica cierta constancia en las velocidades dentro del rango predominante.

Este comportamiento sugiere que, aunque existen periodos con velocidades de viento adecuadas, la intensidad promedio del recurso podría no ser suficiente para maximizar la eficiencia de los aerogeneradores sin un diseño optimizado. Es necesario considerar este análisis en conjunto con otros parámetros para determinar la viabilidad de proyectos eólicos en esta región.

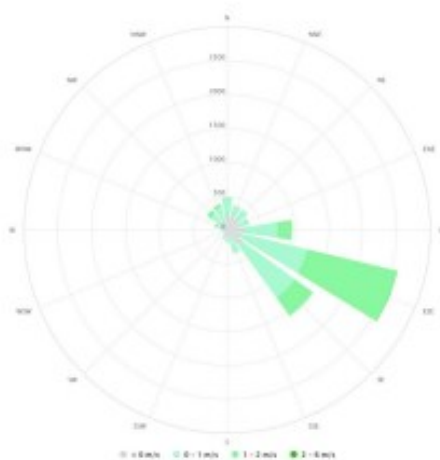
Figura 23. Datos histórica Tona, Santander. Velocidad del viento vs Tiempo



Fuente: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/tona_colombia_3666921

La rosa de los vientos de Tona muestra una clara predominancia de vientos del ESE, con velocidades que se concentran principalmente en el rango de 1 a 2 m/s. Si bien hay presencia de vientos más fuertes (2-6 m/s), estos son menos frecuentes.

Figura 24. Rosa de los vientos, Tona, Santander



Fuente: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/tona_colombia_3666921

Tras analizar las rosas de los vientos y las gráficas de velocidad anual para Tona, Charta y Vetás, se observa una predominancia constante de vientos del Este-Sureste (ESE) en las tres localidades, factor positivo para la orientación de aerogeneradores.

Sin embargo, difieren en las velocidades: Tona y Charta presentan mayormente velocidades moderadas (1-2 m/s) con menor presencia de vientos fuertes (2-6 m/s), mientras que Vetás destaca por una mayor frecuencia de estos últimos, especialmente entre junio y agosto, además de una mayor variabilidad anual. La baja presencia de calmas es común en las tres.

Por ello, Vetás se identifica como la zona con mayor potencial eólico debido a la mayor presencia de vientos en el rango 2-6 m/s, crucial para la generación de energía, y su mayor variabilidad anual que podría ser mejor aprovechada con tecnologías adecuadas.

6. CUANTIFICAR TEÓRICAMENTE EL POTENCIAL DE RECURSOS DISPONIBLES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA EN LA PROVINCIA SOTO NORTE DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER

Para esta última etapa del proyecto, se inicia con una verificación exhaustiva de la calidad y confiabilidad de los datos recopilados, contrastando los valores obtenidos con diversas fuentes para garantizar su precisión y consistencia. Este paso es esencial para minimizar errores y asegurar la validez de los resultados en las siguientes fases.

Posteriormente, se procede al cálculo del potencial de generación de energía eólica utilizando las metodologías seleccionadas en la primera etapa del proyecto. Este cálculo requiere la aplicación rigurosa de técnicas y modelos previamente escogidos, considerando las condiciones específicas del área de estudio y los datos verificados, con el fin de estimar de manera precisa los recursos disponibles y su capacidad para satisfacer las necesidades energéticas de la región.

En el procesamiento y análisis de datos, se emplea el software SAM (System Advisor Model) para realizar simulaciones detalladas. Inicialmente, se utiliza SAM para modelar y calcular el potencial de generación de energía, integrando los datos geográficos, meteorológicos y ambientales recopilados. Además, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar cómo diversas variables impactan en el rendimiento y viabilidad del proyecto. Entre estas variables destacan:

- **Zonas óptimas:** Se analiza cómo la selección de diferentes áreas afecta la producción y los costos asociados.
- **Costo de instalación:** Se evalúan variaciones en los costos debido a factores como la dificultad del terreno y la accesibilidad.
- **Dificultades de acceso y carreteras:** Se examina el impacto de la infraestructura vial sobre los costos y la factibilidad del proyecto.
- **Red eléctrica:** Se considera la proximidad y capacidad de la red para integrar la energía generada.

Finalmente, se realiza un análisis económico mediante simulaciones financieras para evaluar el impacto de estas variables en el retorno de inversión y en los costos nivelados de energía. Este enfoque integral permite tomar decisiones fundamentadas y optimizar el diseño del proyecto para maximizar su viabilidad técnica y económica.

6.1. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS EN SAM

Se estudiaron las tres zonas de interés (Tona, Charta y Veta) escogidas anteriormente teniendo en cuenta las restricciones y criticidades para evaluar su viabilidad en la implementación de energía eólica por medio del software SAM.

Figura 25. Selección de área óptima para parque eólico



Fuente: Google Earth

Posteriormente, se procedió a analizar los datos específicos de esta ubicación utilizando el software SAM (System Advisor Model) mostrado a continuación

6.1.1. Configuración simulador SAM

Para el desarrollo del proyecto en el software SAM, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

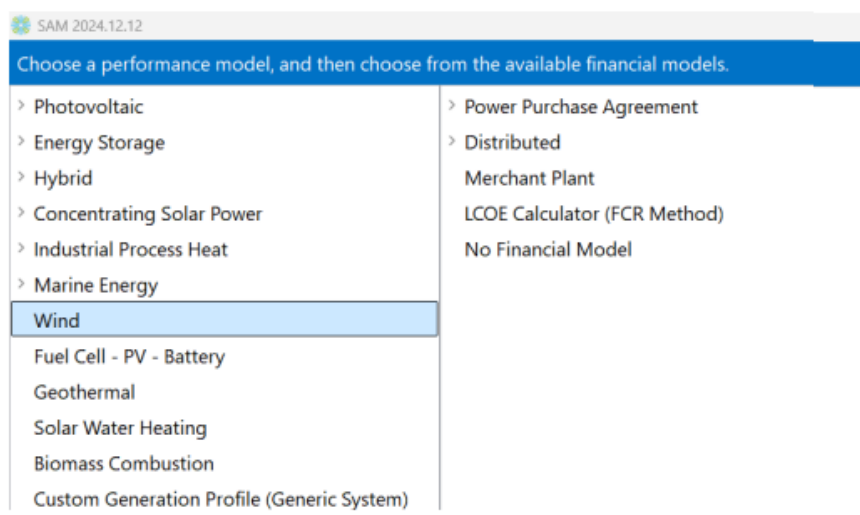
Figura 26. Inicio simulador SAM



Fuente: Software SAM

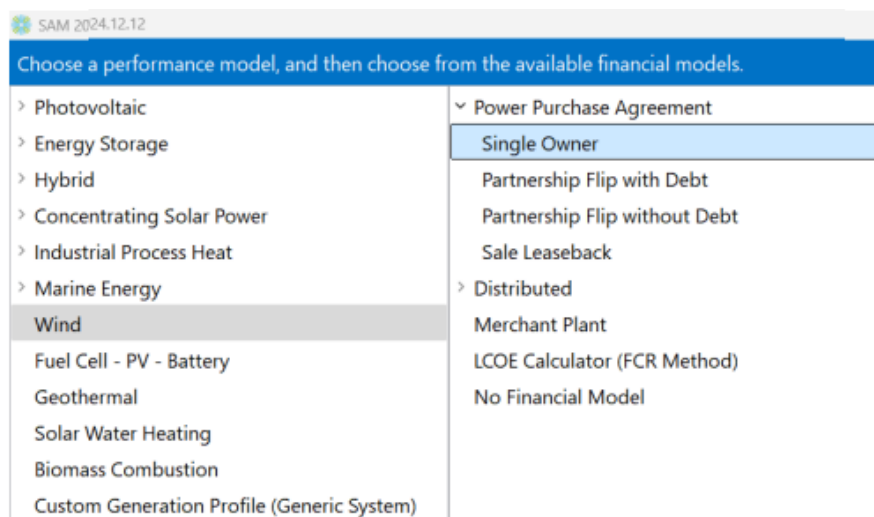
Como se observa en la Figura 24, SAM cuenta con diversas herramientas para realizar tareas, incluyendo la creación de scripts de programación y opciones para configurar proyectos. En este caso, se eligió la opción "Start a new project" (Iniciar nuevo proyecto).

Figura 27. Selección de modelo a simular



Fuente: Software SAM

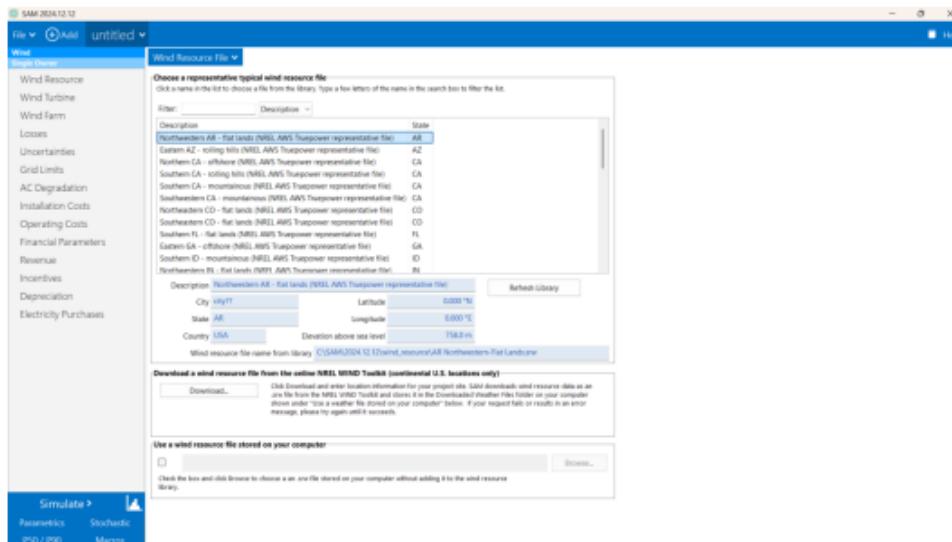
Figura 28. Selección de modelo de financiamiento



Fuente: Software SAM

Tras esta selección, se abre una ventana que permite definir el modelo de sistema a utilizar, con múltiples alternativas disponibles, como se aprecia en la Figura 26. Para este proyecto, se optó por el modelo de energía eólica (Wind), después se escoge el acuerdo de compra de energía (Power Purchase Agreement) y el esquema de propietario único (Single Owner). Una vez configurados estos parámetros, se confirma la selección con la opción "Ok".

Figura 29. Ingreso de datos Software SAM.

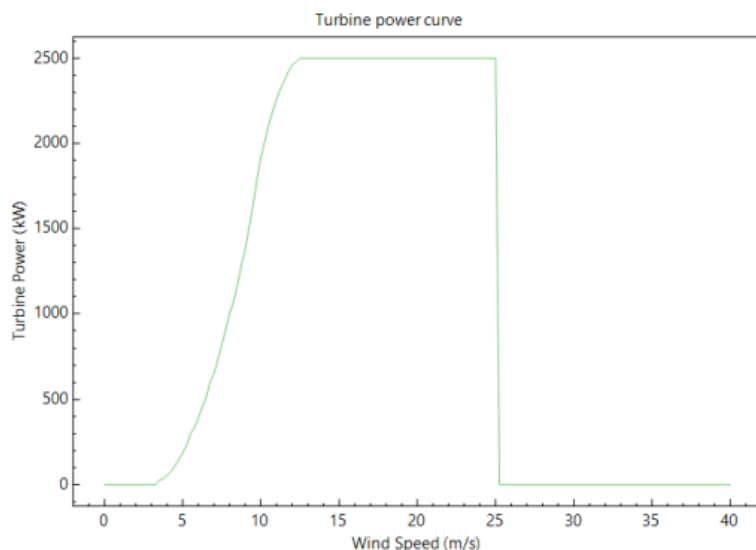


Fuente: Software SAM

Una vez seleccionado el modelo, el programa precargará de manera automática las configuraciones predeterminadas utilizadas para evaluar el sistema a implementar. En la figura 27 se ofrece un resumen de las características más relevantes del software SAM, las cuales son clave para el análisis y modelado de proyectos de energía, incluyendo factores como la ubicación, los recursos, y las variables económicas y financieras.

Después de realizar la carga de data que brindó el grupo de Geomática, se procedió a diseñar el parque eólico, definiendo el número de turbinas, su distribución y la capacidad de cada una. Dentro del catálogo de turbinas eólicas de SAM, se encuentra la referencia de GE 2.5xl para parques eólicos onshore, la cual cumple con todos los requisitos anteriormente mencionados.

Figura 30. Curva de potencia de la turbina “GE 2.5xl” en SAM



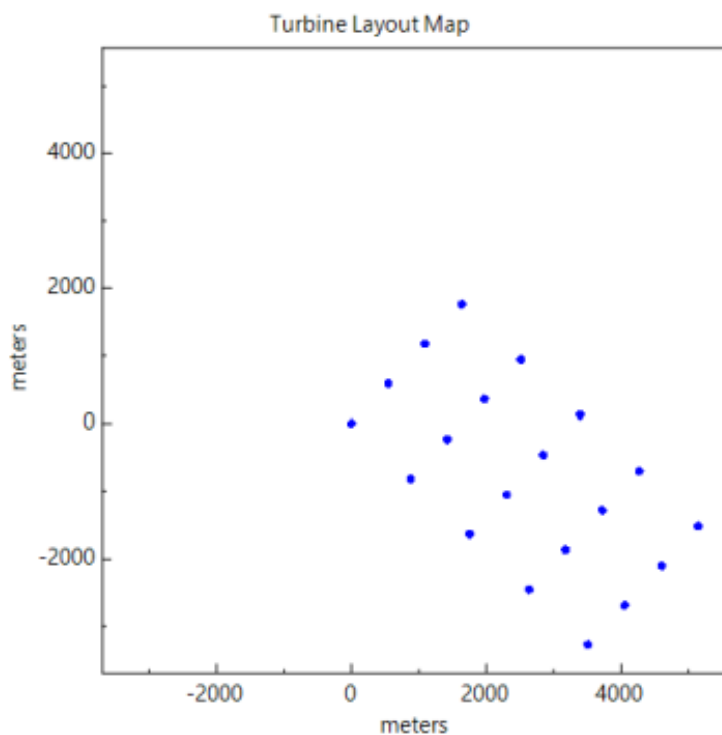
Fuente: Software SAM. Elaboración propia.

De acuerdo con Carvajal Romo et al.³⁸, la configuración de las turbinas eólicas debe considerar parámetros específicos de diseño. En este contexto, se recomienda que la separación entre turbinas sea equivalente a 12 diámetros de rotor en la dirección predominante del viento y a 3 diámetros de rotor en dirección perpendicular a esta. Según el IDEAM³⁹, en esta región, la dirección predominante del viento es desde el sureste (SE), con una ligera inclinación hacia el este-sureste (ESE).

³⁸ CARVAJAL-ROMO, Gabriele, et al. Assessment of solar and wind energy potential in La Guajira, Colombia: Current status, and future prospects. En: Sustainable energy technologies and assessments. Elsevier, 2016, vol. 36, p. 8.

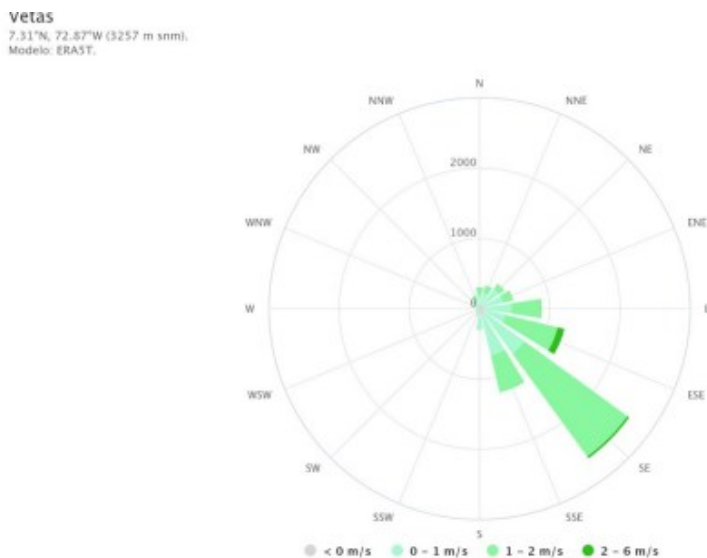
³⁹ RUIZ MURCIA, Jose Franklyn; SERNA CUENCA, Julieta & ZAPATA LESMES, Henry Josue. Atlas de Viento de Colombia. IDEAM & UPME. Bogotá D.C. 2017, p. 90.

Figura 31. Distribución espacial de las turbinas en el parque eólico modelado.



Fuente: Software SAM. Elaboración propia

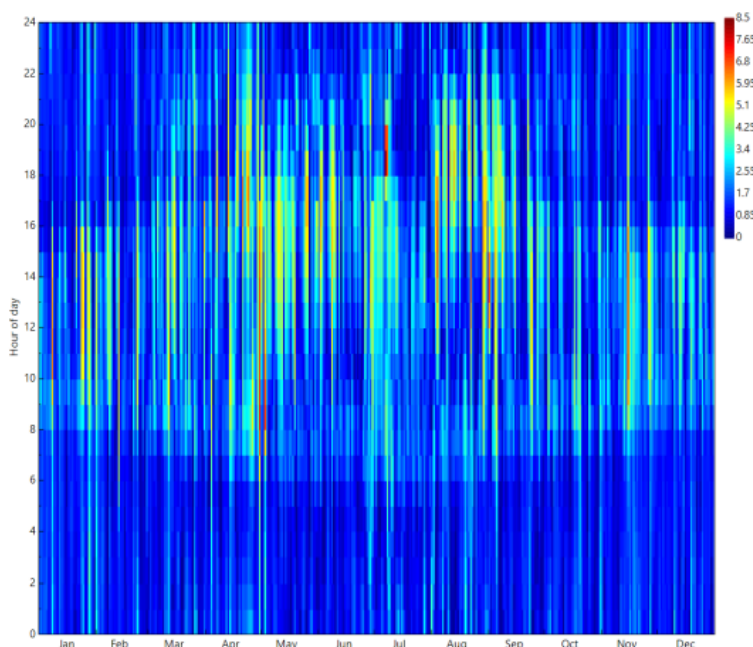
Figura 32. Rosa de los vientos Vetás, Santander



Fuente: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/vetas_colombia_3666092

Tras ejecutar la simulación en el software SAM, se generan diversas gráficas que permiten analizar variables clave, como la relación entre la velocidad del viento, expresada en m/s, y las horas del día a lo largo de todo el año en la localidad de Vetás que es el que mejor velocidad promedio de viento genera.

Figura 33. Mapa de calor de Velocidades del viento



Fuente: Software SAM

6.2. ANÁLISIS ECONÓMICO

En el análisis económico de un proyecto eólico, es posible identificar diversos factores que influyen en el costo total del proyecto. Según las metodologías propuestas por los autores en las referencias^{40,41} utilizadas para calcular el Costo Nivelado de Energía (LCOE) en parques eólicos, se consideran los siguientes aspectos clave: los costos fijos incluyen aquellos que no están directamente vinculados a los parámetros geoespaciales del sitio, sino que se determinan principalmente a partir de valores

⁴⁰ KAUSCHE, Michael, et al. Floating offshore wind - Economic and ecological challenges of a TLP solution. En: Renewable energy. Elsevier, octubre, 2018, vol. 126, p. 270-280

⁴¹ MAIENZA, C., et al. A life cycle cost model for floating offshore wind farms. En: Applied energy. Elsevier, 2020, vol. 266.

promedio de la industria. Por ejemplo, los precios de suministro de turbinas eólicas no dependen de las características físicas específicas del lugar del proyecto. Además, dentro de esta categoría se encuentran los costos de desarrollo, los cuales se dividen en cuatro componentes principales: ingeniería, permisos, caracterización del sitio y evaluación del desmantelamiento⁴².

Para realizar la estimación económica, se tienen en cuenta los costos fijos, los cuales, según el costo promedio reportado por SAM para turbinas instaladas en 2024, ascienden aproximadamente a \$1.112/kW. Además, mediante el uso de la herramienta "Balance of System Cost Model", SAM facilita el cálculo de los costos variables de los proyectos. Estos costos están determinados principalmente por factores como el tipo de subestructura utilizada, la complejidad del acceso al sitio y los procesos de fabricación, entre otros.

Para el análisis económico se consideró una vida útil de 20 años, una tasa de descuento anual del 8% y los costos operativos asociados. Con base en los datos proporcionados, se determinarán indicadores clave como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Costo Nivelado de la Energía (LCOE).

6.2.1. Valor presente neto (VPN):

El Valor Presente Neto (VPN) es una herramienta financiera utilizada para evaluar si un proyecto, como la construcción de un parque eólico, es rentable o no. Es una forma de medir cuánto dinero ganará o perderá un proyecto en el futuro, teniendo en cuenta el valor del dinero en el tiempo.

El VPN calcula cuánto vale en el presente todo el dinero que el proyecto ganará o gastará en el futuro. Esto se hace ajustando los flujos de efectivo (ingresos y gastos del proyecto) con una tasa de descuento, que representa el costo del dinero o el retorno esperado de una inversión alternativa.

⁴² BEITER, Philipp, et al. A Spatial-Economic Cost-Reduction Pathway Analysis for U.S. Offshore Wind Energy Development from 2015–2030. Estados Unidos. National Renewable Energy Laboratory. 2016.

La fórmula del VPN es:

$$VPN = \sum \frac{Flujo\ de\ efectivo(t)}{(1 + r)^t} - Inversión\ inicial \quad (5)$$

Donde:

- t : Año en el que ocurre el flujo de efectivo.
- r : Tasa de descuento.
- $Flujo\ de\ efectivo(t)$: Dinero neto que entra o sale en el año t .

Figura 34. Análisis del proyecto económico de energía

Annual AC energy in Year 1	69,929,072 kWh
Capacity	50,000 kW
Capacity factor in Year 1	16.0%
PPA price in Year 1	3.00 ¢/kWh
PPA price escalation	1.00 %/year
LPPA Levelized PPA price nominal	3.21 ¢/kWh
LPPA Levelized PPA price real	2.63 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy nominal	10.04 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	8.22 ¢/kWh
NPV Net present value	\$-43,380,780
IRR Internal rate of return	-61.79 %
Year IRR is achieved	20
IRR at end of project	-61.79 %
Net capital cost	\$86,850,792
Equity	\$34,754,268
Size of debt	\$52,096,520
Minimum DSCR	-0.14

Fuente: Software SAM

El proyecto tiene una capacidad instalada de 50 MW, lo que lo clasifica como un parque eólico de escala utility. Sin embargo, el desempeño energético es limitado, con una

producción anual de 69,929,072 kWh durante el primer año, lo que corresponde a un factor de capacidad del 16 %. Este valor es considerablemente bajo, ya que en proyectos eólicos eficientes el factor de capacidad suele oscilar entre el 30% y el 50%. Este indicador sugiere que el recurso eólico en el sitio seleccionado no es óptimo o que existen limitaciones en la tecnología utilizada.

Figura 35. Ingreso de datos costos de capital SAM

Capital Costs				
	Cost per kW +	Cost per turbine +	Fixed Cost =	Total
Turbine cost	\$1,112.40/kW	\$1,200.00/turbine	\$600.00	\$55,644,600.00
Balance of system cost	\$475/kW	\$700.00/turbine	\$300.00	\$23,764,300.00
Wind farm capacity	50,000 kW	Number of turbines	20	
- Sales Tax				
Sales tax basis, % of total equipment costs	7 %	Sales tax rate	5.0 %	\$277,931.15
- Total installed cost				
The total installed cost is the sum of the indirect, sales tax, and direct costs. Note that it does not include any financing costs from the Financial Parameters page.				
Total installed cost				\$79,686,831.15
Total installed cost per kW				\$1,593.74/kW

Fuente: Software SAM

En cuanto a los ingresos, el proyecto tiene un contrato de compraventa de energía (PPA) con un precio inicial de 3.00 ¢/kWh y una escalación anual del 1%. Aunque el precio incrementa moderadamente con el tiempo, sigue siendo insuficiente para cubrir los costos de generación. El LPPA (precio PPA nivelado) nominal y real son 3.21 ¢/kWh y 2.63 ¢/kWh, respectivamente, mientras que el LCOE (costo nivelado de la energía) nominal y real son significativamente más altos: 10.04 ¢/kWh y 8.22 ¢/kWh. Esta brecha indica que el costo de generación es mucho mayor que el ingreso esperado, lo que hace el proyecto económicamente inviable.

Desde el punto de vista financiero, el valor presente neto (NPV) es de – 43,383,780 USD, lo que refleja una pérdida considerable en el horizonte del proyecto. La tasa interna de retorno (IRR) es de -61,79%, confirmando que el proyecto no solo no genera beneficios, sino que tampoco recupera la inversión inicial. Incluso al final del proyecto, la IRR sigue siendo negativa, lo que subraya la falta de rentabilidad.

El costo de capital neto asciende a 866,850,792 USD, financiado con un 40% de capital propio (34,754,268 USD) y un 60% de deuda (52,096,520 USD). Sin embargo, el flujo de caja no es suficiente para cubrir los pagos de deuda, lo que se evidencia en un índice de cobertura de deuda (DSCR) negativo de -0.14. Este déficit severo pone en riesgo la sostenibilidad financiera del proyecto y su capacidad para cumplir con las obligaciones crediticias.

6.2.2. Factores determinantes en el costo del proyecto

Se reconocen varios elementos que inciden en el costo total del proyecto eólico. De acuerdo con los métodos sugeridos en investigaciones anteriores para determinar el Costo Nivelado de Energía (LCOE) en parques eólicos, se toman en cuenta los siguientes factores esenciales:

- **Costos fijos:** Se refiere a aquellos que no están relacionados con parámetros geoespaciales del lugar, sino que se establecen basándose en los valores medios de la industria. Por ejemplo, los costos de abastecimiento de turbinas eólicas no están sujetos a las propiedades físicas del lugar.
- **Costos de desarrollo:** Se segmentan en cuatro elementos clave: ingeniería, autorizaciones, descripción del lugar y evaluación del desmantelamiento.
- **Costos Variables:** Factores como el tipo de subestructura empleada, la

complejidad del acceso al lugar y los procesos de producción son determinantes.

Para la proyección financiera, se toman en cuenta costos fijos fundamentados en el costo promedio reportado por SAM para turbinas instaladas en 2024, que llegan cerca de \$1,112/kW. Adicionalmente, el recurso "Balance of System Cost Model" de SAM facilita el cálculo de los costos variables.

6.2.3. Proyección de producción e ingresos

La producción energética estimada en el primer año es de 69,929,072 kWh, con un escalamiento del PPA del 1% anual y una vida útil de 20 años. Se estima que los ingresos anuales crecerán en función de este incremento. Para calcular el Valor Presente Neto (VPN), se presenta la siguiente ecuación):

$$VPN = \sum \frac{Flujo\ de\ efectivo(t)}{(1 + r)^t} - Inversión\ inicial \quad (5)$$

Donde:

- n = 20 años (vida útil del proyecto)
- r = 8% (tasa de descuento anual)
- C0 = \$86,850,792 USD (inversión inicial)
- Ft = Flujo de caja estimado por año

El resultado indica un VPN negativo de -\$43,380,780 USD, lo que sugiere que el proyecto no es financieramente viable bajo las condiciones actuales.

Un VPN negativo implica que el proyecto no genera suficientes flujos de caja futuros descontados para recuperar la inversión inicial. En este caso, la magnitud del valor negativo es significativa, indicando que el proyecto está lejos de ser rentable.

Los principales factores que contribuyen a este resultado son:

- **Altos costos iniciales:** El capital total requerido es elevado, alcanzando \$86.85 millones USD.
- **Ingresos limitados:** A pesar del escalamiento del precio del PPA, el bajo factor de capacidad del 16% restringe la generación de ingresos.
- **Costos operativos y financieros:** Los costos de operación, mantenimiento y servicio de la deuda representan una carga significativa que reduce la rentabilidad. Se debe evaluar si existen oportunidades para reducir costos iniciales mediante acuerdos estratégicos con proveedores o incentivos gubernamentales, o si es posible incrementar los ingresos mediante una renegociación de las tarifas del PPA.

6.2.4. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR, calculada como -61.79%, refleja un rendimiento extremadamente bajo que no cumple con la tasa de descuento del 8%. Esto significa que el proyecto no es capaz de devolver la inversión inicial bajo los supuestos actuales. La TIR negativa implica que, incluso en el horizonte completo de 20 años, el proyecto no genera retornos suficientes para cubrir el costo del capital. Este resultado puede ser atribuido a:

- **Estructura financiera desequilibrada:** Aunque el apalancamiento puede ser útil para proyectos energéticos, la combinación actual de 60% deuda y 40% equity no logra generar retornos suficientes debido al bajo desempeño operativo.
- **LCOE elevado en comparación con el PPA:** El LCOE nominal es de \$0.1004/kWh, significativamente mayor al nivelizado del PPA nominal (\$0.0321/kWh). Este desajuste sugiere que los costos de producción son demasiado altos en comparación con los ingresos proyectados.

Tabla 4. Estructura de financiamiento

Componente	Valor (USD)	Porcentaje
Equity	\$34,754,268	40%
Deuda	\$52,096,520	60%
Total	\$86,850,792	100%

Fuente: Elaboración propia

La estructura de financiamiento muestra un apalancamiento significativo, con un 60% financiado a través de deuda. Sin embargo, el análisis del Minimum DSCR (-0.14) evidencia que el proyecto no es capaz de cubrir sus obligaciones financieras, lo cual incrementa el riesgo para los inversionistas y acreedores.

Tabla 5. Indicadores Clave

Indicador	Valor
VPN (USD)	-43,380,780
TIR (%)	-61.79
LCOE nominal (USD/kWh)	0.1004
LCOE real (USD/kWh)	0.0822
Minimum DSCR	-0.14

Fuente: Elaboración propia

El Costo Nivelado de Energía (LCOE) sigue siendo elevado, tanto en términos nominales como reales, y no es competitivo frente a otras fuentes de generación. Además, el Minimum DSCR negativo indica que el proyecto no genera ingresos suficientes para cubrir las obligaciones de deuda, lo que incrementa su riesgo financiero.

En conclusión, el estudio financiero del proyecto eólico muestra varias restricciones económicas que impactan en su factibilidad. El VPN negativo y la Tasa Interna de Rendimiento (TIR) considerablemente inferior a la tasa de descuento evidencian un rendimiento financiero deficiente para respaldar la inversión.

Adicional a ello, el desequilibrio entre los elevados gastos de producción y los ingresos previstos, sumado a un alto LCOE, empeoran la circunstancia. La actual estructura financiera no facilita la reducción del riesgo financiero, tal como lo evidencia el Minimum DSCR negativo. Así pues, para que el proyecto sea factible, sería imprescindible analizar las estimaciones operativas, financieras y de ingresos, con el objetivo de optimizar los gastos y optimizar los flujos de efectivo futuros.

7. CONCLUSIONES

- Se identificaron diversas metodologías utilizadas a nivel internacional para la evaluación del recurso eólico. Tras una comparación basada en sus ventajas, limitaciones y aplicabilidad al contexto colombiano, se seleccionó el uso del software System Advisor Model (SAM), dada su capacidad para integrar parámetros técnicos, económicos y ambientales.
- Esta elección permitió estructurar una evaluación más completa y rigurosa del potencial eólico en la provincia de Soto Norte. La recopilación y análisis de datos de la región permitió caracterizar las condiciones locales necesarias para evaluar el recurso eólico, incluyendo la velocidad promedio del viento, la topografía, el uso del suelo y las restricciones ambientales.
- Este análisis evidenció múltiples limitaciones para el desarrollo de proyectos eólicos, tales como la presencia de ecosistemas estratégicos como páramos y bosques andinos, áreas protegidas, territorios étnicos y zonas arqueológicas, que reducen significativamente la disponibilidad de áreas viables para la implementación de esta tecnología.
- A través de simulaciones realizadas en SAM, se estimó el potencial técnico de generación de energía eólica en Soto Norte. Sin embargo, los resultados arrojaron un factor de capacidad del 16 por ciento, muy por debajo del rango óptimo para proyectos rentables, que se encuentra entre el 30 y el 50 por ciento. Además, el análisis financiero reveló un Valor Presente Neto negativo de 43 millones de dólares, una Tasa Interna de Retorno de menos 61.79 por ciento y un Costo Nivelado de Energía de 10.04 centavos de dólar por kilovatio-hora, frente a un precio proyectado de venta de solo 3.21 centavos de dólar por kilovatio-hora.
- Estos resultados reflejan una inviabilidad económica evidente bajo las condiciones actuales.

- Si bien inicialmente se identificaron condiciones geográficas potencialmente favorables, la integración de los factores técnicos, ambientales y financieros concluye que el desarrollo de proyectos eólicos en la provincia de Soto Norte no es viable en la actualidad.
- No obstante, el enfoque metodológico aplicado y la evaluación detallada del territorio constituyen una herramienta útil para futuros estudios de energía eólica en otras regiones del país.
- Este trabajo contribuye al fortalecimiento del conocimiento sobre energías renovables en Colombia y a la toma de decisiones informadas en el marco de la transición energética y la diversificación de la matriz energética nacional. El desarrollo de este trabajo permitió consolidar una metodología integral para la evaluación del potencial de energía eólica en regiones específicas del país, articulando herramientas técnicas como el software SAM con el análisis de datos geográficos, meteorológicos y ambientales.
- Este enfoque puede servir como modelo replicable en otras zonas del territorio nacional, contribuyendo al fortalecimiento del conocimiento técnico en energías renovables.
- Finalmente, este estudio evidencia la importancia de realizar análisis previos rigurosos antes de promover proyectos de generación eólica en nuevas regiones del país. Aunque los resultados no fueron favorables en términos de viabilidad técnica y económica, la investigación aporta insumos clave para la toma de decisiones estratégicas en el marco de la transición energética, promoviendo una planificación más precisa y sostenible del recurso eólico en Colombia.

8. RECOMENDACIONES

Con base en las conclusiones obtenidas en el presente estudio, se recomienda fomentar la participación de las comunidades locales en las fases de diseño y planificación de proyectos energéticos; esta participación debe incluir procesos de consulta previa y mecanismos de concertación que respeten y consideren las particularidades sociales, culturales y económicas de cada región. Asimismo, se enfatiza la necesidad de priorizar la realización de estudios de impacto ambiental y social detallados, que permitan garantizar la sostenibilidad a largo plazo de las iniciativas energéticas. Estos estudios deben ser considerados como herramientas fundamentales para la toma de decisiones responsables y basadas en evidencia.

Con respecto a la viabilidad técnica y económica de la energía eólica en Colombia, se recomienda realizar un análisis comparativo en otras regiones del país que presenten condiciones más favorables para la implementación de proyectos piloto. Se sugiere priorizar aquellas zonas con mayores velocidades promedio del viento y con menores restricciones desde el punto de vista ambiental y social, con el propósito de maximizar las oportunidades para el desarrollo eficiente de fuentes de energía renovable a escala nacional.

Paralelamente, se considera esencial fortalecer la base de datos climática en las regiones identificadas como prioritarias para el desarrollo energético. Esto debe lograrse mediante investigaciones orientadas a la recolección sistemática, estandarización y análisis de datos meteorológicos precisos, con el objetivo de reducir los niveles de incertidumbre en los modelos predictivos y mejorar la calidad de las simulaciones técnicas.

Se sugiere explorar otras fuentes de energía renovable complementarias en la región, como la solar fotovoltaica o la biomasa, las cuales podrían presentar mejores condiciones de aprovechamiento dadas las limitaciones identificadas para la energía

eólica. Esta diversificación ayudaría a fortalecer la matriz energética local y avanzar hacia un modelo más sostenible y resiliente.

Para futuras investigaciones, sería recomendable incluir visitas de campo que permitan verificar las posibles variaciones climáticas asociadas al cambio climático, con el fin de obtener datos más precisos y actualizados que complementen los análisis realizados, considerando su impacto directo en el potencial de generación de energía eólica.

Por último, se recomienda investigar y documentar los incentivos gubernamentales disponibles, así como explorar programas de financiamiento que permitan reducir los costos de inversión y operación en proyectos de energía renovable. La identificación y aprovechamiento de estos mecanismos contribuirá a mejorar la competitividad del sector y a facilitar su expansión en el contexto energético nacional.

BIBLIOGRAFÍA

Alex. (2024, 17 abril). Global Wind Report 2024. Global Wind Energy Council. <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>. Consultado el 5 de octubre de 2024.

BALLESTEROS, Loreta Michael Biviana. Identificación de la calidad de agua para consumo humano de la provincia Soto Norte del departamento de Santander en el año 2019-2022 a través de revisión.

CATÁLOGO NACIONAL de Estaciones. IDEAM [página web]. (12, diciembre, 2023). [Consultado el 20, septiembre, 2024]. Disponible en Internet: <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/IDEAM/vfi6-fe9z>.

CHADEE, X. T., & CLARKE, R. M. (2014). Large-scale wind energy potential of the Caribbean region using near-surface reanalysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 30.

EL GUARDIÁN del Tiempo | Meteostat. The Weather's Record Keeper | Meteostat [página web]. [Consultado el 10, noviembre, 2024]. Disponible en Internet: <https://meteostat.net/es/>.

GALILEO, UIS. (2024). "Datos Geográficos y Mapas de Soto Norte". Grupo Galileo, Universidad Industrial de Santander. GALILEO UIS. Mapas geográficos y meteorológicos para la evaluación del potencial eólico en Santander. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2023.

GÓMEZ, J., et al. (2020). "Evaluación de herramientas para proyectos eólicos". SciELO. Disponible en: www.scielo.org.

GUAJARDO CANTÚ, Gerardo y ANDRADE DE GUAJARDO, Nora E. (2012). Contabilidad para no contadores [en línea]. 2 ed. México: McGraw-Hill Interamericana. 425 p. [Consultado el 6 de diciembre de 2016]. Disponible en: Base de datos McGraw Hill. <http://ezproxy.uao.edu.co:2061/book.aspx?i=372>

IDEAM. (2023). Atlas de Viento de Colombia. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

LETCHER, TREVOR. (2017). Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. Academic Press, Elsevier.

MANWELL, J. F., McGOWAN, J. G., & ROGERS, A. L. (2010). WIND ENERGY EXPLAINED Theory, Design and Application (2da ed.). Wiley-VCH.

MORENO, J. et al. (2022). Análisis del recurso eólico en regiones montañosas de Colombia. Energías Renovables y Sostenibles, [En línea]. Disponible en: Redalyc.

MUÑOZ, R., et al. (2019). "Potencial eólico en Colombia: un enfoque regional". Redalyc. Disponible en: www.redalyc.org.

PA2 - Anemómetro de Cazoletas - Sensovant. Sensovant [página web]. [Consultado el 2, diciembre, 2024]. Disponible en Internet: <https://sensovant.com/productos/meteorologia/sensores-viento-mecanicos/anemometrode-cazoletas/>.

REN21. (2024). Renewables 2021 Global Status Report, p. 80.

SAM. (2022). Guía de Introducción de System Advisor Model (SAM). [en línea]. Disponible en: https://sam.nrel.gov/images/web_page_files/sam-getting-started-fortranslation-2020-12-16-spanish.pdf. Consultado el 12 de agosto de 2024.

SORNSSEN, B. (2017). Renewable energy: Physics, engineering, environmental impacts, economics and planning (5a ed.). Academic Press.

TIEMPO VETAS - meteoblue. [página web]. [Consultado el 15, diciembre, 2024]. Disponible en Internet: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/vetas_colombia_3666092.

UPME. (2006). Velocidad del viento en superficie. <https://www.upme.gov.co/Docs/MapaViento/CAPITULO1.pdf>.

OpenFAST documentation — OpenFAST v4.0.0 documentation. (s/f). Readthedocs.io.
Recuperado el 20 de octubre de 2024, de <https://openfast.readthedocs.io/en/main/>