



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

ANÁLISIS DEL POTENCIAL EÓLICO EN ZONAS RURALES DEL DEPARTAMENTO
BOYACÁ PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE GENERACIÓN A PEQUEÑA
ESCALA MEDIANTE DATOS SATELITALES

Presentado para obtener el título de

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

José Elías Muñoz Rubio

Santiago Andrés Barrera Sotelo

Dirección:

Andrés Mauricio Pérez Gordillo

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

José Elías Muñoz Rubio:

A Dios, por concederme la pasión y el propósito de trabajar por un futuro energético sostenible. A mi familia, por su amor y apoyo incondicional en cada objetivo de mi vida. A mis profesores, por su guía y enseñanza; y a mis amigos, por su apoyo constante que hicieron ameno y propicio el proceso de aprendizaje.

Santiago Andrés Barrera Sotelo:

A Dios, por brindarme la oportunidad, la fortaleza y la sabiduría necesarias para seguir adelante y alcanzar mis metas, A mi abuelita, mi madre y mi hermano, quienes han sido los pilares fundamentales de mi vida. Su amor, sacrificio y apoyo incondicional me han guiado en cada paso y me han enseñado el verdadero valor del esfuerzo y la perseverancia.

AGRADECIMIENTOS

iii

Agradecemos a nuestro tutor y guía, Ingeniero Mauricio Pérez, por su conocimiento, dedicación y tiempo, así como por la orientación y acompañamiento constante brindados durante el desarrollo de este trabajo, haciendo posible su culminación con éxito.

De igual manera, expresamos nuestro sincero agradecimiento a nuestros amigos y compañeros, quienes estuvieron presentes día a día en este proceso, brindándonos su apoyo, compañía y palabras de aliento que fueron fundamentales para alcanzar este logro.

El presente estudio evalúa el potencial eólico en tres zonas rurales del departamento de Boyacá (Samacá, Soracá y Sotaquirá) con el objetivo de analizar la viabilidad técnica de implementar sistemas de microgeneración eólica orientados a actividades agropecuarias, especialmente el riego agrícola, para esto se utilizaron bases de datos satelitales provenientes de NASA POWER y del Global Wind Atlas (GWA) para caracterizar el recurso eólico mediante la distribución de Weibull y simulaciones en el software WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program).

Los resultados evidenciaron diferencias entre ambas fuentes de información: los datos del GWA tienden a sobreestimar las velocidades del viento frente a los de NASA POWER, que incorporan condiciones más realistas del terreno, sin embargo, la comparación entre las estimaciones estadísticas (Weibull) y las simulaciones en WAsP mostró que, aunque los valores de energía anual generada difieren, ambos métodos confirman la viabilidad de la microgeneración eólica en las zonas seleccionadas. Finalmente, se identificó que una turbina de 6 kW es capaz de satisfacer la demanda energética de sistemas de bombeo para el riego de parcelas agrícolas de hasta 10 hectáreas, demostrando que la energía eólica puede contribuir de manera efectiva al desarrollo sostenible y a la seguridad hídrica del sector agrícola rural en Boyacá.

This study assesses the wind energy potential in three rural areas of the Boyacá department (Samacá, Soracá, and Sotaquirá) to analyze the technical feasibility of implementing small-scale wind generation systems for agricultural activities, particularly irrigation. Satellite databases from NASA POWER and the Global Wind Atlas (GWA) were used to characterize the wind resource through the Weibull distribution and simulations in the WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) software.

The results revealed discrepancies between both datasets: GWA tends to overestimate wind speeds compared to NASA POWER, which incorporates more realistic surface and roughness conditions. Comparing the Weibull-based energy estimations with WAsP simulations showed consistent results in identifying the technical feasibility of small-scale wind generation in the study areas. A 6-kW wind turbine was determined to meet the pumping energy demand required for irrigation systems in agricultural plots of up to 10 hectares, demonstrating that wind energy can effectively contribute to sustainable development and water security in Boyacá's rural sector.

TABLA DE CONTENIDO

v

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2 OBJETIVOS	3
2.1.1 Objetivo general.....	3
2.1.2 Objetivos específicos	3
Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	4
Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	7
4.1.1 Tipos de máquinas Eólicas.....	9
Capítulo 5 METODOLOGÍA	11
5.1.1 Definición y Delimitación del Área de Estudio.....	11
5.1.2 Análisis del Potencial Eólico	13
5.1.3 Modelación y Simulación:	14
Software Especializado:.....	14
5.1.4 Visualización:	14
5.1.5 Evaluación Técnica de Turbinas Eólicas	14
5.1.6 Simulación del Rendimiento:.....	15
5.1.7 Integración de Resultados y Elaboración del Informe Final.....	16
Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
6.1.1 Análisis de áreas con potencial Eólico en Boyacá.....	17
6.1.2 Selección de Áreas de Estudio.....	17
6.1.3 Análisis de Bases de Datos Satelitales para la Evaluación del Potencial Eólico en Boyacá ¹⁹	
6.1.4 Análisis del Potencial Eólico en Boyacá	22
6.1.5 Velocidades de Viento y Requisitos para HAWT	24
6.1.6 Impacto de la Rugosidad del Terreno	24
6.1.7 Topografía y Turbulencia Local	24
6.1.8 Selección de la turbina a pequeña Escala HAWT y VAWT	25
6.1.9 Análisis	25
6.1.10 Comparación entre las HAWT y VAWT.....	26
6.1.11 Rendimiento en Rangos de Velocidades de Viento Moderadas	26
6.1.12 Tamaño y Escalabilidad.....	27
6.1.13 Impacto Ambiental.....	27
6.1.14 Altura de Instalación	28
6.1.15 Ventajas y Desventajas	28
6.1.16 Resultados de Evaluación	29
6.1.17 Sistemas de bombeo para riego agrícola.....	30
6.1.18 Determinación de Áreas de Influencia de Cultivos	30
6.1.19 Descripción de las Áreas de Estudio.....	31
6.1.20 Metodología para el Cálculo de Caudal y Potencia de Bombeo.....	33
6.1.21 Resultados del Dimensionamiento Preliminar.....	34
6.1.22 Consideraciones Finales.....	35

6.1.23	Selección de aerogeneradores	35vi
6.1.24	Caracterización del viento a diferentes alturas y Distribución de Weibull.....	45
6.1.25	Frecuencia y distribución de velocidades	46
6.1.26	Cálculo de energía producida.....	55
6.1.27	Comparación y validación del aerogenerador seleccionado.....	58
6.1.28	Análisis de Generación Energética Mediante Simulación en WASP.....	59
6.1.29	Comparación entre Resultados de Weibull y WASP con Datos de NASA POWER	65
Capítulo 7	CONCLUSIONES	68
REFERENCIAS.....		69

LISTA DE TABLAS

vii

Tabla 1. Comparación de base de datos de viento. Fuente: Propia.....	21
Tabla 2. Clasificación del Potencial Eólico según la Velocidad del Viento. Tomado de [28].	23
Tabla 3. Evaluación cualitativa de alternativas en aerogeneradores a pequeña Escala HAWT vs VAWT, Fuente: Propia.	29
Tabla 4. Resumen de características técnicas de aerogeneradores comerciales de pequeña escala. Fuente: Propia.	36
Tabla 5. Correlación y relaciones estadísticas entre principales variables técnicas. Fuente: Propia	40
Tabla 6. Aerogeneradores comerciales a pequeña escala preseleccionados.	41
Tabla 7. Resultados de la distribución de Weibull a 15 m para Sotaquirá. Fuente: Propia.	48
Tabla 8. Frecuencia de ocurrencia por clase de velocidad del viento a 15 m (Samacá). Fuente: Propia.	51
Tabla 9. Resultados de la distribución de Weibull a 15 m para Soracá. Fuente: Propia.	54
Tabla 10. Estimación de energía anual generada para el caso de Sotaquirá (Henryd Wind Power 5 kW). Fuente: Propia.	55
Tabla 11. Estimación de energía anual generada para el caso de Samacá (Henryd Wind Power 5 kW). Fuente: Propia.	56
Tabla 12. Estimación de energía anual generada para el caso de Soracá (Henryd Wind Power 5 kW). Fuente: Propia.	57
Tabla 13. Estimación de energía anual generada con el aerogenerador BRAUN 5.5 kW a 20 metros (Caso Sotaquirá). Fuente: Propia.	59
Tabla 14. Comparación de parámetros eólicos simulados en WASP para la ubicación de Soracá a 15 m utilizando datos de NASA POWER y GWA. Fuente: Propia.	60
Tabla 15. Comparación de parámetros eólicos simulados en WASP para la ubicación de Sotaquirá a 15 m utilizando datos de NASA POWER y GWA. Fuente: Propia.	62

LISTA DE FIGURAS

viii

Figura 1. Panémonas. Tomado de [15].	7
Figura 2. Molino Holandés. Tomado de [15].	8
Figura 3. Evolución del tamaño y tecnología de los aerogenerados. Tomado de [16].	9
Figura 4. Molinos de Eje Horizontal. Tomado de [17].	9
Figura 5. Análisis de Potencia desarrollada por una turbina de 20 kW VAWT y HAWT. Tomado de [32].	26
Figura 6. Áreas de cultivos en Samacá para aprovechamiento de sistema de riego. Fuente: Propia a partir de información geoespacial procesada en QGIS.	31
Figura 7. Áreas de cultivos en Soracá para aprovechamiento de sistema de riego. Fuente: Propia a partir de información geoespacial procesada en QGIS.	32
Figura 8. Áreas de cultivos en Sotaquirá para aprovechamiento de sistema de riego. Fuente: Propia a partir de información geoespacial procesada en QGIS.	33
Figura 9. Velocidad de inicio (m/s) vs Potencia (kW). Fuente: Propia.	38
Figura 10. Distribución de potencias (kW). Fuente: Propia.	39
Figura 11. Relación del diámetro del rotor con respecto a la potencia generada. Fuente: Propia.	39
Figura 12. Curva de potencias de aerogeneradores de Potencia 5kW. Fuente: Propia.	42
Figura 13. Curva de potencias de aerogeneradores de Potencia 5.5 kW a 6 kW. Fuente: Propia.	43
Figura 14. Comparación entre grupo 1 y grupo 2. Fuente: Propia.	44
Figura 15. Histograma de frecuencias de velocidad de viento a 15 m. Fuente: Propia.	47
Figura 16. Curva de duración de velocidad del viento a 15 m. Fuente: Propia.	48
Figura 17. Comparación entre la distribución empírica (NASA) y el ajuste teórico de Weibull a 15 m (Sotaquirá). Fuente: Propia.	49
Figura 18. Histograma de frecuencias de velocidad de viento a 15 m (Samacá). Fuente: Propia.	50
Figura 19. Curva de duración de velocidad del viento a 15 m (Samacá). Fuente: Propia.	51
Figura 20. Comparación entre la distribución empírica y el ajuste de Weibull a 15 m (Samacá). Fuente: Propia.	52
Figura 21. Histograma de frecuencias de velocidad de viento a 15 m (Soracá). Fuente: Propia.	53
Figura 22. Curva de duración de velocidad del viento a 15 m (Soracá). Fuente: Propia.	53
Figura 23. Comparación entre la distribución empírica y el ajuste de Weibull a 15 m (Soracá). Fuente: Propia.	54
Figura 24. Mapa de curvas de nivel y ubicación del sitio de instalación de la turbina en el municipio de Soracá. Fuente propia mediante software WAsP.	62
Figura 25. Mapa de curvas de nivel y ubicación del sitio de instalación de la turbina en el municipio de Sotaquirá. Fuente propia mediante software WAsP.	63
Figura 26. Comparación de energía generada entre Weibull y WAsP. Fuente: Propia.	66

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El creciente interés por la energía renovable y su transición hacia fuentes más sostenibles ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas que no solo contribuyan a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino también a la seguridad energética de diversas regiones, encontrándose así la fuente eólica que se destaca como una de las soluciones más prometedoras, especialmente para áreas rurales y regiones con alta disponibilidad del recurso eólico.

A nivel mundial, diversos países han avanzado en la implementación de sistemas de energía eólica a gran y pequeña escala, impulsados por el interés en reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los efectos del cambio climático, tales son los casos de regiones como Europa, Estados Unidos, y China en los que el uso de la energía eólica ha aumentado considerablemente en los últimos años, contribuyendo a una reducción significativa en la huella de carbono del sector energético y agrícola, sin embargo, a pesar de estos avances, la adopción de sistemas de generación eólica a pequeña escala en muchos países sigue siendo limitada, especialmente en zonas rurales donde los recursos eólicos no se han evaluado de manera adecuada [1].

En este contexto, el departamento de Boyacá, Colombia, ha mostrado un notable potencial para la generación de energía eólica debido a sus características geográficas y vientos predominantes en ciertas zonas, sin embargo, a pesar de su capacidad de instalación, los proyectos eólicos en Colombia aún son limitados representando solo el 0.1% de la capacidad total del Sistema Interconectado Nacional (SIN), en comparación con las más ampliamente adoptadas energías solares fotovoltaicas, y reflejando una necesidad urgente de evaluar y seleccionar tecnologías adecuadas para aprovechar este recurso natural de forma eficiente y económica [2] [3].

En particular, regiones como La Guajira, Boyacá, y Bolívar presentan condiciones favorables para la implementación generación eólica a pequeña escala, especialmente en actividades agropecuarias como el riego agrícola, dando lugar a este estudio, que se enfoca en la evaluación del potencial eólico en tres ubicaciones clave de Boyacá, Samacá, Sotaquirá, y Soracá, utilizando herramientas avanzadas como el software WAsP (Wind

Atlas Analysis and Application Program) para estimar la producción energética de aerogeneradores de pequeña escala con la utilización de datos del recurso eólico extraído de la NASA POWER y el Global Wind Atlas (GWC), con el fin de comparar la consistencia y sensibilidad de ambas fuentes para la estimación de producción energética a nivel local.

Se busca indagar sobre la posibilidad de aprovechamiento de la energía eólica como una alternativa viable y accesible para los pequeños productores agrícolas, contribuyendo no solo a la sostenibilidad energética sino también al desarrollo de sus actividades económicas como la agricultura en las zonas rurales de Boyacá, además, se analiza la viabilidad de implementar turbinas de generación a pequeña escala orientadas a las condiciones locales del viento y las necesidades energéticas de las zonas seleccionadas [4].

Este trabajo también incluye una comparación entre las fuentes de datos utilizadas para la evaluación del recurso eólico extraídos de la NASA POWER y el Global Wind Atlas (GWC) comparables mediante la estimación de la producción de energía anual con la turbina seleccionada, simulados en el software WAsP versión 12. Adicionalmente, se menciona la selección de la tecnología de la turbina eólica que se basó en un análisis detallado de las condiciones locales de viento y las necesidades energéticas de las zonas rurales de Boyacá. Tras evaluar distintas opciones comerciales, se optó por turbinas de eje horizontal (HAWT) de pequeña escala, dada su eficiencia comprobada en la conversión de energía eólica a electricidad, especialmente en condiciones de viento moderado.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo general

Evaluar técnicamente el potencial eólico en zonas rurales seleccionadas del departamento de Boyacá mediante datos satelitales y simulaciones computacionales, con el fin de determinar la viabilidad de implementar sistemas de generación a pequeña escala.

2.1.2 Objetivos específicos

1. Identificar zonas rurales del departamento de Boyacá con condiciones favorables para la implementación de sistemas eólicos a pequeña escala.
2. Simular el comportamiento del viento y la producción energética potencial mediante el uso del software WAsP, para evaluar la generación esperada en cada sitio según los datos de potencial eólico provenientes de bases de datos.
3. Determinar la viabilidad técnica para la implementación de proyectos eólicos a pequeña escala para la generación de energía eléctrica en el departamento de Boyacá.

Capítulo 3

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Las evidencias son cada día más que contundentes, el cambio climático está ocurriendo y las consecuencias ambientales, sociales, económicas y sanitarias son notorias en diversas regiones del mundo, como los impactos severos sobre la población, y dado que la producción de energía fósil es uno de los principales responsables de este, se debe proceder a la búsqueda de alternativas de generación eléctrica entre las cuales se destaca la generación de energía aprovechando la velocidad del viento [5].

La adecuación de los sistemas de generación hacia energía más limpias es importante si se consideran los reportes de impacto ambiental en Colombia asociadas a la generación de energía fósil, como es un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero [6]. También se busca lograr una ampliación de la matriz energética en Colombia, ya que esta matriz energética en la actualidad es fundamentada en la generación hidroeléctrica, siendo expuesta a la fluctuación de las variaciones climáticas, en especial en períodos de sequía. La riqueza de Colombia en recursos hídricos explica que actualmente entre el 65% y 70 % de la generación de energía se realiza con fuentes hidráulicas [7].

En Colombia existen poblaciones rurales, e incluso urbanas, que no tienen acceso a la red eléctrica nacional y donde el establecimiento de sistemas alternativos a pequeña escala sería una opción sostenible para el suministro de energía limpia, aunque con la desventaja de los altos costos de este. Uno de los retos en los sistemas de autogeneración con energías renovables y a pequeña escala, es que su masificación no ha sido la esperada, a pesar de los beneficios ambientales e incentivos tributarios que estas ofrecen, así como la necesidad de la sustitución de los sistemas tradicionales. Si bien en Colombia se vienen implementando sistemas de generación y autogeneración, están implementados en su mayoría con energía solar fotovoltaica, con un porcentaje de participación en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) de 6.46 % de la capacidad total instalada, mientras los proyectos eólicos son limitados y tan solo representan un 0.1 % [8].

Colombia cuenta con un potencial en energía eólica de 30 GW [9], distribuido de manera heterogénea a lo largo del territorio nacional, con prevalencia de vientos en algunos sectores de velocidades iguales o superiores a 5 m/s, pero con un comportamiento no

uniforme, pues depende de factores geográficos, climáticos y de estacionalidad, ya que las velocidades del viento pueden variar entre periodos secos y húmedos. El potencial es evidente en la alta Guajira, Isla de Providencia, algunos sectores de Boyacá y el centro del litoral Caribe del departamento de Bolívar. Se destacan 16 lugares a nivel nacional donde las intensidades de viento son importantes para su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica, además, tres sitios donde los vientos son persistentes y superiores a 5 m/s durante todo el año, Galerazamba en Bolivar, Gachaneca en el departamento de Boyacá y la Isla de San Andrés [10].

El departamento de Boyacá presenta lugares con condiciones que podrían ser aprovechadas para la autogeneración eólica debido a su topografía montañosa y su ubicación en la región andina de Colombia, donde se encuentran corrientes de viento constantes y moderadas. según el capítulo 4 del Atlas de Viento del Ideam, el departamento de Boyacá cuenta con 2 lugares específicos, Gachaneca y Villa del Carmen [10].

Los datos sobre el recurso eólico de Boyacá no consta de una bibliografía extensa y son limitados, debido a escasez de Estaciones Meteorológicas con equipos que realicen la medición de la velocidad y dirección del viento de forma local, esto basados en el estudio realizado por Lilia Rincón Torres [11], donde hace un análisis del potencial eólico en la ciudades principales del departamento de Boyacá a través de datos de las estaciones meteorológicas instaladas por el Ideam, y en donde explica la dificultad en la obtención de los datos y la falta de muchos de ellos en años y meses generando poca densidad de datos para un análisis más robusto. Teniendo en cuenta la escasez de datos medidos en campo, el presente trabajo se enfocará en el análisis de base de datos satelitales confiables: Nasa Power Data y GWA, los cuales tienen datos históricos que hacen posible un análisis profundo y acertado. En el caso de GWA la base está construida sobre modelos mesoescalares alimentados con series temporales de aproximadamente 10 a 30 años de información histórica de viento, mientras que para Nasa Power, se decidió acotar el análisis únicamente al año 2023, debido a que esta selección permite concentrarse en un período reciente y representativo, facilitando la validación y comparación de resultados con otros estudios.

La implementación de autogeneración eólica en Boyacá contribuiría a la diversificación de las fuentes energéticas del departamento, reduciendo su dependencia de la red eléctrica nacional y fortaleciendo la resiliencia energética de comunidades rurales, apoyando la transición energética de Colombia hacia fuentes renovables no convencionales, alineándose con la Ley 1715 de 2014 [12]. Por otro lado, esta tecnología tiene un impacto ambiental bajo, no produce emisiones de gases de efecto invernadero y posicionaría a Boyacá como un modelo sostenible en la generación de energía limpia.

Finalmente, entre 2021 y 2024, las tarifas de energía en Colombia experimentaron un incremento anual promedio del 15,3%, alcanzando en 2022 un aumento histórico del 28,5% [13]. Este encarecimiento se atribuye a factores como el alza en el Índice de Precios al Productor (IPP), que en agosto de 2022 registró un crecimiento anual del 29,2%, y al impacto del fenómeno de El Niño, lo anterior provocó un aumento del 227% en los precios de la energía en bolsa, afectando la negociación de contratos y, consecuentemente, las tarifas al consumidor final. Factores como la estructura tarifaria que incluye componentes como generación, transmisión, distribución, comercialización, restricciones y pérdidas han contribuido al incremento sostenido de los costos de la energía eléctrica en el país, estos precios altos de la energía y su tendencia a la alza producen una ventaja en el cierre financiero de proyectos con fuentes renovables generando retornos de inversión en tiempos inferiores a 3 años, promoviendo la viabilizarían y el desarrollo de proyectos energéticos a través de energía eólica.

Capítulo 4

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

El uso de la energía proveniente del viento se remonta alrededor del 3500 a 5000 a.C, con el transporte marítimo de Egipcios y Sumerios en el mediterráneo y Nilo, posteriormente los Griegos construyeron máquinas que funcionaban con viento, de acuerdo con la historia desde hace aproximadamente 3000 a.C la energía del viento fue la propulsora para la molienda de granos [14].

Las primeras máquinas eólicas datan del siglo VI d.C, diseñadas con eje vertical y fueron las propicias para moler granos y bombear agua en las regiones de Irán y Afganistán, estos molinos también fueron conocidos con el nombre de panémonas [15]. A continuación, en la figura 1 se muestra la representación gráfica del sistema.

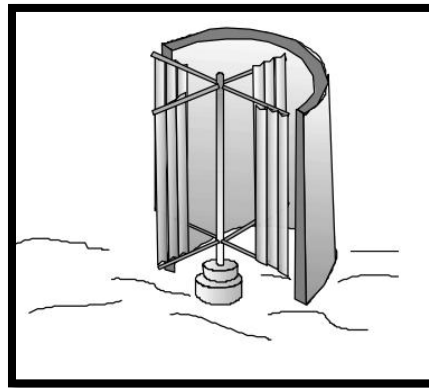


Figura 1. Panémonas. Tomado de [15].

Durante el feudalismo se construyeron innumerables molinos y fue hasta el año XIV que los holandeses lideraron el mejoramiento de los molinos utilizados para drenar las regiones pantanosas del río Rin. A finales del siglo XV se construyeron los primeros molinos de viento con la finalidad de elaborar aceites, papel y procesamiento de madera [15].

A Inicios del siglo XVI comenzó su uso en drenajes de “polders” o humedales, empleando máquinas de hasta 37 kW (50 HP) cada una, ya cerca del siglo XIX cerca de 9000 unidades de molinos operaban en Holanda, con potencias de hasta 65 kW (90 HP).⁵ Dinamarca también contaba con cerca de 3000 molinos para uso industrial y alrededor de 30.000 en casas o granjas, suministrando una potencia equivalente a 200 MW [15]. En la figura 2 se muestra el tipo de molino utilizado.

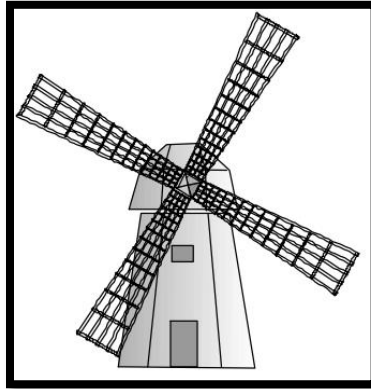


Figura 2. Molino Holandés. Tomado de [15].

Con la llegada de la revolución industrial y las máquinas de vapor la utilización de los molinos de viento decayó debido al uso masivo de máquinas térmicas o motores eléctricos, durante esa época el molino eólico no participaba como fuente de generación de energía eléctrica.

La concientización sobre el agotamiento de los recursos energéticos no renovables y el aumento del impacto al medio ambiente de los combustibles fósiles y la energía nuclear, sumado a las alzas en los precios de combustibles de la década de los 70, impulsaron la búsqueda de abastecimiento energético alternativo, avivando el interés por el aprovechamiento del recurso eólico.

En 1887, el inventor estadounidense Charles Francis Brush, construyó el primer aerogenerador multipala de corriente continua con una potencia de 12 kW, la cual es considerada como la primera máquina para generación de electricidad, este aerogenerador se constituía de 144 palas con un diámetro de rotor de 17 metros fabricado en madera, este aerogenerador sirvió para cargar baterías de plomo ácido, teniendo una vida útil de aproximadamente 20 años [15].

En el año 1891, el físico danés Poul la Cour logró mejorar el rendimiento del aerogenerador de Charles F. Brush, al concluir que disminuyendo el número de palas del rotor se aumentaba la producción de energía eléctrica, Poul la Cour construyó la primera turbina eólica para generar electricidad en Askov, Dinamarca, el físico danés es considerado como el pionero de los aerogeneradores y de la aerodinámica moderna [15].

El tamaño de los aerogeneradores sigue aumentando en la actualidad en pro de conseguir reducir el precio del kilovatio-hora generado, convirtiendo a la energía eólica como una de las fuentes alternativas no convencionales más competitiva, con el avance en la electrónica de potencia se han obtenidos sistemas más complejos, de mayor eficiencia y potencia. En la siguiente figura se muestra la evolución referencial del tamaño y desarrollo de los aerogeneradores a partir de 1980.

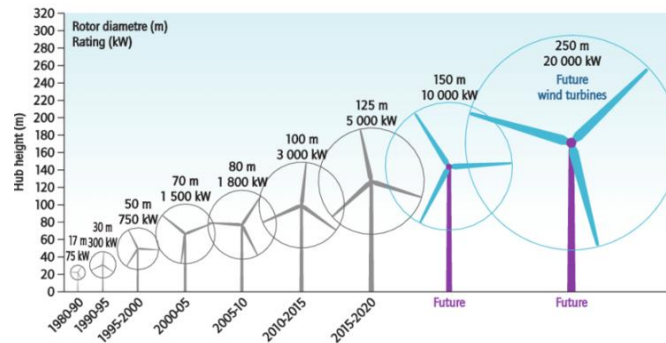


Figura 3. Evolución del tamaño y tecnología de los aerogenerados. Tomado de [16].

La tendencia de los aerogeneradores es que aumenten su altura como la longitud de sus palas para obtener mayor potencia, la energía eólica fue impulsada desde el año 2000 debido a la influencia de la electrónica de potencia en su sistema [16].

4.1.1 Tipos de máquinas Eólicas

De acuerdo con la posición del eje de rotación los aerogeneradores se dividen en dos categorías principales. La primera son maquinas eólicas en las cuales el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento, son los más difundidos y los que han permitido obtener mayores eficiencias de conversión, el generador eléctrico se encuentra acoplado al eje del rotor.

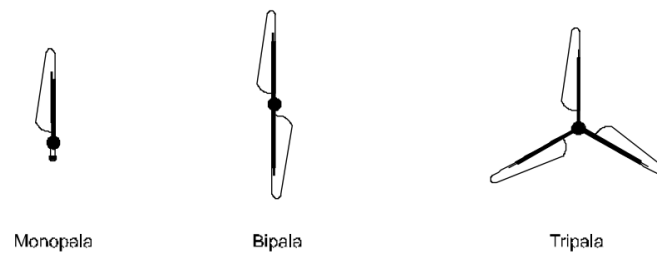


Figura 4. Molinos de Eje Horizontal. Tomado de [17].

Como se pudo observar en la figura 4, son máquinas eólicas en las cuales el eje de rotación es perpendicular a la superficie terrestre y a la dirección del viento. Ahora bien, la segunda categoría son aerogeneradores de eje vertical que tienen la ventaja de que no requieren sistemas de orientación, por su disposición permite colocar los sistemas de conversión prácticamente a nivel de suelo, evitando pesadas cargas de las torres, como ocurre con las de eje horizontal.

Existen dos diseños básicos de rotores de eje vertical:

Savonius: El rotor trabaja esencialmente por arrastre, tiene un alto par de arranque, pero su eficiencia es pobre, por su sencillez y su costo bajo es preferida en aplicaciones artesanales, es empleada en aplicaciones de potencias pequeñas como es el caso de los extractores de aire en grandes edificios industriales o depósitos y en bombes de agua.

Darrieus: Inventada en la década de los años 20 en Francia por G.J.M Darrieus, son las actuales competidoras de los aerogeneradores de eje horizontal, las fuerzas dominantes son las de la sustentación, tienen un par de arranque prácticamente nulo, pero entregan potencias altas por unidad de peso del rotor y por unidad de costo.

Capítulo 5

METODOLOGÍA

5.1.1 Definición y Delimitación del Área de Estudio

Selección del Área:

- Identificación Preliminar: Realizar una revisión bibliográfica de estudios previos que identifiquen áreas con potencial eólico en Boyacá.
- Consultar bases de datos geospaciales para identificar posibles zonas de interés.

Criterios de Selección:

- Características geográficas y topográficas favorables: se priorizan zonas de páramo, laderas y corredores de valle donde la aceleración del viento es más significativa y la accesibilidad permite considerar la instalación de turbinas a pequeña escala.
- Disponibilidad de datos meteorológicos históricos: tanto en registros satelitales (NASA POWER y GWA) como en estaciones cercanas del IDEAM que permitan validar tendencias.
- Potencial eólico mínimo aceptable: se consideraron como favorables los sitios con velocidades medias de viento superiores a 5 m/s a 10 m de altura, de acuerdo con la literatura para la viabilidad de pequeñas turbinas.
- Clasificación en mapas del GWA: se priorizaron áreas asociadas a velocidades medias del viento cercanas o superiores a 5 m/s a 20 m de altura, las cuales son consideradas óptimas para el aprovechamiento de proyectos eólicos de pequeña escala, que indican una mayor densidad de potencia eólica y, por lo tanto, mejor aprovechamiento del recurso.

Selección de la turbina a pequeña Escala HAWT y VAWT

- Análisis de ventajas y desventajas para la selección de la mejor solución entre las tecnologías de la turbina de eje horizontal vs eje vertical.
- Se caracterizaron 49 turbinas de pequeña escala disponibles comercialmente, con potencias que varían desde 1 kW hasta 6 kW, seleccionadas a partir de información técnica proporcionada en sitios web de fabricantes y distribuidores especializados.

- Se recopilaron parámetros clave como curvas de potencia, diámetros de rotor, alturas de buje y rangos de operación para construir una base de comparación.
- Se consideraron turbinas con diferentes rangos de potencia y geometrías de rotor, de modo que la selección final cubriera desde soluciones residenciales (1–2 kW) hasta aplicaciones productivas pequeñas (5–6 kW). Esta amplitud permite analizar cómo la disponibilidad de recurso eólico en el área de estudio puede satisfacer demandas energéticas asociadas al riego de cultivos rurales de referencia, lo que vincula directamente el análisis con una posible aplicación práctica.

Recopilación y Procesamiento de Datos Meteorológicos

Fuentes de Datos:

- NASA POWER: Descargar datos como velocidad y dirección del viento, temperatura y presión atmosférica, variables que permitirán validar la coherencia física del comportamiento del viento, pero antes de su uso, se realizará un proceso de depuración del dataset que incluirá la identificación y eliminación de valores faltantes, inconsistencias y registros atípicos, así como la estandarización de unidades y formatos, garantizando que la información utilizada en la caracterización estadística y en las simulaciones posteriores cuente con la calidad necesaria para obtener resultados confiables.
- GLOBAL WIND ATLAS: Extraer información detallada sobre patrones de viento a diferentes alturas, dependiendo de la tecnología a implementar, horizontal HAWT o VAWT,
- Recopilar información histórica de velocidad y dirección del viento proveniente de las bases de datos como el IDEAM, entidad que centraliza los registros meteorológicos del país a través de sus estaciones climatológicas.

Preprocesamiento de Datos:

- Limpieza de Datos: Eliminar valores atípicos y datos inconsistentes Rellenar datos faltantes utilizando técnicas de interpolación y estimación.
- Normalización: Asegurar la consistencia en unidades de medida y formatos de datos y Estandarizar los datos para facilitar el análisis comparativo.

5.1.2 Análisis del Potencial Eólico

Método de Ley de Potencias: o Utilizar la ecuación para estimar la velocidad del viento a diferentes alturas, conforme a la utilización de tecnología de generador eléctrico HAWT o VAWT.

$$V_h = V_r \left(\frac{h}{h_r} \right)^\alpha \quad (1)$$

- V_h : Es la velocidad del viento a la altura h (en metros). Es el valor que se desea calcular.
- V_r : Es la velocidad del viento medida o conocida a una altura de referencia
- h_r (en metros). Es la altura de referencia a la cual se mide la velocidad del viento
- α : Es el exponente de la ley de potencia el cual describe la variación de la velocidad del viento con la altura.

Valores típicos de α según [18] son:

Terreno liso (mar o desierto): $\alpha \approx 0.10-0.16$

Zonas rurales con baja vegetación: $\alpha \approx 0.16-0.20$

Áreas urbanas o terrenos boscosos: $\alpha \approx 0.20-0.40$

Determinar el valor de α adecuado para las ubicaciones seleccionadas del departamento de Boyacá mediante análisis de datos históricos [18].

Método Logarítmico:

- Aplicar la ecuación para ajustar los datos de velocidad del viento.

$$V_h = V_r \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_r/z_0)} \quad (2)$$

- Identificar y calcular la altura de rugosidad z_0 del terreno mediante base de datos satelitales [18].

Distribución de Weibull:

La variabilidad del viento se integrará mediante la parametrización de la distribución de Weibull, ajustando sus parámetros a partir de los datos de velocidad extrapolados a

las alturas de interés. Con estos parámetros se construirá la función de densidad de probabilidad que describe la frecuencia con la que ocurren distintas velocidades dentro del periodo analizado, lo que permitirá incorporar la variabilidad temporal del viento en el cálculo de energía disponible, asegurando que las estimaciones no dependan solo de valores promedio sino de todo el comportamiento estadístico del recurso eólico en cada sitio.

5.1.3 Modelación y Simulación:

Software Especializado:

- Para el presente estudio se utiliza el software WAsP 12 (Wind Atlas Analysis and Application Program). Esta herramienta permite llevar a cabo una simulación detallada del comportamiento del viento en las áreas seleccionadas, proporcionando información crítica para la planificación de proyectos eólicos. Mediante WAsP 12 se generan resultados precisos como el perfil horario de potencia esperada, permitiendo conocer la cantidad de energía que potencialmente se generaría hora a hora con las turbinas seleccionadas.

5.1.4 Visualización:

- Generar mapas temáticos para la caracterización espacial de la velocidad del viento y del potencial eólico en las zonas seleccionadas del departamento de Boyacá, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (GIS), los cuales permiten representar visualmente la distribución del recurso eólico, identificar gradientes de velocidad y localizar áreas estratégicas para la instalación de aerogeneradores.

5.1.5 Evaluación Técnica de Turbinas Eólicas

Criterios de Selección de Modelos:

- Capacidad de generación adecuada para pequeñas escalas conforme a la disponibilidad del mercado.
- Eficiencia y rendimiento en condiciones específicas de Boyacá.
- Requerimientos de mantenimiento y durabilidad.
- Perfiles en curvas de potencias

Fuentes de Información:

- Catálogos de fabricantes
- Estudios de casos similares
- Páginas Web
- Tiendas On line

5.1.6 Simulación del Rendimiento:**Modelación:**

- Simular el rendimiento de las turbinas seleccionadas en las ubicaciones propuestas utilizando software especializado como WAsP 12, con el fin de obtener una estimación precisa de la generación energética.
- Considerar factores como turbulencia, obstrucciones y variaciones estacionales del viento, aspectos que afectan directamente el comportamiento real del recurso eólico.
- Alturas de instalación según el fabricante de la turbina.
- Selección de rugosidad del terreno.

Cálculo de Producción:

La producción anual de energía eólica para cada sitio fue estimada utilizando dos enfoques complementarios:

- Mediante el uso de WAsP 12, considerando las curvas de potencia de las turbinas seleccionadas y el perfil de viento modelado para cada sitio de estudio, para calcular la energía generada.
- A partir de los datos satelitales extraídos del GWA y NASA POWER, se realizó una caracterización del viento en Excel, utilizando la distribución de Weibull, la ley de potencias para extrapolación vertical de velocidades, y la curva de potencia de la turbina para estimar la energía generada.

Esta comparación permitió validar la coherencia de los resultados obtenidos, identificar posibles desviaciones entre ambas metodologías, y determinar cuál de las dos fuentes de datos (GWA o NASA POWER) ofrecía mayor ajuste a las condiciones locales de cada

sitio. Además, este análisis cruzado contribuye a aumentar la confiabilidad de la simulación final, al integrar tanto modelado especializado como cálculos analíticos detallados.

5.1.7 Integración de Resultados y Elaboración del Informe Final

En esta etapa se integraron los resultados obtenidos del modelado y simulación del potencial eólico con el software WASP 12 y los cálculos analíticos realizados en Excel, con el objetivo de derivar conclusiones técnicas y estratégicas sobre la viabilidad de implementar turbinas eólicas a pequeña escala en el departamento de Boyacá.

Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1.1 Análisis de áreas con potencial Eólico en Boyacá

La selección de sitios para la implementación de proyectos eólicos de pequeña escala en el departamento de Boyacá es un paso fundamental para el presente análisis, ya que a partir de estas áreas de referencia se procederá con los análisis detallados mediante metodologías como la distribución de Weibull, ley de potencia y la utilización del software WAsP 12, que permiten modelar y predecir el comportamiento del recurso eólico en las zonas de interés, también se presenta la identificación de los sitios potenciales para la implementación de proyectos eólicos con base en la revisión de literatura científica y el análisis del Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia, con el objetivo de evaluar su viabilidad para futuras aplicaciones.

6.1.2 Selección de Áreas de Estudio

El punto de partida para la identificación de sitios con potencial eólico en Boyacá se basa en los resultados plasmados en el Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia, elaborado por el IDEAM, este detallada la distribución del recurso eólico en el país, dicho estudio destaca a la localidad de Gachaneca del municipio de Samacá en el departamento de Boyacá Latitud $5^{\circ} 26'$ y Longitud $73^{\circ} 33'$ como una de las 16 zonas con mayor potencial a nivel nacional, resaltando sus velocidades de viento superiores a 5 m/s y persistentes, a una altura de 10 metros, con base en registros recopilados durante más de 10 años por el IDEAM, lo que refuerza la confiabilidad de los datos. De igual manera, la estación meteorológica de Los Monjes (municipio de Sotaquirá-Boyacá) ha registrado una velocidad promedio de 4.57 m/s, lo que la convierte en una opción viable para proyectos de generación distribuida en zonas rurales [10].

Otros estudios desarrollados en el ámbito académico han conseguido evaluaciones de potenciales eólicos en otros municipios del departamento de Boyacá, por ejemplo, el estudio realizado por Siabato Benavides [19] identificó varias zonas con potencial eólico significativo en Boyacá, incluyendo Gachaneca, Villa del Carmen y Samacá, donde se han registrado velocidades de viento que oscilan entre 5 y 7 m/s a una altura de 10 m, lo que consolida su idoneidad para la implementación de proyectos eólicos a pequeña escala.

Estas evaluaciones permiten enfocar el análisis en áreas específicas dentro del departamento, facilitando la posterior toma de decisiones sobre los sitios de mayor interés. Por otro lado, el estudio de Álvarez Castañeda et al. [20], analizó el potencial eólico en el Alto de Soracá, Tunja, cuyo resultado demuestra que esta área cuenta con una velocidad promedio de 6.7 m/s a 10 m de altura, con una persistencia del viento del 64.11% del tiempo, además, las zonas elevadas dentro de la Cordillera Oriental han sido identificadas en varios estudios como áreas donde el viento puede acelerarse debido a la interacción con la topografía, lo que indica un recurso eólico significativo en estos terrenos, no obstante, estas regiones montañosas también presentan desafíos logísticos y económicos, como se menciona en el estudio de Clifton Andrew et al. [21], debido a la complejidad en el transporte de materiales e instalación de aerogeneradores en terrenos con pendientes pronunciadas y difícil acceso.

Adicionalmente, de acuerdo con el estudio de Rincón Torres [11], se han analizado las principales ciudades del departamento de Boyacá, como Tunja, Duitama y Sogamoso, con el fin de determinar su viabilidad para proyectos de generación eólica, estas ciudades registran velocidades de viento en el rango de 3 a 4 m/s, estos valores resultan insuficientes para justificar proyectos de generación a gran escala, sin embargo, el estudio establece las siguientes recomendaciones para la implementación de microgeneración eólica en áreas urbanas:

- Tunja: La viabilidad de la microgeneración es limitada debido a velocidades de viento promedio de 3 a 4 m/s. Sin embargo, podría explorarse la instalación de aerogeneradores de pequeña escala en edificaciones con exposición favorable al viento y con integración a sistemas fotovoltaicos.
- Duitama: Con una velocidad promedio de viento de 3.2 m/s a 20 metros de altura, no presenta viabilidad técnica para la instalación de aerogeneradores con alturas inferiores a este umbral, por lo que su aprovechamiento requeriría estructuras más elevadas para mejorar el rendimiento energético.

- Sogamoso: Con velocidades promedio de 3.18 m/s a 20 metros de altura, la instalación de aerogeneradores es viable únicamente si se implementan a alturas superiores a los 20 metros.

Con base en esta recopilación de información, se han identificado tres sitios como los más relevantes para la implementación de proyectos eólicos de pequeña escala en Boyacá: Samacá, Alto de Soracá y Sotaquirá, descartando las zonas urbanas de acuerdo a los resultados expuestos anteriormente. Los sitios han sido seleccionados debido a su combinación de velocidades de viento favorables, validación en múltiples estudios y condiciones geográficas que permitirían su aprovechamiento, por ejemplo, Sotaquirá se destaca por sus velocidades de viento superiores a 5 m/s y su persistencia a lo largo del año, lo que los hace viables para la generación distribuida [19], Samacá, además de contar con condiciones similares, se encuentra en una ubicación estratégica para la integración con la red eléctrica regional [10], y por su parte, el Alto de Soracá ha sido identificado con un potencial excepcional, con velocidades promedio de 6.7 m/s, aunque con desafíos logísticos que deberán ser considerados [20]. Estos tres sitios representan las mejores opciones para estudios más detallados sobre la viabilidad técnica y económica de proyectos eólicos en el departamento.

6.1.3 Análisis de Bases de Datos Satelitales para la Evaluación del Potencial Eólico en Boyacá

El análisis del recurso eólico requiere bases de datos confiables que permitan evaluar con precisión las condiciones del viento en un territorio determinado, tradicionalmente las mediciones de viento se obtienen a través de estaciones meteorológicas terrestres, sin embargo, la cobertura espacial de estas estaciones es limitada, especialmente en regiones con topografía compleja como Boyacá, en este contexto, el uso de bases de datos satelitales es una alternativa clave para la caracterización del recurso eólico en zonas donde las mediciones in situ son escasas o inexistentes. Entre las bases de datos satelitales más utilizadas en estudios de energía eólica destacan GWA y NASA Power, las cuales han sido ampliamente empleadas en diversas investigaciones para evaluar el potencial eólico a nivel global y regional.

GWA, desarrollado por el Banco Mundial y la Universidad Técnica de Dinamarca, proporciona datos de viento con una resolución espacial de hasta 250 metros, permitiendo modelados de alta precisión mediante la integración de modelos topográficos y validación en campo. Por otro lado, NASA Power, basado en la reanálisis del modelo MERRA-2, ofrece datos de viento con una resolución espacial de 50 km, siendo particularmente útil para estudios de tendencias climáticas de largo plazo y evaluaciones del recurso eólico a gran escala [22].

El uso de estas herramientas ha permitido mejorar la comprensión del recurso eólico en diferentes regiones, ofreciendo información complementaria a las mediciones terrestres, no obstante, cada una de estas bases de datos presenta ventajas y limitaciones, lo que hace necesario evaluar cuál de ellas es más adecuada para el análisis específico del recurso eólico en Boyacá, en este sentido, resulta esencial examinar investigaciones previas que han empleado estas bases de datos en distintos estudios eólicos, lo que permite comprender su aplicabilidad y limitaciones en contextos diversos.

En diversos estudios, GWA y NASA Power han sido empleados para estimar variables clave como la velocidad del viento, la densidad de energía eólica y la variabilidad temporal del recurso, donde esta estructuración y análisis de parámetros han permitido desarrollar metodologías replicables en diversos contextos geográficos, ejemplo de ello es el estudio de Ruiz (2021) [23] en el que se evaluó la viabilidad de un parque eólico offshore en España utilizando GWA como fuente principal para la caracterización del recurso eólico, y donde se aplicó la distribución de Weibull para modelar la velocidad del viento, junto con técnicas de interpolación espacial para mejorar la resolución de los datos, sin embargo, a pesar de proporcionar una visión general del potencial eólico en la región de estudio, se identificaron ciertas limitaciones en GWA, especialmente relacionadas con su resolución espacial y la necesidad de validación con mediciones in situ poniendo en evidencia la importancia de complementar los datos satelitales con mediciones locales, garantizando una estimación más precisa del recurso eólico, siendo una metodología relevante en regiones con condiciones orográficas complejas, como es el caso de Boyacá, donde la variabilidad del viento puede estar influenciada por la topografía del terreno [24] [22].

Por otro lado, NASA Power ha sido empleado en investigaciones que buscan evaluar la disponibilidad del recurso eólico en distintos contextos energéticos, como ejemplo está el estudio de Mena (2023) [25], que analiza la producción de hidrógeno verde a partir de energía eólica y emplea NASA Power como fuente principal de datos climáticos, donde se destaca la utilidad de esta base de datos para la evaluación de tendencias energéticas a largo plazo, permitiendo un análisis detallado del comportamiento del viento en diferentes periodos temporales, no obstante, también se evidenció que la precisión de estos datos satelitales puede variar en función de factores como la ubicación geográfica, la dinámica atmosférica local y la altura de referencia utilizada en los modelos, a continuación, en la tabla 1, se muestra la comparativa entre las bases de datos satelitales.

Tabla 1. Comparación de base de datos de viento. Fuente: Propia.

Aspecto	Nasa Power	Global Wind Atlas
Resolución Espacial	50 km ² (0.5° x 0.5°)	250 m
Cobertura Temporal	Datos desde 1981	Basado en simulaciones promedio (WRF)
Propósito	Climatología general y tendencias regionales	Análisis específico del potencial eólico
Validación Local	Limitada a modelos de reanálisis (MERRA-2)	Incluye mediciones de campo validadas
Modelos Utilizados	MERRA-2 (reanálisis climático)	WRF (Weather Research and Forecasting)
Uso Ideal	Estudios preliminares y globales	Proyectos específicos y locales

Ambas plataformas tienen aplicaciones específicas dependiendo de los objetivos del proyecto, sin embargo, otros estudios han demostrado que GWA y NASA Power presentan características complementarias en la estimación del recurso eólico, lo que sugiere que su

uso conjunto podría mejorar la precisión en estudios regionales y locales. Existen investigaciones como la de Gruber (2019) [26] que ha evaluado la capacidad de GWA para corregir sesgos en datos provenientes de modelos de reanálisis como MERRA-2, empleado en NASA Power, demostrando que la integración de ambas fuentes puede reducir errores en la estimación de la velocidad del viento y la potencia generada.

De manera similar, el estudio de Bosch et al. (2017) [27] comparó la resolución espacial y temporal de ambas bases de datos, concluyendo que GWA es más preciso en escalas locales debido a su mayor resolución espacial (250 m frente a 50 km en NASA Power), mientras que NASA Power es más útil para evaluar tendencias a largo plazo debido a su cobertura temporal más extensa, además, se encontró que, en regiones montañosas, como es el caso de Boyacá, los modelos de reanálisis como MERRA-2 tienden a subestimar la aceleración del viento, mientras que GWA incorpora efectos orográficos que pueden mejorar la precisión en este tipo de terrenos.

Con base en lo descrito anteriormente, se puede concluir que la selección de zonas para el análisis de velocidad del viento requiere un enfoque meticuloso en la topografía y su precisión, esto se debe a que, para pequeñas turbinas eólicas que operan a baja altura, la toma de datos significativos se realiza generalmente a partir de los 10 metros hasta los 50 metros de altura, en donde la rugosidad del terreno desempeña un papel crucial, ya que influye directamente en el comportamiento del viento y en la eficiencia de los generadores de pequeña escala, por tanto, es imprescindible considerar cuidadosamente este factor al implementar prototipos en áreas específicas.

En este sentido, herramientas como GWA ofrece un alto grado de confiabilidad en la precisión de los datos debido a su resolución espacial detallada y a la validación mediante datos tomados directamente en campo, lo que garantiza una mayor fidelidad en los procesos de análisis y modelado.

6.1.4 Análisis del Potencial Eólico en Boyacá

La evaluación del recurso eólico en el departamento de Boyacá requiere un análisis detallado de la velocidad del viento a distintas alturas dependiendo el fabricante, dado que las pequeñas turbinas eólicas operan típicamente entre los 10 y 50 metros, en particular, el uso de turbinas eólicas de eje horizontal y vertical (HAWT y VAWT, respectivamente) a

bajas alturas, como 10 metros, requiere condiciones de viento adecuadas para maximizar la generación de energía en este contexto. Este análisis considera las características del recurso eólico en la región y los parámetros técnicos de este tipo de turbinas, enfocándose en velocidades del viento, rugosidad del terreno y el comportamiento aerodinámico a bajas alturas, y para ello, se establece un criterio basado en literatura científica y en las características técnicas de las turbinas de baja escala.

El potencial eólico de una región se determina en función de la velocidad media anual del viento. Con base en estudios previos, la clasificación se establece como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación del Potencial Eólico según la Velocidad del Viento. Tomado de [28].

Velocidad del viento (m/s)	Clasificación del Potencial Eólico	Aplicabilidad
< 3	No viable	No apto para generación de energía.
3 - 4.5	Bajo	Solo aplicable para microturbinas con bajo rendimiento.
4.5 – 6	Moderado	Adecuado para pequeñas turbinas en zonas rurales.
6 - 7.5	Bueno	Viable para microgeneración con alta eficiencia.
7.5 – 9	Alto	Ideal para proyectos de energía distribuida.
> 9	Excelente	Condiciones óptimas para parques eólicos a gran escala.

Para seleccionar las zonas con mayor viabilidad en Boyacá, se establece un umbral mínimo de 4.5 m/s desde 10 metros de altura y las ubicaciones donde la velocidad media del viento supere los 6 m/s serán priorizadas, ya que ofrecen condiciones más favorables para la

instalación de turbinas de pequeña escala, no obstante, la selección final de las áreas de estudio no solo debe basarse en la velocidad del viento, sino también en otros criterios técnicos y logísticos. Entre estos, se incluyen la proximidad a vías de acceso, que facilita el transporte e instalación de los equipos, la cercanía a centros de consumo o áreas pobladas que puedan beneficiarse directamente del suministro de energía, y la disponibilidad de redes de distribución eléctrica, lo que permite la conexión eficiente de la generación eólica al sistema eléctrico local [29].

6.1.5 Velocidades de Viento y Requisitos para HAWT

Las turbinas de eje horizontal generalmente operan o inician su operación para la generación de energía eléctrica con velocidades de viento entre 3.5 y 5 m/s, lo que corresponde a las condiciones observadas en áreas como en el municipio de Samacá a 10 metros de altura. Estas velocidades son suficientes para activar el funcionamiento de pequeñas turbinas horizontales diseñadas para operar con un "cut-in speed" bajo (mínima velocidad para generar energía). Además, estas turbinas suelen requerir velocidades constantes o moderadamente variables para evitar daños estructurales, lo cual es factible en Boyacá durante los meses secos [17].

6.1.6 Impacto de la Rugosidad del Terreno

La rugosidad del terreno tiene un impacto directo en el flujo del viento a bajas alturas, donde áreas abiertas y planas, con vegetación baja o pastizales, son ideales para instalar turbinas de eje horizontal, mientras que, las áreas con alta rugosidad, como bosques o zonas urbanizadas, generan turbulencias que reducen la eficiencia aerodinámica y aumentan el desgaste de las turbinas. Se recomienda instalar las turbinas en terrenos agrícolas o en laderas expuestas donde el viento fluya de manera más uniforme [30].

6.1.7 Topografía y Turbulencia Local

La topografía montañosa de Boyacá crea zonas donde los vientos pueden ser canalizados o acelerados beneficiando así el rendimiento de las HAWT, de igual manera, las mismas condiciones pueden generar turbulencias locales, especialmente cerca de obstáculos como árboles o edificaciones, por tanto, para minimizar estos efectos, las turbinas deben instalarse a una distancia mínima de 10 veces la altura del obstáculo predominante, garantizando un flujo de viento más estable [11].

Elección de Turbinas: Turbinas horizontales con rotores pequeños (diámetros de 2 a 4 metros) y un "cut-in speed" de 3 m/s son ideales para aprovechar las condiciones de Boyacá.

Ubicación Estratégica: Priorizar áreas despejadas y elevadas como las crestas montañosas. Evitar ubicaciones cercanas a barreras físicas que alteren el flujo del viento.

Las turbinas de eje horizontal a bajas alturas son una opción viable para Boyacá, especialmente en zonas con velocidades promedio de viento cercanas a los 4-5 m/s y baja rugosidad, sin embargo, la elección del sitio, el diseño de la turbina y las características locales del viento deben alinearse para garantizar el buen rendimiento y la sostenibilidad del proyecto.

6.1.8 Selección de la turbina a pequeña Escala HAWT y VAWT

La selección de la turbina eólica entre las tecnologías HAWT y VAWT se basa en una evaluación integral de las condiciones del sitio y las necesidades del proyecto, con la finalidad de lograr maximizar la producción energética a pequeña escala mediante generación eólica en el departamento de Boyacá, las características principales a tener en cuenta son las siguientes:

- Velocidades medias de Viento, menores a 10 m/s
- Potencia de Aerogeneradores a pequeña escala, menor a 1 MW
- Coeficiente de potencia
- Operatividad y mantenimientos
- Madurez tecnológica y disponibilidad del mercado.

Las turbinas horizontales HAWT tienen la ventaja de tener un torque un alto mientras las turbinas verticales VAWT son más deseables en ambientes marinos o aplicaciones urbanas debido al menor espacio en comparación con las turbinas horizontales, también debido por su bajo ruido, bajo costo y facilidad de expansión, aunque son menos eficientes que las turbinas horizontales.

6.1.9 Análisis

En los HAWT los rotores se encuentran en la parte más alta de la torre con el objetivo de obtener directamente la fuerza rotacional con flujos más constantes, en algunos casos las

compensaciones de 10 metros en el nivel de altura de la turbina generan un incremento de la velocidad de viento de 2 % traduciéndose a mayor energía eléctrica generada [31].

La Figura 5 exhibe algunas las potencias desarrolladas por una turbina tipo HAWT y VAWT con la misma potencia nominal de 20 kW. Conforme se incrementa la velocidad del viento las VAWT desarrollan una mayor potencia que las HAWT, sin embargo, el ruido generado por las HAWT es 25% mayor en su operación en comparación con la VAWT, de acuerdo a M. R. G. Mohammad A. Al-Rawajfeh [32] las VAWT desarrollan más potencia a velocidades con valores en el rango de 13 y 18 (m/s) pero las HAWT mantienen su potencia en un rango más amplio 11 a 21 (m/s).

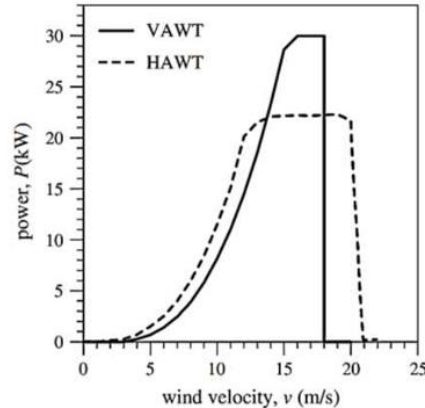


Figura 5. Análisis de Potencia desarrollada por una turbina de 20 kW VAWT y HAWT.

Tomado de [32].

6.1.10 Comparación entre las HAWT y VAWT

El siguiente análisis comparativo evalúa cuál de estas dos tecnologías es la más adecuada para la generación de energía eléctrica en condiciones de viento moderadas y para aplicaciones de generación a pequeña escala, inferiores a 100 kW. Se considerarán diversos criterios técnicos, económicos y ambientales para determinar la opción más eficiente y sostenible.

6.1.11 Rendimiento en Rangos de Velocidades de Viento Moderadas

Las HAWT suelen presentar una mayor eficiencia en la conversión de energía eólica en electricidad, especialmente en rangos de velocidades de viento superiores a ciertos umbrales operativos, a pesar de ello, en rangos de velocidades moderadas, las VAWT

demuestran ventajas significativas debido a su capacidad para capturar el viento desde cualquier dirección sin necesidad de mecanismos de orientación complejos.

Las VAWT mantienen una eficiencia más consistente en entornos con vientos fluctuantes, lo que las hace más adecuadas para áreas donde las velocidades de viento varían frecuentemente.

- **Eficiencia:** En rangos de velocidad de viento moderada (4-10 m/s), las VAWT alcanzan una eficiencia de conversión de energía entre el 25% y el 35%. Por otro lado, las HAWT pueden lograr eficiencias superiores, oscilando entre el 30% y el 45%, dependiendo de las condiciones específicas de viento y diseño de la turbina [32].

6.1.12 Tamaño y Escalabilidad

Las HAWT son más adecuadas para instalaciones de mayor escala debido a su diseño eficiente. Sin embargo, para aplicaciones a pequeña escala, inferiores a 100 kW, las VAWT ofrecen una mayor flexibilidad en términos de diseño y pueden integrarse más fácilmente en espacios reducidos, lo que las hace ideales para entornos industriales, residenciales y comerciales con limitaciones de espacio.

- **Dimensiones:** Las VAWT suelen tener diámetros de rotor que varían entre 3 y 10 metros, mientras que las HAWT para aplicaciones similares pueden tener diámetros de rotor que van desde 5 hasta 15 metros.

6.1.13 Impacto Ambiental

Las VAWT presentan un menor impacto visual y son más seguras para la fauna, especialmente aves, debido a su diseño cerrado. Por otro lado, las HAWT, por su tamaño y movimiento, pueden representar mayores riesgos para la fauna y generar impactos visuales más notorios en el entorno [33].

- **Seguridad para la Fauna:** Las VAWT, al tener un diseño menos expansivo y con partes móviles más cercanas al suelo, reducen el riesgo de colisiones para aves y murciélagos en comparación con las HAWT [33].

6.1.14 Altura de Instalación

Un factor determinante es la altura de instalación de una turbina, que influye en el rendimiento y la viabilidad de las turbinas eólicas. Las HAWT típicamente requieren torres más altas para acceder a vientos más fuertes y constantes que se encuentran a mayor altura sobre el suelo. Esta necesidad de mayor altura implica un aumento en los costos de instalación y mantenimiento, así como mayores requisitos estructurales.

6.1.15 Ventajas y Desventajas

De acuerdo con M. Saad y N. Asmuin [34], las VAWT ofrecen muchas ventajas en comparación con las turbinas eólicas tradicionales de eje horizontal (HAWT). Pueden estar muy juntos dentro de los parques eólicos, y esto permite más en cualquier espacio.

Ventajas:

- Sistemas Silenciosos, a una altura de 10 metros una HAWT tiene 95 dB mientras una VAWT tan solo 38 dB similar a una conversación susurrada, son omnidireccionales y también generan fuerzas más bajas en la estructura de soporte. No necesitan tanto viento para producir energía, lo que les permite estar más cerca del suelo donde la velocidad del viento es menor. Debido a que están más cerca del suelo, esto significa que son fácilmente controlables y se puede implementar en estructuras altas.

Desventajas:

- A veces no funcionan correctamente bajo vientos repentinos o fluctuantes.
- Generan un par de arranque extremadamente bajo,
- Problemas de estabilidad dinámica. Los VAWT también son muy sensibles a las condiciones fuera de diseño y poseen una baja altura de instalación que limita el funcionamiento a los entornos con una baja velocidad del viento.
- Las cuchillas que están unidas a VAWT son vulnerables a los tipos de fatiga debido a la amplia variación en las fuerzas aplicadas con cada rotación. Los tipos verticales de cuchillas implementados en los primeros modelos se doblaron con cada giro, y esto provocaba que tuvieran grietas. Con el tiempo, las palas se rompieron y esto provocó la falla de la turbina [34].

6.1.16 Resultados de Evaluación

Tabla 3. Evaluación cualitativa de alternativas en aerogeneradores a pequeña Escala
HAWT vs VAWT, Fuente: Propia.

Propiedad	HAWT	Valoración	VAWT	Valoración2	Comentarios
Capacidad	Alta capacidad, ejemplo 20 MW o más grandes	3	Baja capacidad, se encuentran hasta 6 MW	3	La HAWTs utilizada en proyectos a gran escala como las granjas
Ruido	Alto	1	Bajo	3	La VAWTs es deseable para condiciones de trabajo dentro de la ciudad
Rendimiento aerodinámico	Alto debido a su mecanismo de seguimiento	3	Mediano, demasiados ataques de vientos en varias direcciones, aplica para la tecnología Darrieus	2	
Fuerza principal	Fuerza de sustentación	3	Fuerza de arrastre	3	
Mantenimiento	Mantenimiento complejo debido a las alturas	1	Fácil mantenimiento	3	
Mecanismo de control	Incrementa la eficiencia de la turbina	3	No requerido debido a la rotación del rotor	3	
Fatiga	Alta debido a los centros de gravedad	3	Baja debido a los centros de gravedad	3	
Stress	Alta capacidad, pero grandes esfuerzos mecánicos en los más grandes	2	Baja capacidad, menos esfuerzos debido a su funcionamiento	2	La aplicación deseada en el presente documento es Offshore
Coefficiente de Potencia	Hasta 0,5 aproximadamente con 3 álabes	3	Hasta 0,4 con VAWT Darrieus	1	
Tip Speed Ratio TSR	Puede llegar hasta 14,3 con un álabe	3	Valores bajos de 5,1 en Darrieus rotor turbine	3	las verticales como las tipo Darrieus son de sustentacion.
Altitud de montaje	Alto	3	Bajo	3	
Uso	Proceso de granos, bombeo de agua, generación de electricidad	3	Anemómetro, enfriamiento en vehículos, generación de electricidad, ventiladores	3	
Arranque automático	Sí	3	No	1	la velocidad del viento supera la velocidad de corte inferior, típicamente entre 3 y a 4 m/s en turbinas pequeñas
Materiales de construcción	Acero, aluminio, zinc, cobre, titanio, níquel, fibra de vidrio y madera	3	Acero, aluminio, zinc, cobre, titanio, níquel y fibra de vidrio	3	Materiales similares en las dos tecnologías
Velocidad de viento nominal	Más baja con el incremento de la velocidad de viento es más peligroso debido a la capacidad y esfuerzos mecánicos	3	Más alta, con el incremento en la velocidad de viento es menos peligroso debido a su capacidad y esfuerzo	1	A pequeña escala, los resultados demuestran que las VAWT tienen una velocidad de viento mayor que las HAWT
Control	Sí	2	Sí	2	Ambos tipos de tecnología tienen mecanismos usados para ajustar los ángulos de los álabes y la dirección del flujo del viento (Pitch Control)
Madurez tecnológica y disponibilidad en el mercado	Sí	3	Sí	2	Los HAWT mantienen el liderazgo en la implementación de proyectos eólicos a nivel mundial
		43		40	

Se presenta la tabla 4 que resume los criterios evaluados para determinar la turbina más adecuada para la generación de energía eléctrica a pequeña escala. El criterio de evaluación se compone de valoraciones cuantitativas, donde 1 equivale a bajo, 2 a medio y 3 a alto, al

final la suma con mayor valor absoluto entre las dos tecnologías será la seleccionada para el análisis respectivo.

El resultado demuestra que la alternativa más viable para la aplicación de generación de energía eléctrica a pequeña escala es la utilización de aerogeneradores del tipo HAWT con una calificación de 43 puntos en comparación con la obtenida para VAWT de 30 puntos.

6.1.17 Sistemas de bombeo para riego agrícola

En el departamento de Boyacá se presenta una amplia variedad de condiciones climáticas y edáficas que permiten el desarrollo de diferentes actividades agrícolas, sin embargo, las limitaciones en infraestructura de riego y la estacionalidad de las lluvias dificultan el aprovechamiento eficiente del recurso hídrico, es por esto que se hace necesario el diseño de sistemas de bombeo adaptados a las condiciones locales para que garanticen el suministro continuo de agua durante las épocas secas y se optimice así el rendimiento agrícola.

Actualmente, en muchas zonas rurales como las de Boyacá y de Colombia en general, el riego se realiza mediante sistemas de bombeo alimentados por motores de combustión interna, que funcionan con gasolina o diésel, estos equipos, aunque funcionales, presentan múltiples limitaciones como altos costos operativos, dependencia de combustibles fósiles y emisiones contaminantes, es por esto que esta sección tiene como objetivo presentar una caracterización técnica y agrícola de tres zonas seleccionadas del departamento de Boyacá (Samacá, Sotaquirá y Soracá), y realizar el dimensionamiento preliminar de los sistemas de bombeo requeridos, empleando modelos hidráulicos de diseño y ecuaciones estandarizadas.

6.1.18 Determinación de Áreas de Influencia de Cultivos

En el desarrollo de la determinación de las áreas de cultivo se desarrolló el proceso de visualización a través de Google Earth de las zonas de influencia circundantes a nuestros tres sectores escogidos, los cuales son Samacá, Soracá y Sotaquirá, ver figura 6, figura 7 y figura 8, estos tres sectores, a partir de la visualización de la morfología del terreno y su rugosidad, se pudieron determinar cómo áreas de cultivos en las cuales son determinantes para poder dar alcance a nuestro proyecto.

Después de esta evaluación espacial, se tomó la decisión de determinar que por cada área de estudio se tomará una unidad demostrativa aproximada de 2 hectáreas, debido a que esto responde a la intención de focalizar el análisis en zonas más pequeñas que puedan ser gestionadas con mayor facilidad, lo cual permite evaluar de forma más precisa el desempeño técnico y económico de los sistemas de bombeo diseñados [35].

6.1.19 Descripción de las Áreas de Estudio

- **Samacá**

Superficie de cultivos: 2 hectáreas

Altitud promedio: 2.600 - 2.900 m s. n. m.

Cultivos predominantes: papa, cebolla larga y arveja

Características agronómicas: Agricultura intensiva en parcelas pequeñas, con alta demanda hídrica en temporadas secas [36].

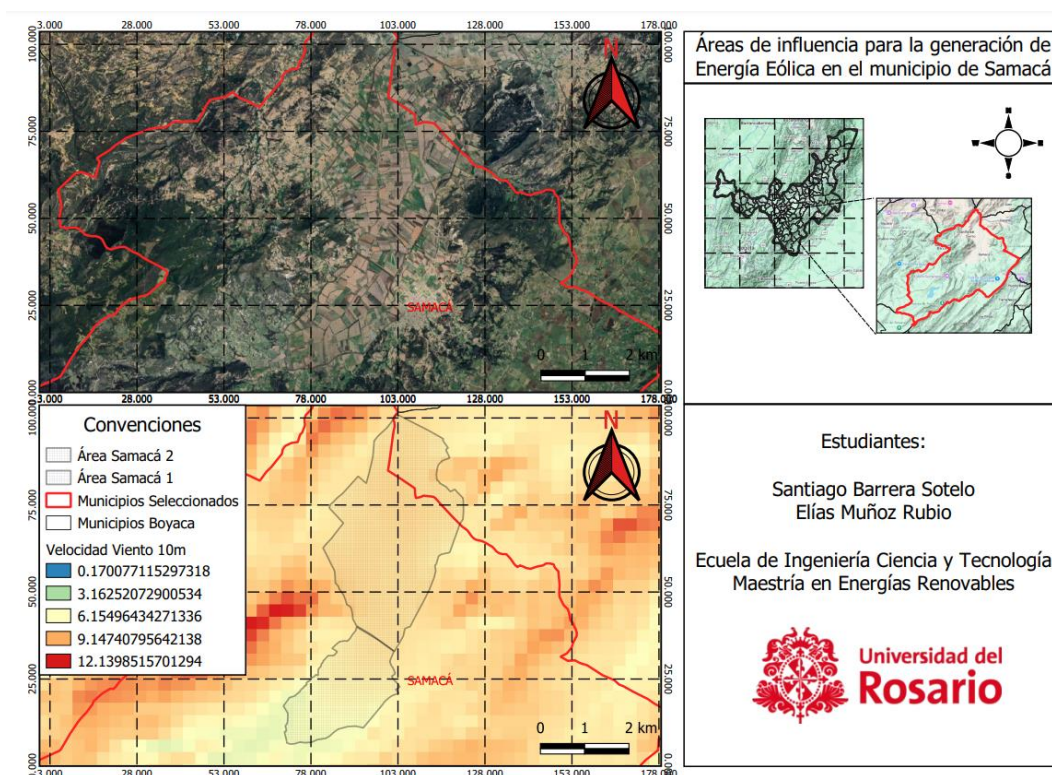


Figura 6. Áreas de cultivos en Samacá para aprovechamiento de sistema de riego. Fuente:

Propia a partir de información geoespacial procesada en QGIS.

- **Soracá**

Superficie de cultivos: 2 hectáreas

- Altitud promedio: 2.500 - 2.700 m s. n. m.
- Cultivos predominantes: pastos mejorados, papa, arveja
- Características agronómicas: Agricultura familiar con mezcla de producción vegetal y pecuaria, orientada al autoconsumo y mercado local [36].

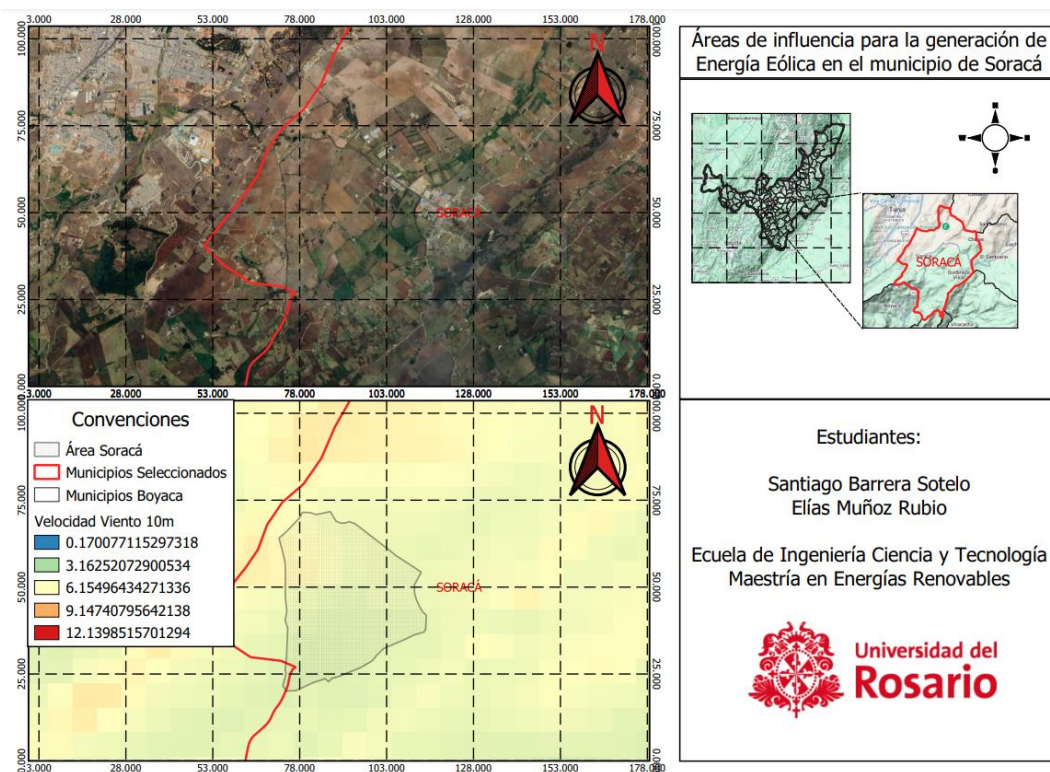


Figura 7. Áreas de cultivos en Soracá para aprovechamiento de sistema de riego. Fuente:

Propia a partir de información geoespacial procesada en QGIS.

- **Sotaquirá**

Superficie de cultivos: 2 hectáreas

- Altitud promedio: Cerca de 2.800 m s. n. m.
- Cultivos predominantes: papa, zanahoria, lechuga, cebolla junca
- Características agronómicas: Agricultura diversificada en pequeños lotes, con prácticas tradicionales de riego [36].

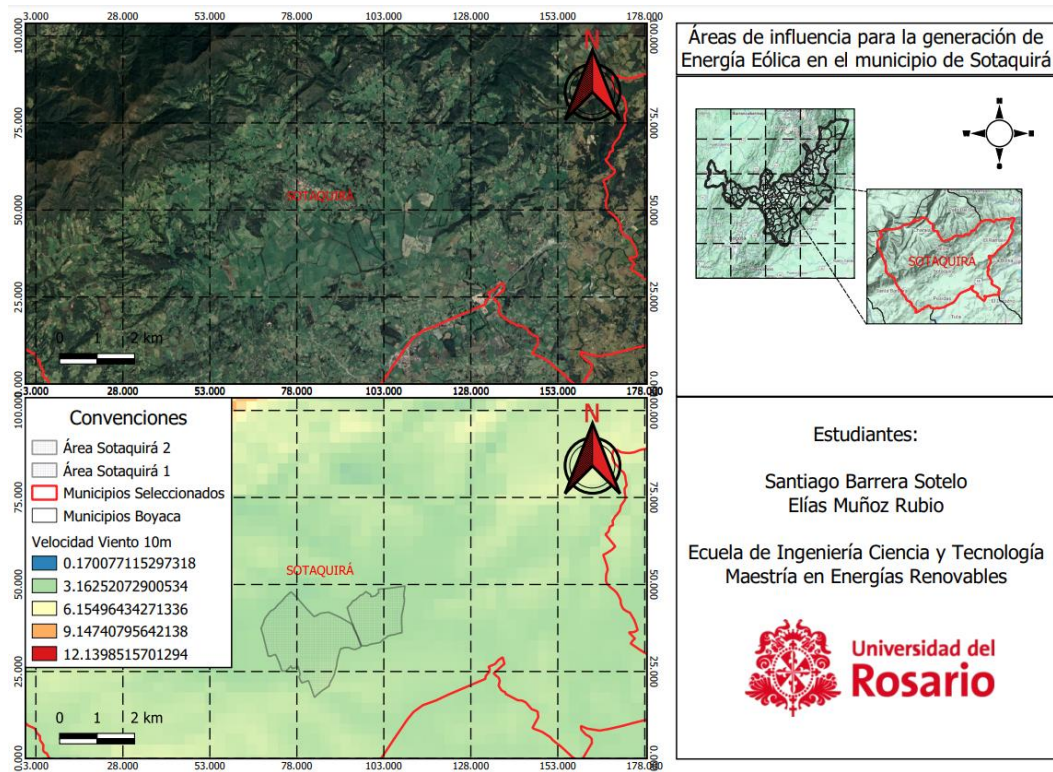


Figura 8. Áreas de cultivos en Sotaquirá para aprovechamiento de sistema de riego.

Fuente: Propia a partir de información geoespacial procesada en QGIS.

6.1.20 Metodología para el Cálculo de Caudal y Potencia de Bombeo

Para el diseño del sistema de bombeo se considera como base el cálculo del caudal requerido según el módulo de riego y el área cultivada. Posteriormente, con base en la altura dinámica total estimada y la eficiencia del sistema, se calcula la potencia hidráulica necesaria para el bombeo.

- Cálculo del caudal total de riego:

$$Q \left(\frac{m^3}{s} \right) = \text{Área}(ha) * \text{Módulo de riego} (l/s/ha) * (1/1000) \quad (3)$$

Donde:

- Q: Caudal requerido [m³/s]
- Módulo de riego: 1.2 l/s/ha [37]
- Área: Superficie total de cultivo [ha]

- Cálculo de la potencia hidráulica requerida:

$$P(kW) = (Q * H * \gamma) / \eta \quad (4)$$

Donde:

- P: Potencia requerida en kilovatios [kW]
- Q: Caudal de bombeo [m³/s]
- H: Altura dinámica total (estimada en 25 m)
- γ : Peso específico del agua = 9.81 kN/m³
- η : Eficiencia del sistema bomba-motor (adoptada como 0.70)

La altura dinámica total (H) se estimó en 25 m considerando las condiciones operativas propias de los sistemas de riego por bombeo en zonas rurales del departamento de Boyacá, donde los puntos de captación (pozos, jagüeyes o quebradas) suelen ubicarse en cotas inferiores al nivel de los cultivos [38].

Dado que se plantea un tiempo de operación de solo 4 horas diarias, el caudal requerido se ajusta mediante el siguiente factor:

$$Q_{ajustado} = Q * \left(\frac{24}{4}\right) = Q * 6 \quad (5)$$

6.1.21 Resultados del Dimensionamiento Preliminar

El dimensionamiento preliminar del sistema de bombeo se realizó considerando un cultivo en común de 2 hectáreas para las tres zonas de estudio (Samacá, Soracá y Sotaquirá) y se asumieron condiciones hidráulicas equivalentes con un caudal específico de 1.2 L/s ha, una altura de bombeo de 25 m y una eficiencia global del sistema del 70 %. A partir de estos parámetros, el caudal total y la potencia hidráulica requerida se estimaron mediante las ecuaciones:

Área cultivada: 2 hectáreas

$$Q = 1.2 \times 2 / 1000 = 0.0024 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{ajustado} = 0.0024 \times 6 = 0.0144 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P = (0.0144 \times 25 \times 9.81) / 0.70 \approx 5.05 \text{ kW}$$

El resultado obtenido corresponde a una potencia aproximada de 5.05 kW, valor que se adopta como referencia para las tres ubicaciones, al representar un requerimiento promedio para el funcionamiento de un sistema de bombeo destinado al riego de cultivos de bajo condiciones similares de extensión y demanda hídrica.

6.1.22 Consideraciones Finales

La reducción del área de análisis a unidades representativas de 2 hectáreas permite una mayor precisión en la implementación y evaluación de sistemas de bombeo agrícola en el departamento de Boyacá [35], siendo un enfoque escalonado que puede facilitar la replicabilidad técnica del modelo y la adopción por parte de pequeños y medianos productores.

Ahora bien, los valores de caudal y potencia calculados proporcionan una base para seleccionar equipos de bombeo adecuados y explorar la viabilidad de utilizar fuentes de energía renovable, como paneles solares o microturbinas eólicas, sin embargo, futuros estudios deberán incluir análisis financiero, diseño hidráulico detallado, y evaluación ambiental para asegurar la sostenibilidad de las soluciones.

6.1.23 Selección de aerogeneradores

Para determinar el modelo de aerogenerador adecuado para el proyecto de abastecimiento energético mediante fuentes eólicas en Boyacá, se realizó un estudio detallado utilizando información disponible en línea sobre aerogeneradores comerciales de pequeña escala, en esta consulta web se recopilieron datos técnicos clave de diferentes fabricantes internacionales de aerogeneradores, donde se incluye la potencia nominal, velocidad de arranque (velocidad de inicio), velocidad nominal y de corte del viento, diámetro del rotor, número de aspas, tipo de torre, tensión de operación, frecuencia y modalidad de conexión a la red eléctrica (off-grid u on-grid). A continuación, la tabla 4 muestra el resumen de algunas características técnicas de aerogeneradores comerciales de pequeña escala analizados para selección final.

Tabla 4. Resumen de características técnicas de aerogeneradores comerciales de pequeña escala. Fuente: Propia.

Fabricante	Potencia en kW	Velocidad de inicio (m/s)	Diámetro (m)	Altura de la torre (m)
Acsa	90	3.3	17	23.4
Aeolos	5	3	6.4	Site
Aerodan	75	5	17	23
Aerodyn aeolus 11	30	3.5	11.7	14/22
Aerolite	30	3.5	11	24,4/30,5
Air	100	3.5	19	25/45
Allgaier	6	2.5	10	9.89
AN Bonus	100	4.8	23	24/30
Argolabe Turbec	100	3.5	22.5	37
Automaxx	1.5	2.5	1.7	10
Bergey BWC	10	3.4	7	30
Bergey Wind Power	15.6	4.5	9.6	18/24/
Bornay	5	3	4.05	12
Braun	5.5	3	5.3	15/18/21
Britwind	5	3	5.5	12/15/18
DWP	75	4	15.3	24
EasyWind	6	3	6.8	7/13/19
Ecoener	30	4.5	10.3	12.4
Endurance	85	4	23.5	24,8/36,6
Ennera Energy	3.2	3	4.4	12
Eocycle	20	2.75	7.6	16,8/23,8
Eolys Metronome	10	3	9	14/18
Ergowind	20	3	10.8	20
foshan Ouyad	3	3	4.2	9
Gaia Wind	11	3.5	13	18
Ghrepower	5	3	5.1	12
Henryd Wind Power	5	3	5	15
Hummer	5	2.5	6.4	Site
Hye Wind power	3	3	4	13.4
Kestrel	1	2.5	3	15/18
kleinwind	5	2.5	5.6	12
Kuriant	18	3.5	10.9	20
LuvSide	8	3	6	12/22
Nature Power	2	3	1.78	7.6
PowerHouse Wind	2	2.5	3.6	11.8
Qingdao Renergy	10	3	7.6	12
Rexco	5	3.5	4.7	9

Fabricante	Potencia en kW	Velocidad de inicio (m/s)	Diámetro (m)	Altura de la torre (m)
Rulis Electrica	0.5	2.2	1.15	Site
Ryse Energy	5.5	2	4.3	Site
SD Wind Energy	6	2.5	5.6	-
Senwei Energy	5	3	5	-
Solid Wind Power	25	3	16	18
SoyutWind	5	3	6.5	-
Super Wind	1.25	3.5	2.4	-
THYwindPower	6	3.5	7.13	21
Tuge Energía	9.9	3	10.2	18/22
Unitron Energy	5.1	2.7	5.24	-
Xinda Energy	50	4	18	18
Zonhan	5	3	6	12

Para la selección del aerogenerador más adecuado que cubra la demanda energética estimada para los sistemas de bombeo, cuya potencia requerida es aproximadamente 5.05 kW, se partió de la anterior lista de 49 aerogeneradores comerciales disponibles en el mercado, sin embargo, la elección no solo debe basarse en encontrar un equipo con la potencia nominal suficiente, sino también en que este pueda iniciar su funcionamiento a bajas velocidades de viento, ya que las condiciones del recurso eólico en las zonas estudiadas pueden presentar velocidades moderadas o variables. Por lo tanto, es fundamental analizar la relación entre la potencia y la velocidad de inicio de los aerogeneradores para garantizar un rendimiento óptimo en las condiciones reales de operación.

El análisis de la figura 9 que relaciona la velocidad de inicio de los aerogeneradores con su potencia nominal (kW) revela una tendencia clara, a medida que aumenta la potencia de generación, la velocidad requerida para iniciar la operación de la turbina también tiende a incrementarse, lo que implica que los aerogeneradores de mayor capacidad requieren vientos más fuertes para comenzar a generar energía de manera eficiente, ahora bien, esta relación es esperable debido a que turbinas con mayor potencia nominal suelen tener mayores dimensiones y momentos de inercia, lo que demanda un esfuerzo inicial mayor para superar la resistencia mecánica y comenzar a girar, por ende, en contextos con velocidades promedio de viento moderadas o bajas, resulta más adecuado optar por

aerogeneradores de potencia media o baja que puedan iniciar su operación con velocidades menores.

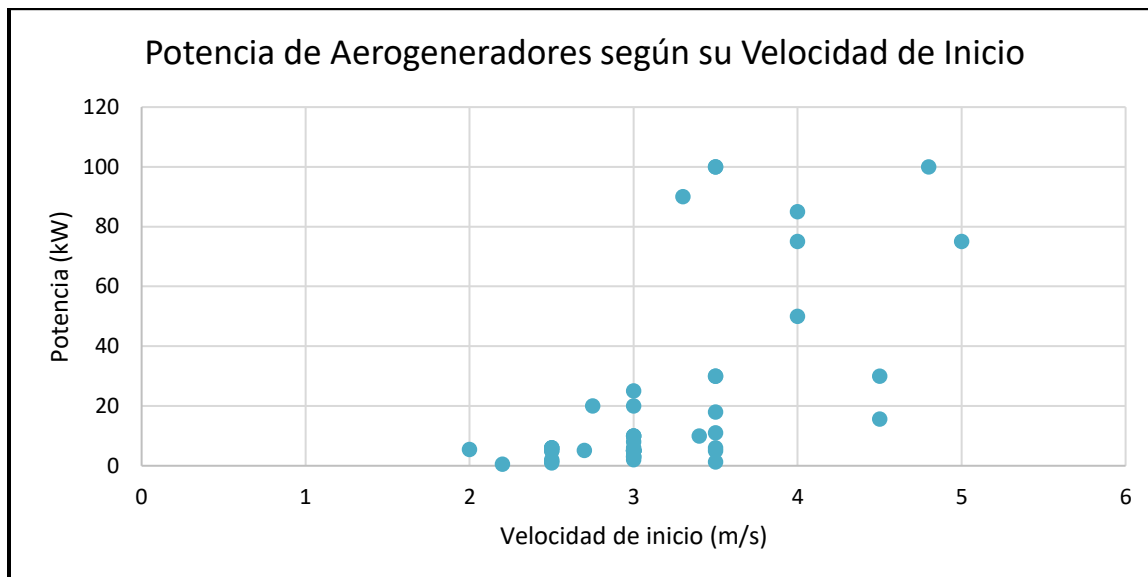


Figura 9. Velocidad de inicio (m/s) vs Potencia (kW). Fuente: Propia.

Para finalizar el análisis de las características técnicas de los aerogeneradores disponibles en el mercado, se presenta la distribución de frecuencias de las potencias nominales de los equipos considerados, lo cual permite observar la prevalencia de ciertas capacidades de generación en el segmento de aerogeneradores de pequeña escala.

La figura 10 muestra que la mayoría de los aerogeneradores comerciales para pequeña escala concentran sus potencias nominales en el rango de 1 kW a 10 kW predominando los modelos con capacidades bajas, también se puede observar que aunque existen algunos aerogeneradores con potencias superiores, para el caso específico del proyecto, donde la demanda energética estimada es de aproximadamente 5.05 kW no resulta indispensable optar por equipos de alta potencia, por consiguiente esta distribución es coherente con la necesidad de priorizar aerogeneradores que puedan operar eficientemente a bajas velocidades de viento tal como se discutió anteriormente, del mismo modo, los modelos de menor potencia no solo satisfacen la demanda, sino que además ofrecen mejores condiciones de arranque en escenarios con vientos moderados o variables, favoreciendo un suministro energético más continuo y confiable para el sistema de bombeo.

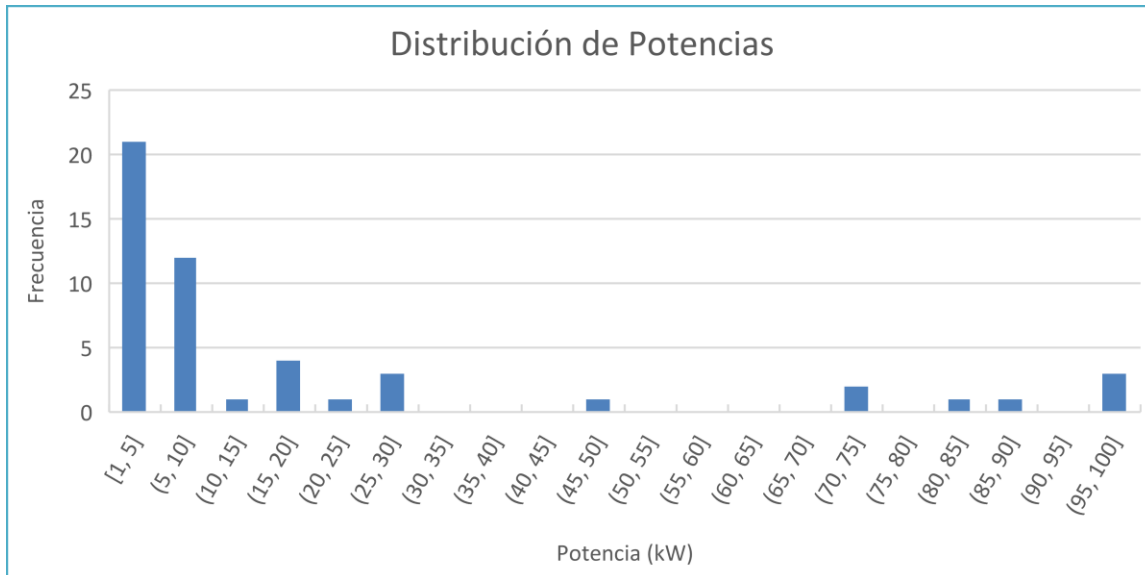


Figura 10. Distribución de potencias (kW). Fuente: Propia.

Ahora bien, la figura 11 que relaciona el diámetro del rotor con la potencia nominal de los aerogeneradores muestra una clara correlación positiva entre estas dos variables, se observa que a medida que el diámetro del rotor aumenta, la potencia generada también incrementa significativamente.

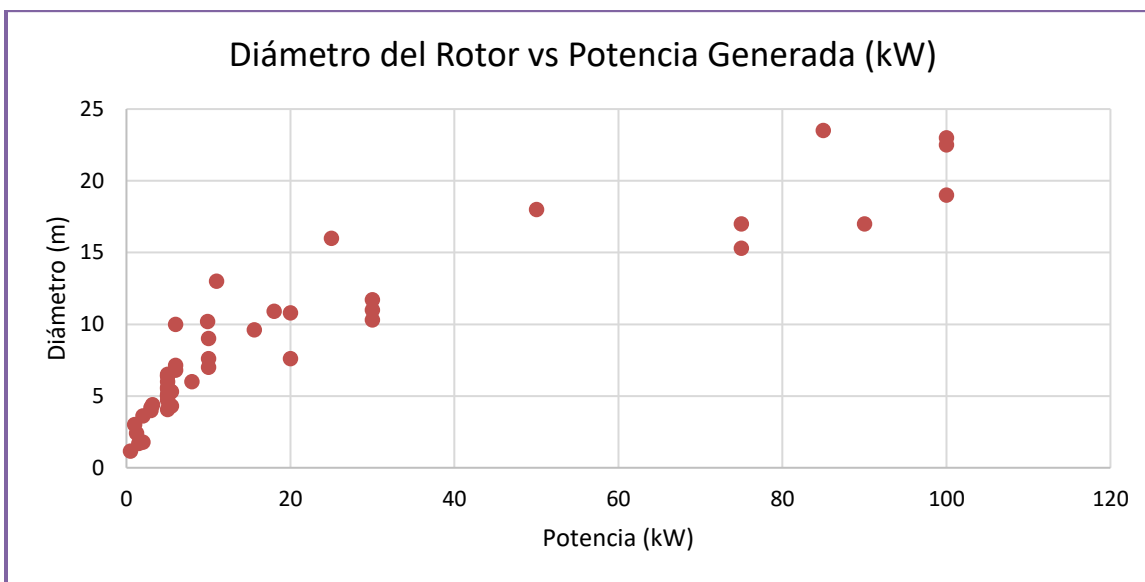


Figura 11. Relación del diámetro del rotor con respecto a la potencia generada. Fuente: Propia.

Esta relación se explica porque un rotor de mayor diámetro captura un área de barrido más amplia, lo que permite interceptar una mayor cantidad de viento y, por ende, transformar una mayor energía eólica en energía mecánica y eléctrica por lo tanto, aerogeneradores con rotores más grandes suelen estar diseñados para producir potencias más altas, no obstante, para el caso del proyecto y la demanda energética específica de 5.05 kW, esta información refuerza la idea de que los aerogeneradores con rotores de tamaño moderado, y por consiguiente potencias adecuadas al requerimiento, son los más recomendables, debido a que equipos con rotores muy grandes implican mayores costos de instalación, mantenimiento y requisitos estructurales, además de que suelen requerir velocidades de viento más altas para operar eficientemente, tal como se analizó en la relación entre velocidad de inicio y potencia.

A continuación, la tabla 5 presenta la correlación entre diferentes variables:

Tabla 5. Correlación y relaciones estadísticas entre principales variables técnicas. Fuente:

Propia					
Correlación Estadística	Potencia en kW	Velocidad de inicio (m/s)	Velocidad nominal (m/s)	Diámetro (m)	Altura de la torre (m)
Potencia en kW	1.00	0.63	0.36	0.91	0.73
Velocidad de inicio (m/s)	0.63	1.00	0.30	0.66	0.45
Velocidad nominal (m/s)	0.36	0.30	1.00	0.27	0.35
Diámetro (m)	0.91	0.66	0.27	1.00	0.74
Altura de la torre (m)	0.73	0.45	0.35	0.74	1.00

Se observa una fuerte correlación positiva (0.91) entre la potencia nominal y el diámetro del rotor, lo cual confirma que, a mayor diámetro, mayor es la capacidad de generación, tal como se evidenció en la figura 12, por otro lado, la potencia nominal muestra una correlación moderada y significativa con la altura de la torre (0.73) y con la velocidad de inicio (0.63) indicando que los aerogeneradores más potentes suelen instalarse en torres más altas y requieren velocidades de viento mayores para comenzar a operar, además, la velocidad nominal del viento presenta correlaciones menores con las demás variables, siendo la más alta con la velocidad de inicio (0.30), lo que puede reflejar que la velocidad

a la que la turbina opera a plena carga no está tan ligada directamente a las dimensiones físicas o potencia nominal como la velocidad mínima para arrancar.

En conjunto, estas correlaciones permiten comprender mejor cómo se relacionan las características técnicas y ayudan a tomar decisiones fundamentadas para seleccionar el aerogenerador que mejor se adapte a la demanda energética y las condiciones del recurso eólico local, por lo cual para la selección final de la turbina, dentro de esta lista, se tendrán en cuenta únicamente los aerogeneradores cuya potencia nominal esté en el rango entre 5 kW y 10 kW, dado que estos cumplen con la demanda requerida por las bombas de riego. Otro factor relevante para descartar aerogeneradores es la disponibilidad de la gráfica de curva de potencia, necesaria para una evaluación precisa y eficiente de la generación esperada. A continuación, la tabla 6 presenta los aerogeneradores preseleccionados:

Tabla 6. Aerogeneradores comerciales a pequeña escala preseleccionados.

Fuente: Propia.

Fabricante	Potencia en kW	Velocidad de inicio (m/s)	Velocidad nominal (m/s)	Diámetro (m)	Número de hojas	Altura de la torre (m)
Aeolos	5	3	10	6.4	3	Site
Braun	5.5	3	12	5.3	3	15/18/21
Henryd Wind Power	5	3	12	5	3	15
Hummer	5	2.5	10	6.4	3	Site
Ryse Energy	5.5	2	11	4.3	3	Site
Senwei Energy	5	3	10	5	3	-
SoyutWind	5	3	10	6.5	3	-
Zonhan	5	3	10	6	3	12

Dado que la visualización conjunta de las curvas de potencia de los ocho aerogeneradores preseleccionados genera una gráfica con muchas líneas superpuestas que dificultan la interpretación, se decidió categorizar los aerogeneradores en dos grupos con características similares, para facilitar la comparación y análisis técnico, con base en esto, la agrupación se realizó considerando principalmente la potencia nominal buscando agrupar turbinas que tengan rangos de operación y perfiles similares, permitiendo identificar con mayor claridad cuáles modelos presentan un mejor desempeño para las condiciones de viento predominantes en Boyacá, y cuáles podrían ajustarse mejor a la demanda energética del sistema de bombeo.

Grupo 1: Aerogeneradores con potencia nominal de 5 kW

Este grupo de aerogeneradores incluye los seis modelos que tienen una potencia nominal de 5 kW, los cuales son especialmente relevantes para el proyecto ya que coinciden exactamente con la demanda estimada de las bombas de riego, lo que indica un potencial óptimo de adaptación. Se analizarán sus curvas para evaluar diferencias en velocidad de arranque, forma de la curva y estabilidad de potencia. Ver figura 12.

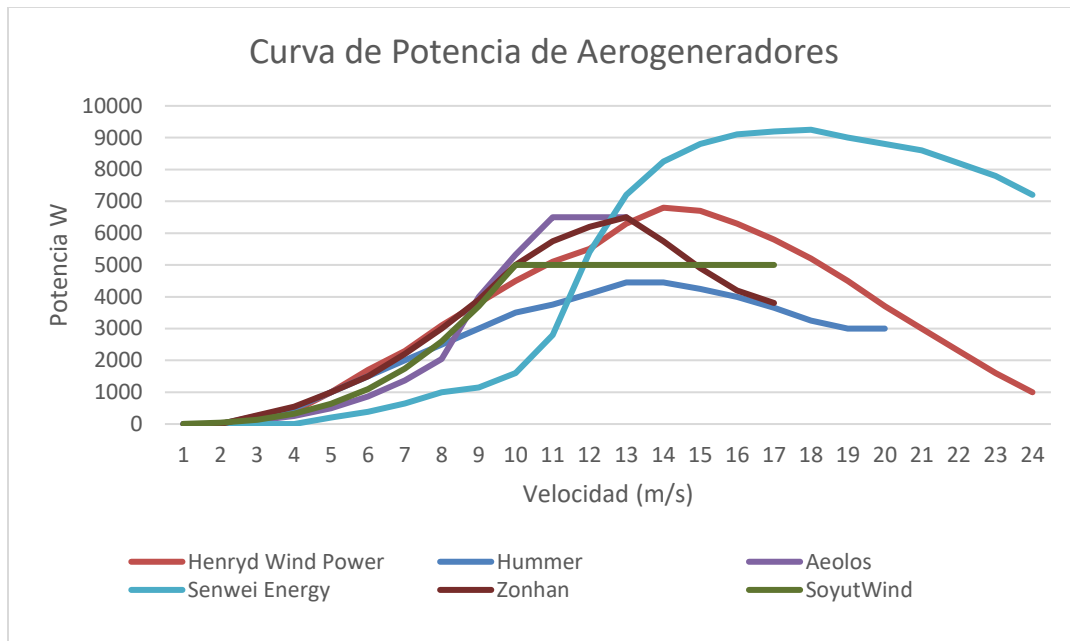


Figura 12. Curva de potencias de aerogeneradores de Potencia 5kW. Fuente: Propia.

En el Grupo 1, conformado por aerogeneradores con potencia nominal de aproximadamente 5 kW, se observa una diversidad importante en el comportamiento de las curvas de potencia frente a la velocidad del viento.

- **Senwei Energy:** destaca por tener la potencia máxima generada más alta en todo el rango de velocidades, alcanzando picos superiores a los 9000 W en velocidades cercanas a 17 m/s. Sin embargo, su potencia generada a bajas velocidades de viento (por debajo de 6 m/s) es muy baja, lo que indica que su velocidad de inicio o capacidad para operar en vientos suaves es limitada.

- **Aeolos:** pese a ser una marca reconocida y ampliamente referenciada en la industria, muestra también una potencia baja en las velocidades iniciales (menos de 5 m/s) y un aumento progresivo.
- **SoyutWind** exhibe un patrón similar a Aeolos, con un inicio restringido a bajas velocidades y una curva de potencia más plana y limitada en magnitud, lo cual puede indicar menor adaptabilidad a condiciones de viento variables o bajas.

En contraste, aerogeneradores como Henryd Wind Power, Hummer y Zonhan muestran una respuesta más favorable a velocidades bajas y medias, generando potencia considerablemente superior en rangos menores a 7 m/s, lo que los posiciona como opciones más versátiles para sitios con vientos moderados.

Grupo 2: Aerogeneradores con potencia nominal de 5.5 kW y 6 kW

Estos modelos ofrecen una ligera capacidad adicional frente a la demanda requerida, por lo que se estudiará si esta diferencia puede traducirse en ventajas operativas, por ejemplo, en un mejor rendimiento a velocidades de viento variables o en mayor margen para picos de demanda.

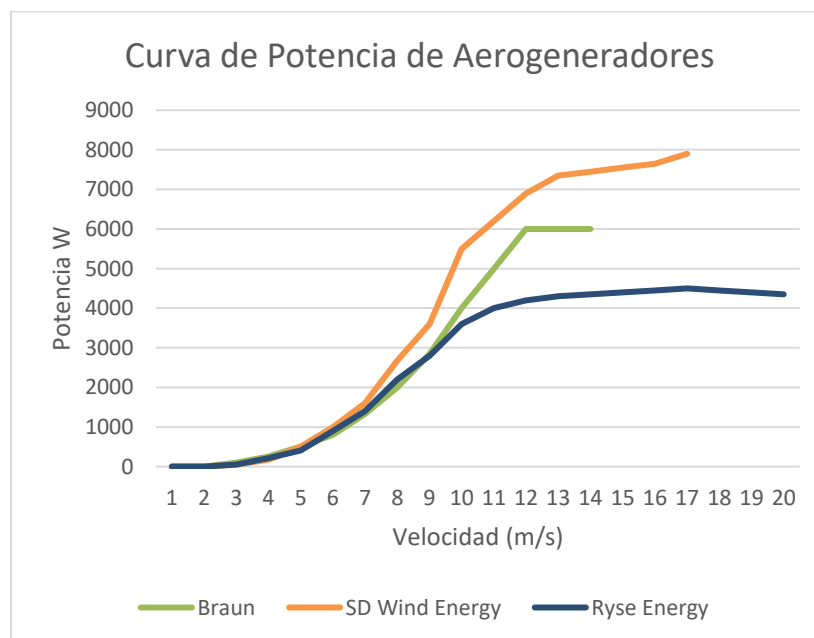


Figura 13. Curva de potencias de aerogeneradores de Potencia 5.5 kW a 6 kW. Fuente: Propia.

En el grupo 2, según la figura 13 se observa que las curvas de potencia frente a la velocidad del viento presentan un comportamiento muy similar entre sí, para velocidades bajas, no existen diferencias significativas en la generación de potencia ni en la velocidad de inicio y dado lo anterior, cualquiera de los tres aerogeneradores que conforman este grupo podría ser seleccionado como representante para realizar comparaciones con las opciones del Grupo 1, en este caso se escoge SD Wind Energy.

Esta homogeneidad simplifica la evaluación y permite enfocar el análisis en comparar el desempeño general del Grupo 2 frente al Grupo 1, donde sí se evidencian diferencias más marcadas en la capacidad de arranque y generación a bajas velocidades como se puede evidenciar en la figura 14.

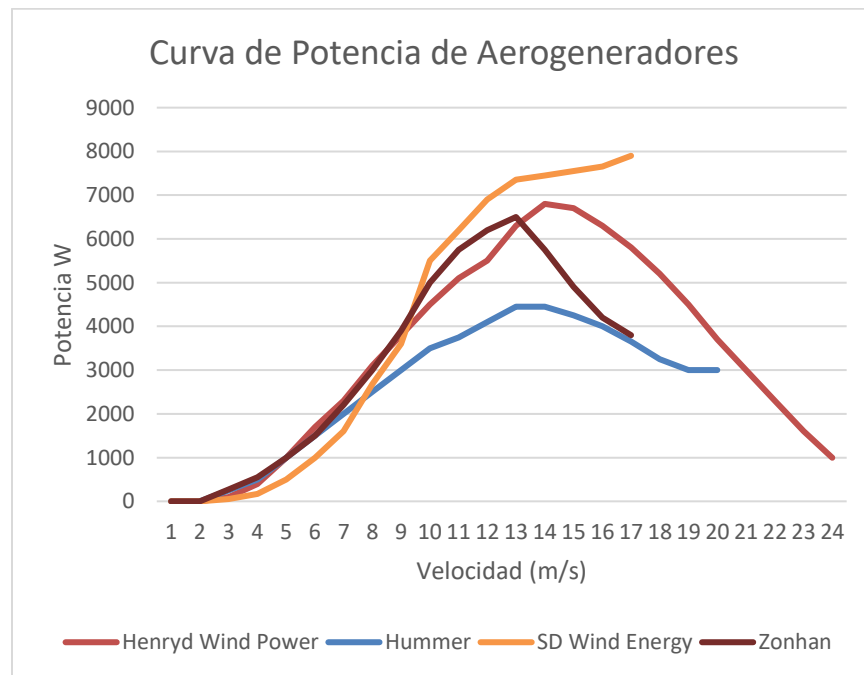


Figura 14. Comparación entre grupo 1 y grupo 2. Fuente: Propia.

En la comparación de las curvas de potencia de los aerogeneradores preseleccionados, se destaca que el aerogenerador del Grupo 2, representado por SD Wind Energy, presenta características particulares frente a los modelos del Grupo 1, donde el aerogenerador SD Wind Energy se caracteriza por tener una velocidad de arranque relativamente alta, lo que implica que requiere vientos de mayor velocidad para comenzar a generar potencia, reflejando así su baja producción energética a velocidades menores a aproximadamente 5

m/s, y un aumento considerable de potencia a partir de velocidades más altas, de igual forma, este comportamiento es típico de aerogeneradores con rotores y generadores diseñados para captar grandes volúmenes de viento a velocidades elevadas, con una potencia nominal mayor, lo que puede traducirse en costos iniciales y de operación más altos, debido a los requerimientos estructurales y al diseño especializado para operar en condiciones de viento intenso.

Por otro lado, los aerogeneradores del Grupo 1, como Henryd Wind Power, Hummer y Zonhan, muestran un comportamiento más favorable en el rango de velocidades bajas y moderadas ya que, tienen velocidades de arranque más bajas, lo que les permite iniciar la generación de potencia incluso en condiciones de viento menos intensas, además, estos aerogeneradores aunque tienen potencias nominales similares o menores, pueden cubrir la demanda requerida de manera más eficiente en condiciones reales de operación, evitando tiempos muertos por falta de viento suficiente para el arranque, traduciéndose en una mayor confiabilidad y en un mejor aprovechamiento del recurso eólico local.

Después de un análisis detallado, se seleccionó específicamente el aerogenerador modelo de **Henryd Wind Power** con una potencia nominal de 5 kW. Las razones de esta elección son:

- Compatibilidad óptima con las velocidades de viento promedio en Boyacá, presentando una velocidad de arranque baja que permite iniciar generación desde aproximadamente 2 m/s.
- Diámetro del rotor adecuado (alrededor de 5 m), que facilita una instalación eficiente y adecuada para el contexto agrícola local.
- Capacidad de generación acorde con las necesidades de suministro energético.

Su implementación permitirá cubrir efectivamente la demanda energética estimada, asegurando una operación eficiente y sostenible del sistema de bombeo de agua para riego en las zonas agrícolas identificadas.

6.1.24 Caracterización del viento a diferentes alturas y Distribución de Weibull

Con el objetivo de realizar un análisis preciso del recurso eólico en los sitios seleccionados, y dado que el aerogenerador seleccionado para el proyecto es el Henryd Wind Power de 5

kW, cuya altura del rotor es de 15 metros, fue necesario ajustar los datos disponibles de velocidad del viento a dicha altura específica, siendo un paso fundamental para garantizar la fidelidad del análisis de distribución de velocidades, el cual es esencial para la posterior aplicación del método de Weibull.

Para este paso, los datos base fueron extraídos de la base NASA Power Data, en formato horario para todo el año 2023, a alturas estándar de 10 metros y 50 metros y para realizar la extrapolación de la velocidad del viento a la altura intermedia de 15 metros, se empleó la ley de potencias junto con la ley logarítmica, las cuales permiten estimar la velocidad a cualquier altura y derivar valores específicos de rugosidad para cada sitio de estudio, obteniendo así una nueva serie horaria más precisa y representativa de la altura real de operación del aerogenerador Henryd.

El resultado de esta caracterización fue una base de datos horaria representativa de todo un año con velocidades extrapoladas a 15 metros, la cual fue utilizada en el análisis estadístico posterior mediante la aplicación de la distribución de Weibull que permite representar la probabilidad de ocurrencia de diferentes rangos de velocidades de viento y calcular métricas claves como la velocidad media, la densidad de energía disponible, y la frecuencia de superación de la velocidad de corte o de arranque, gracias a este procedimiento, se logró construir un perfil de viento para cada una de las áreas de estudio, el cual fue base para la simulación energética y la selección del aerogenerador.

6.1.25 Frecuencia y distribución de velocidades

- **Sotaquirá**

Una vez obtenidos los datos de velocidad a 15 metros, se clasificaron por intervalos de 1 m/s para realizar el análisis de frecuencias. En la figura 15 se presenta la cantidad de registros anuales por clase de velocidad y representada la distribución en un histograma la distribución.

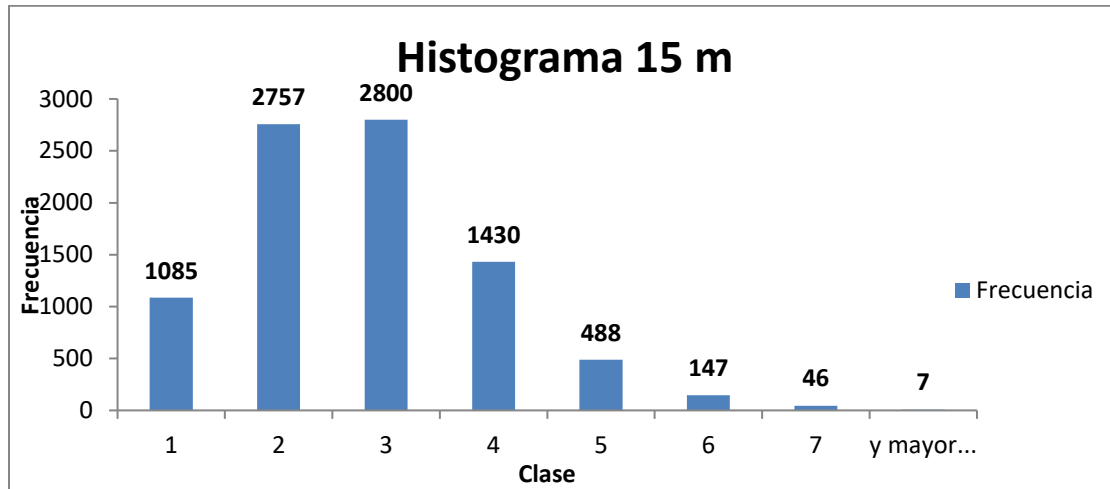


Figura 15. Histograma de frecuencias de velocidad de viento a 15 m. Fuente: Propia.

El histograma evidencia que las clases de velocidad con mayor ocurrencia en Sotaquirá son las de 2 m/s y 3 m/s, con frecuencias de 2757 y 2800 registros respectivamente, seguidas por la clase de 4 m/s, esto indica que el viento en la zona de estudio se encuentra principalmente en rangos bajos, lo cual debe ser considerado al evaluar el desempeño esperado del aerogenerador.

Aunque existe una cantidad significativa de horas con velocidades entre 4 y 5 m/s, las velocidades mayores a 5 m/s tienen una ocurrencia marginal (menos del 10% del tiempo), lo que resalta la necesidad de aerogeneradores que operen eficientemente desde velocidades bajas, ahora bien, para complementar la descripción estadística del viento, se construyó la curva de duración de velocidades, que permite visualizar cuántas horas al año se mantiene una velocidad igual o superior a un determinado valor. La Figura 16 muestra esta relación para el viento a 15 metros.

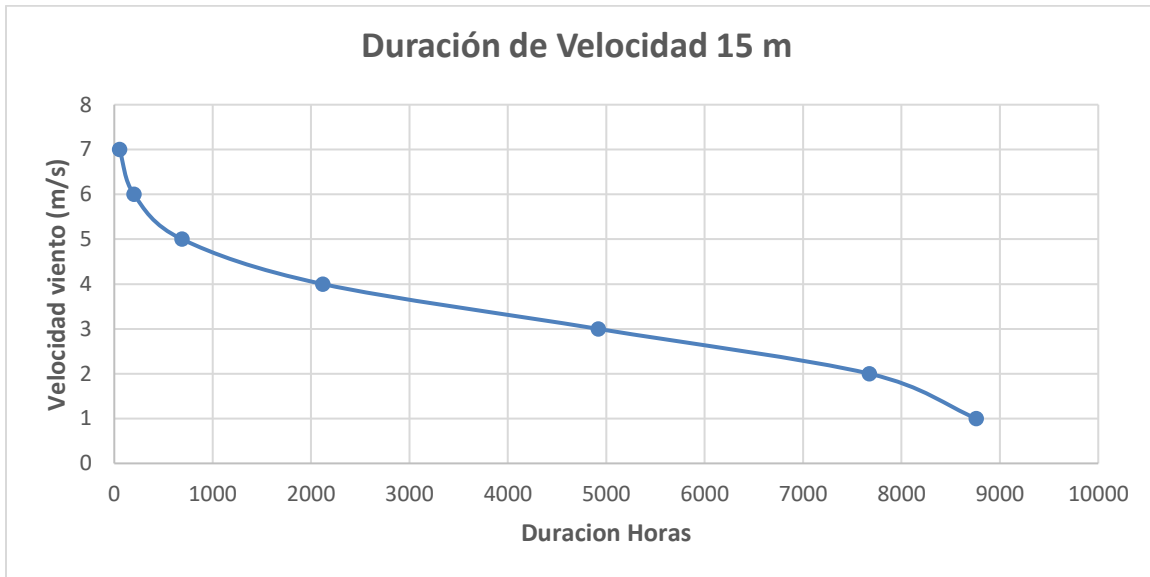


Figura 16. Curva de duración de velocidad del viento a 15 m. Fuente: Propia.

Con base en la información estadística obtenida, se aplicó la distribución de Weibull para Sotaquirá con el fin de estimar de forma probabilística la distribución horaria del viento a 15 metros. A continuación, en la Tabla 7, se presentan los resultados más relevantes de la distribución.

Tabla 7. Resultados de la distribución de Weibull a 15 m para Sotaquirá. Fuente: Propia.

Velocidad u (m/s)	CDF	PDF	PDF horas/año
1	0.15	0.2882	2524.89
2	0.5	0.3536	3112.88
3	0.79	0.2228	1951.41
4	0.94	0.0824	737.72
5	0.99	0.0202	176.81
6	0.9986	0.0031	27.41
7	0.9999	0.0003	2.77
8	≈1.000	0.000021	0.18

Los resultados de este ajuste evidencian que los valores más altos de densidad de probabilidad (pdf) se encuentran en los rangos de velocidad entre 2 y 3 m/s, con duraciones estimadas de 3112.88 y 1951.41 horas/año respectivamente, reforzando el comportamiento identificado previamente en el histograma y la curva de duración, ratificando que el régimen eólico de Sotaquirá se encuentra mayoritariamente entre 1 y 4 m/s y permitiendo

así anticipar que la generación de energía se concentrará principalmente en la franja de velocidades bajas, lo cual refuerza la decisión técnica de emplear un aerogenerador que opere con eficiencia desde 2.5 m/s.

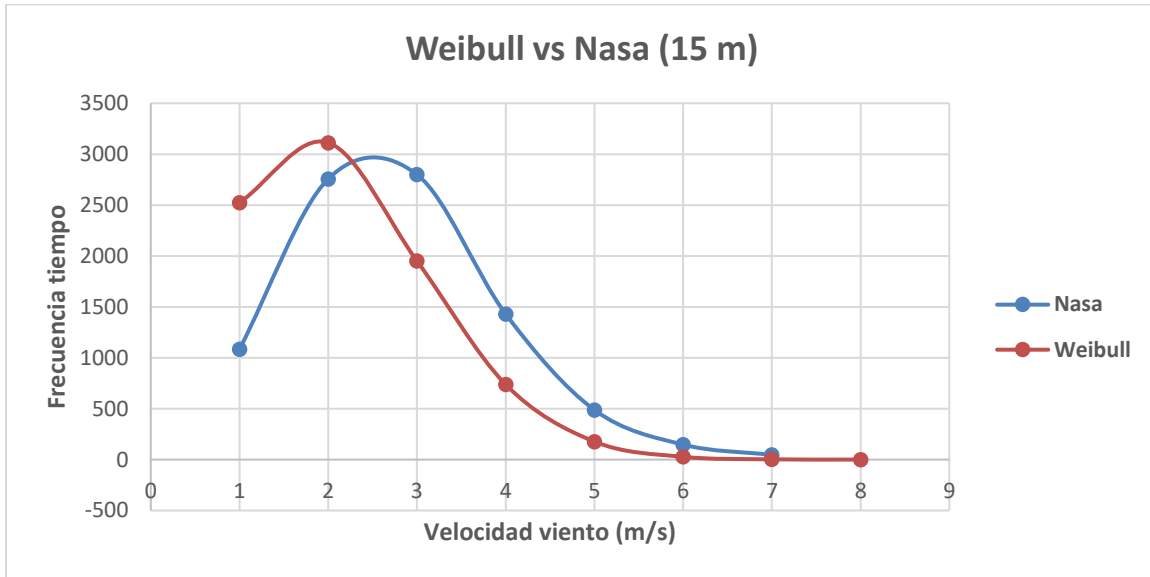


Figura 17. Comparación entre la distribución empírica (NASA) y el ajuste teórico de Weibull a 15 m (Sotaquirá). Fuente: Propia.

La Figura 17 permite comparar la distribución empírica de velocidades de viento (calculada a partir de los registros horarios de NASA Power a 10 m y 50 m, extrapolados a 15 m mediante la ley de potencias) frente a la distribución ajustada mediante Weibull para la misma altura, así pues, se observa una buena correspondencia general entre ambas curvas, especialmente en el rango de velocidades de 1 a 4 m/s, donde se concentran los valores más representativos del recurso eólico, no obstante, Weibull aunque sobreestima la probabilidad para rangos menores (1 y 2 m/s) subestima las probabilidad de valores altos, lo que representa una estimación conservadora de producción de energía, esto debido a que esta propiedad es inherente al modelo teórico y busca capturar el comportamiento general del viento con una función continua, sacrificando cierta precisión puntual en favor de una representación global adecuada.

Este análisis comparativo permite validar la idoneidad del ajuste de Weibull como herramienta de caracterización del recurso, proporcionando una base robusta para el cálculo energético en la siguiente sección.

- **Samacá**

En el caso del municipio de Samacá, se aplicó el mismo procedimiento de extrapolación a 15 metros y análisis de frecuencia. En la Figura 18 se presentan los registros anuales por clase de velocidad y se ilustra el comportamiento mediante un histograma.

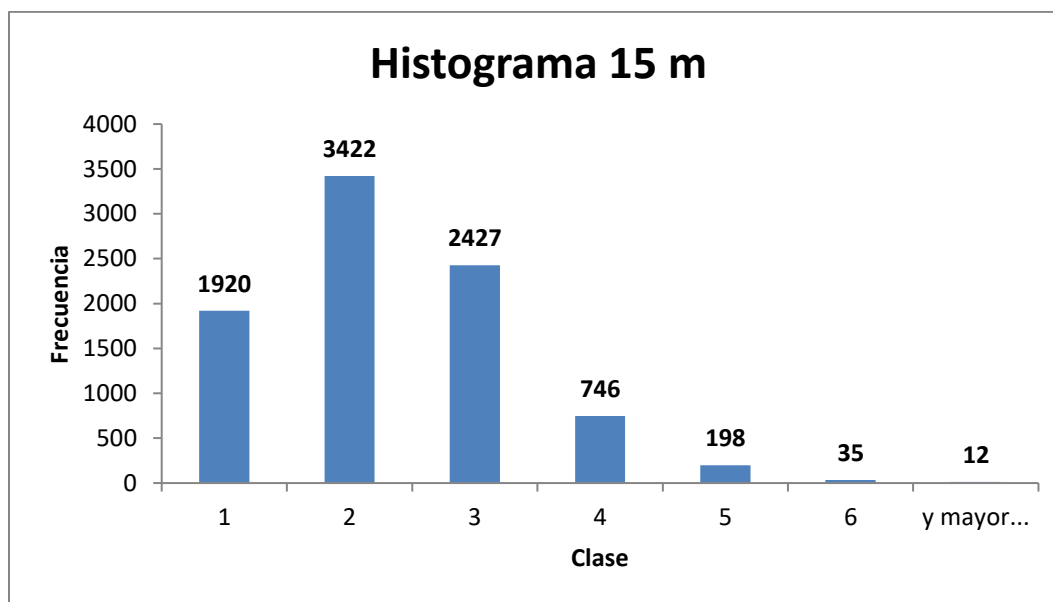


Figura 18. Histograma de frecuencias de velocidad de viento a 15 m (Samacá). Fuente: Propia.

En este caso, las velocidades más frecuentes se encuentran en el rango de 2 a 3 m/s, con 3422 y 2427 registros respectivamente, en contraste las velocidades superiores a 4 m/s ocurren de forma significativamente menos frecuente, representando menos del 15% del año.

La curva de duración de velocidades (Figura 19) permite visualizar de manera acumulativa cuántas horas al año se presentan velocidades por encima de ciertos umbrales.

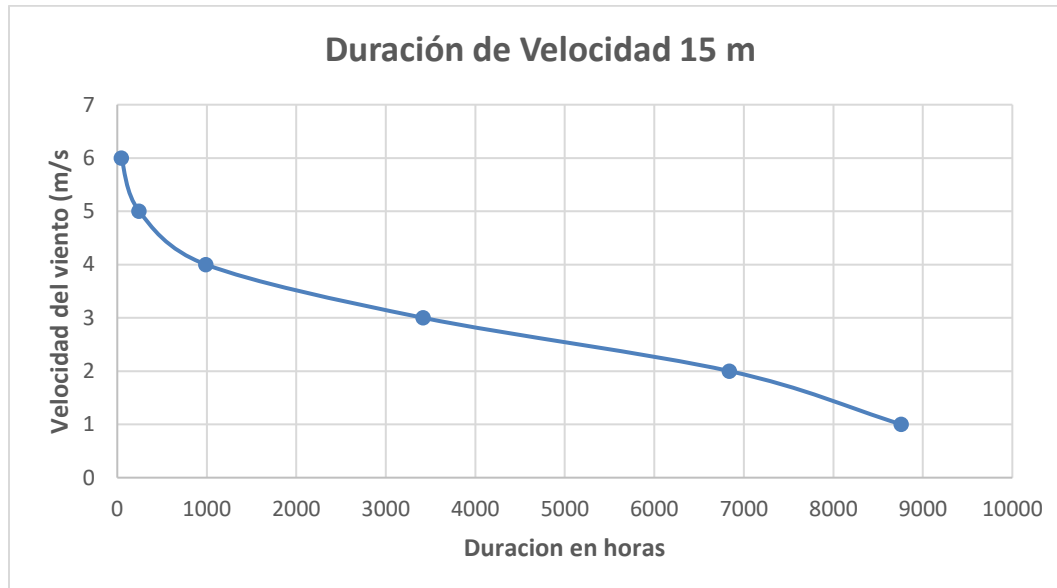


Figura 19. Curva de duración de velocidad del viento a 15 m (Samacá). Fuente: Propia.

En términos prácticos, se observa que velocidades superiores a 4 m/s ocurren aproximadamente 1280 horas al año, mientras que velocidades mayores a 5 m/s se presentan por menos de 300 horas anuales, lo que destaca el comportamiento de viento bajo a moderado también en esta localidad.

Los resultados del ajuste de la distribución de Weibull para Samacá se muestran resumidos en la Tabla 8, considerando únicamente los valores más representativos.

Tabla 8. Frecuencia de ocurrencia por clase de velocidad del viento a 15 m (Samacá).

Fuente: Propia.

Velocidad u (m/s)	CDF	PDF	PDF horas/año
1	0.22	0.3746	3281.42
2	0.61	0.3619	3170.6
3	0.88	0.168	1471.71
4	0.98	0.0444	389.16
5	0.997	0.0071	61.97
6	0.9997	0.0007	6.1
7	≈1.000	0.00004	0.38

El patrón de distribución refleja un comportamiento similar al de Sotaquirá, aunque con una mayor concentración en 2 m/s, siendo la frecuencia de velocidades superiores a 4 m/s es muy reducida, lo que nuevamente enfatiza la necesidad de tecnologías con buena respuesta a vientos bajos.

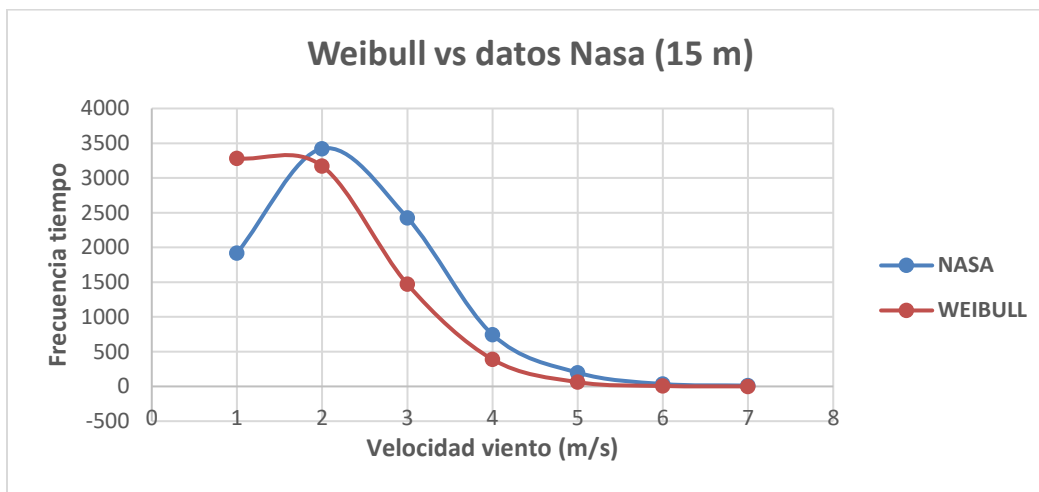


Figura 20. Comparación entre la distribución empírica y el ajuste de Weibull a 15 m (Samacá). Fuente: Propia.

La figura 20 comparación entre la curva empírica y la ajustada por Weibull revela que, si bien el modelo suaviza la distribución real, logra representar adecuadamente la tendencia general del recurso eólico en Samacá. Este resultado refuerza su utilidad como base para los cálculos energéticos del sitio.

- **Soracá**

Para el municipio de Soracá, se observa un régimen eólico más favorable en comparación con Sotaquirá y Samacá, esta distribución de frecuencias para velocidades a 15 metros muestra una mayor concentración en valores medios. La Figura 21 presenta los registros por clase de velocidad y se muestra el histograma correspondiente.

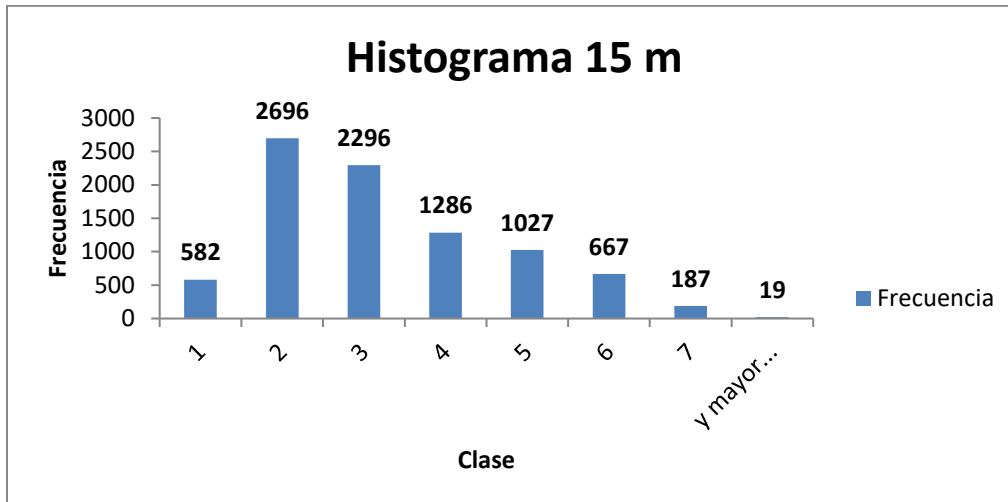


Figura 21. Histograma de frecuencias de velocidad de viento a 15 m (Soracá). Fuente: Propia.

A diferencia de los otros municipios, Soracá presenta una cantidad significativa de registros por encima de 4 m/s, se puede observar que velocidades entre 4 y 6 m/s son especialmente frecuentes, lo cual resulta muy favorable desde el punto de vista energético.

La curva de duración (Figura 22) refleja que más de 3500 horas al año el viento se mantiene por encima de 4 m/s, y más de 1000 horas por encima de 5 m/s, lo que convierte a Soracá en un sitio con alto potencial para generación eólica distribuida.

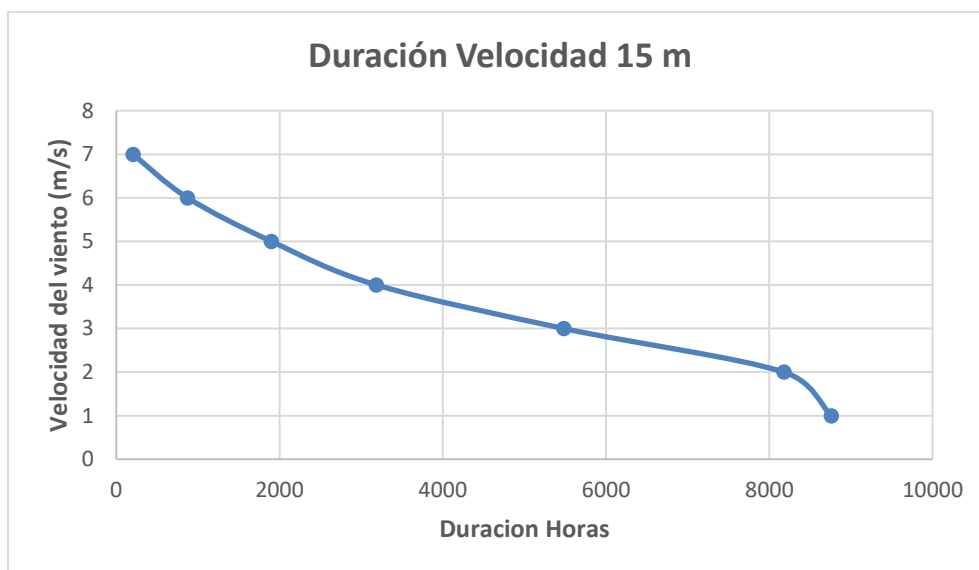


Figura 22. Curva de duración de velocidad del viento a 15 m (Soracá). Fuente: Propia.

En cuanto a los resultados principales del ajuste de Weibull para Soracá, se destaca una mayor uniformidad en la distribución, con una buena parte del año concentrada en velocidades útiles para generación, ahora bien, la forma más amplia y desplazada de la curva PDF refleja un sitio con viento más constante. La tabla 9 resume los principales resultados de este ajuste, y la figura 23 compara entre la distribución empírica de frecuencias y la función ajustada de Weibull.

Tabla 9. Resultados de la distribución de Weibull a 15 m para Soracá. Fuente: Propia.

Velocidad u (m/s)	CDF	PDF	PDF horas/año
1	0.096	0.1839	1611.84
2	0.335	0.273	2391.77
3	0.602	0.2459	2154.81
4	0.808	0.1596	1398.35
5	0.924	0.0787	689.32
6	0.975	0.0302	264.24
7	0.994	0.0091	79.75
8	0.999	0.0022	19.08

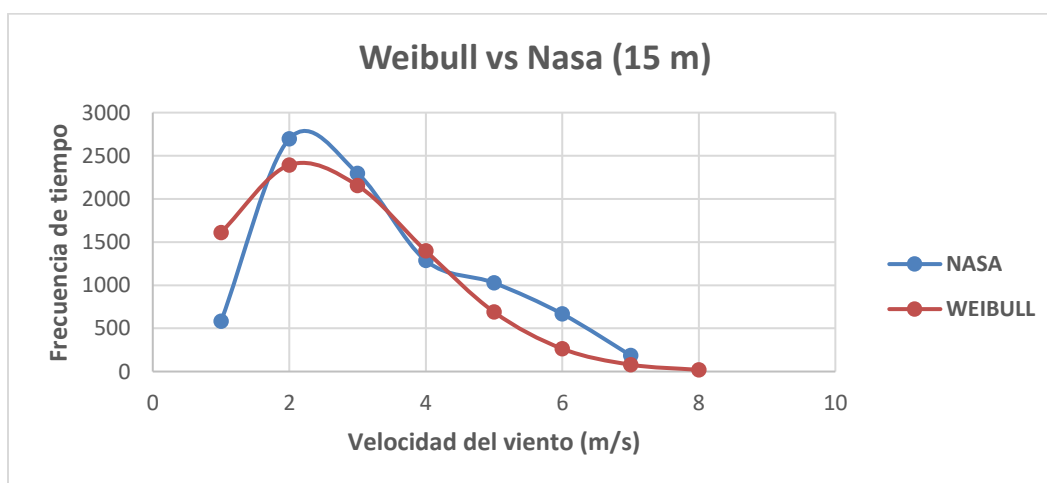


Figura 23. Comparación entre la distribución empírica y el ajuste de Weibull a 15 m (Soracá). Fuente: Propia.

La curva de Weibull logra representar con bastante precisión la tendencia de la distribución empírica, aunque la función suaviza los picos observados en los datos reales, el ajuste

mantiene el perfil general del recurso, especialmente en los rangos intermedios de velocidad (2 a 6 m/s), fundamentales para la operación eficiente del aerogenerador.

6.1.26 Cálculo de energía producida

- **Sotaquirá**

Con base en la caracterización del recurso eólico realizada mediante la distribución de Weibull y considerando el aerogenerador seleccionado (Henryd Wind Power de 5 kW), se procedió a estimar la energía producida anualmente en cada una de las clases de velocidad identificadas, para así permitir traducir la información estadística del viento en una métrica energética concreta, considerando la curva de potencia del equipo y la cantidad de horas asociadas a cada intervalo de velocidad, cabe señalar que, para efectos de este cálculo, se incluyó una pérdida general del 1% asociada a factores como eficiencia del sistema, pérdidas en el inversor, cableado y condiciones de operación reales.

Tabla 10. Estimación de energía anual generada para el caso de Sotaquirá (Henryd Wind Power 5 kW). Fuente: Propia.

U m/s	kW	horas	energia kW-h	energia MW-h	Perdida 1%
1	0	1335.89	0.00	0.00	0.00
2	0	3020.60	0.00	0.00	0.00
3	0.1	2604.10	260.41	0.26	0.26
4	0.4	1297.24	518.90	0.52	0.51
5	1	407.05	407.05	0.41	0.40
6	1.7	82.95	141.01	0.14	0.14
7	2.3	11.12	25.58	0.03	0.03
8	3.1	0.99	3.06	0.00	0.00
9	3.8	0.06	0.22	0.00	0.00
10	4.5	0.00	0.01	0.00	0.00
11	5.1	0.00	0.00	0.00	0.00
12	5.5	0.00	0.00	0.00	0.00
13	6.3	0.00	0.00	0.00	0.00
14	6.8	0.00	0.00	0.00	0.00
Total		8760.00	1356.24	1.356	1.343

El análisis de la tabla 10, revela que la mayor parte de la energía generada se concentra en los rangos de 3 a 5 m/s, donde el aerogenerador comienza a entrar en operación

significativa, en particular, el intervalo de 4 m/s contribuye con más de 518 kWh y el de 5 m/s con otros 407 kWh, representando conjuntamente más del 68% de la energía total producida, bajo esta perspectiva, es importante señalar que, si bien los rangos de velocidad por debajo de 3 m/s representan una porción considerable del tiempo anual, no aportan a la generación energética debido a que se encuentran por debajo de la velocidad de arranque del aerogenerador, asimismo, las velocidades superiores a 6 m/s, aunque aportan en menor medida, tienen un rol complementario para alcanzar el total estimado de 1.356 MWh/año, descontando una pérdida técnica estándar del 1%.

- **Samacá**

Para el municipio de Samacá, se realizó el mismo procedimiento de estimación energética empleando la distribución de Weibull ajustada a 15 metros y la curva de potencia del aerogenerador Henryd Wind Power de 5 kW. En la Tabla 11 se presentan los resultados de la generación anual estimada.

Tabla 11. Estimación de energía anual generada para el caso de Samacá (Henryd Wind Power 5 kW). Fuente: Propia.

U m/s	kW	horas	Energía kW-h	Energía MW-h	Perdida 1%
1	0	1884.57	0.00	0.00	0.00
2	0	3484.78	0.00	0.00	0.00
3	0.1	2328.62	232.86	0.23	0.23
4	0.4	849.56	339.82	0.34	0.34
5	1	185.22	185.22	0.19	0.18
6	1.7	25.01	42.51	0.04	0.04
7	2.3	2.13	4.90	0.00	0.00
8	3.1	0.12	0.36	0.00	0.00
9	3.8	0.00	0.02	0.00	0.00
10	4.5	0.00	0.00	0.00	0.00
11	5.1	0.00	0.00	0.00	0.00
Total		8760.00	805.68	0.81	0.80

El comportamiento energético en Samacá muestra una concentración de generación en los intervalos de 3 a 5 m/s, con una producción total de aproximadamente 805.68 kWh/año, por su parte, la velocidad de 4 m/s se consolida como la de mayor aporte (339.8 kWh),

seguida por los 3 m/s y 5 m/s, siendo estos tres intervalos representan en conjunto más del 90% de la energía generada, en contraste, las velocidades superiores a 6 m/s solo aportan de forma marginal, con menos de 50 kWh anuales y por su parte, los valores inferiores a 3 m/s, aunque muy frecuentes, no contribuyen a la producción energética debido a que se encuentran por debajo de la velocidad de arranque del aerogenerador.

Estos resultados son consistentes con el análisis estadístico del recurso, confirmando que Samacá posee un régimen de viento moderadamente bajo, pero que aún resulta aprovechable con tecnologías adecuadas, estos patrones de velocidad definen un comportamiento eólico que, aunque limitado en potencia máxima, permite una producción energética anual relevante y continua, alcanzando un total estimado de 805.68 kWh/año, descontando una pérdida técnica estándar del 1%.

- **Soracá**

Tabla 12. Estimación de energía anual generada para el caso de Soracá (Henryd Wind

Power 5 kW). Fuente: Propia.

U m/s	kW	horas	Energía kW-h	Energía MW-h	Perdida 1%
1	0	843.05	0.00	0.00	0.00
2	0	2092.76	0.00	0.00	0.00
3	0.1	2343.35	234.33	0.23	0.23
4	0.4	1792.56	717.02	0.72	0.71
5	1	1024.24	1024.24	1.02	1.01
6	1.7	452.36	769.01	0.77	0.76
7	2.3	157.02	361.14	0.36	0.36
8	3.1	43.24	134.03	0.13	0.13
9	3.8	9.50	36.09	0.04	0.04
10	4.5	1.67	7.52	0.01	0.01
11	5.1	0.24	1.20	0.00	0.00
12	5.5	0.03	0.15	0.00	0.00
13	6.3	0.00	0.02	0.00	0.00
14	6.8	0.00	0.00	0.00	0.00
15	6.7	0.00	0.00	0.000	0.000
16	6.3	0.00	0.00	0.00	0.00
Total		8760.00	3284.75	3.28	3.25

El municipio de Soracá, al presentar una distribución de velocidades más concentrada en rangos intermedios y altos, ofrece un escenario más favorable para la generación de energía eólica, con base en los resultados del ajuste de Weibull y utilizando la curva de potencia del aerogenerador Henryd Wind Power de 5 kW, se estimó la producción energética anual, como se pudo observar en la tabla 12.

La energía generada en Soracá se concentra principalmente entre los intervalos de 4 a 7 m/s, en los cuales se alcanza una producción superior a los 2900 kWh, se puede demostrar con esta distribución que es un recurso eólico mucho más robusto y continuo, lo que incrementa significativamente el rendimiento del aerogenerador, además en total, se estimó una generación anual de 3284.75 kWh/año, descontando las pérdidas técnicas del 1%, representando un potencial de producción considerablemente superior al de los otros dos municipios evaluados, consolidando a Soracá como la zona de mayor aprovechamiento eólico dentro del estudio.

6.1.27 Comparación y validación del aerogenerador seleccionado

Con el fin de validar la decisión tomada respecto al aerogenerador seleccionado para este estudio, se realizó una comparación entre el rendimiento energético del Henryd Wind Power de 5 kW y el aerogenerador BRAUN de 5.5 kW, ambos evaluados bajo las mismas condiciones de modelamiento eólico, el análisis para el aerogenerador BRAUN se llevó a cabo empleando también datos de NASA POWER, aplicando la extrapolación vertical con la ley de potencias, pero ajustando esta vez la altura de referencia a 20 metros, correspondiente a la instalación nominal de dicho equipo.

Posteriormente, se aplicó nuevamente la distribución de Weibull y se utilizó la curva de potencia del modelo BRAUN, que si bien presenta una potencia nominal superior (5.5 kW), requiere una velocidad de arranque más elevada para iniciar su operación. Este aspecto resultó determinante en los resultados energéticos obtenidos.

Tabla 13. Estimación de energía anual generada con el aerogenerador BRAUN 5.5 kW a 20 metros (Caso Sotaquirá). Fuente: Propia.

U m/s	kW	horas	Energía kW-h	Energía MW-h	Perdida 1%
1	0	1116.25	0.00	0	0
2	0	2768.15	0.00	0	0
3	0.1	2661.02	266.10	0.2661	0.2634
4	0.25	1508.96	377.24	0.3772	0.3735
5	0.5	549.62	274.81	0.2748	0.2721
6	0.8	132.28	105.82	0.1058	0.1048
7	1.33	21.26	28.28	0.0283	0.0280
8	2	2.29	4.58	0.0046	0.0045
9	2.85	0.17	0.47	0.0005	0.0005
10	4	0.01	0.03	0.00	0.00
11	5	0.00	0.00	0.00	0.00
12	6	0.00	0.00	0.00	0.00
13	6	0.00	0.00	0.00	0.00
14	6	0.00	0.00	0.00	0.00
Total		8760.00	1057.342	1.0573	1.0468

Como se observa en la Tabla 13, el rendimiento energético del aerogenerador BRAUN es inferior al obtenido con el modelo Henryd en Sotaquirá, a pesar de contar con una mayor potencia nominal y adicionalmente una mayor altura (20 m), esto se debe principalmente a su mayor velocidad mínima de operación, lo que lo limita significativamente en entornos con vientos predominantes en rangos bajos como los identificados en este estudio, por tanto, la selección del aerogenerador Henryd Wind Power de 5 kW se justifica no solo por su compatibilidad con el perfil eólico de los sitios analizados, sino también porque maximiza la captación de energía en condiciones de viento moderado, haciendo un uso más eficiente de las horas disponibles de viento operativo. Esta validación refuerza la pertinencia de la elección tecnológica realizada para el diseño del sistema.

6.1.28 Análisis de Generación Energética Mediante Simulación en WAsP

Con el fin de validar y contrastar los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico con la distribución de Weibull, se procedió a realizar una simulación energética utilizando el software especializado WAsP 12 que es una herramienta que permite modelar con mayor

detalle el comportamiento del recurso eólico sobre la topografía real, incorporando variables como la rugosidad del terreno, obstáculos y efectos orográficos complejos [39], de este modo, para el desarrollo de este análisis, se seleccionaron las tres ubicaciones priorizadas en el estudio (Samacá, Sotaquirá y Soracá), y se realizaron simulaciones independientes para cada sitio utilizando dos fuentes de datos comparativas:

- Fuente 1: Datos satelitales horarios del año 2023 proporcionados por la base NASA POWER.
- Fuente 2: Datos de Climatología General del Terreno (GWC) extraídos del portal del Global Wind Atlas (GWA).

El objetivo de esta sección es realizar una comparación entre los resultados energéticos obtenidos a partir de cada fuente y analizar cómo varía la producción estimada según las condiciones iniciales y la resolución de los datos utilizados.

- **Soracá**

Tabla 14. Comparación de parámetros eólicos simulados en WAsP para la ubicación de Soracá a 15 m utilizando datos de NASA POWER y GWA. Fuente: Propia.

Parámetro	NASA POWER (15 m)	GWC (15 m)
Velocidad media del viento (U) [m/s]	2,72	4,32
Parámetro A de Weibull [m/s]	3,1	4,8
Parámetro k de Weibull	2,17	1,60
Densidad de potencia [W/m²]	16	87
AEP neto estimado [kWh/año]	1.319	6.429
Pérdidas por estela (Wake loss) [%]	0,00	0,00
Índice de rugosidad (RIX) [%]	0,7	0,7

Al comparar ambas fuentes, se observan diferencias significativas en los valores obtenidos, por ejemplo, el dataset GWC muestra una velocidad media del viento de 4,32 m/s,

notablemente superior a la estimada con datos de NASA (2,72 m/s), lo que impacta directamente en la energía anual generada, siendo 6.429 kWh para GWC frente a 1.319 kWh para NASA, adicionalmente la densidad de potencia alcanzada con datos GWC (87 W/m²) indica condiciones más favorables para la operación de microturbinas, en comparación con los 16 W/m² derivados del análisis con datos satelitales, ahora bien, es importante resaltar que ambas simulaciones se realizaron bajo las mismas condiciones topográficas y con igual modelo de turbina, garantizando una comparación técnica válida. Para la simulación realizada en WAsP, se utilizó un mapa de curvas de nivel obtenido a partir de los datos abiertos de Colombia, el cual fue procesado mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) para efectuar el recorte correspondiente al municipio de Soracá y sus alrededores, con el fin de representar adecuadamente las características topográficas locales que influyen en el flujo del viento. En la Figura 24 se presenta el mapa del terreno empleado en la simulación, indicando además la ubicación exacta del punto donde se situó la turbina, correspondiente a las coordenadas (Latitud: 5.5°, Longitud: -73.33°). Estas coordenadas fueron seleccionadas por encontrarse en la zona central del área de cultivo definida para el estudio, representando un punto característico de las condiciones locales del terreno, asimismo, dicha ubicación se utilizó como referencia común para la descarga de los datos del recurso eólico en las plataformas NASA POWER y Global Wind Atlas (GWA).

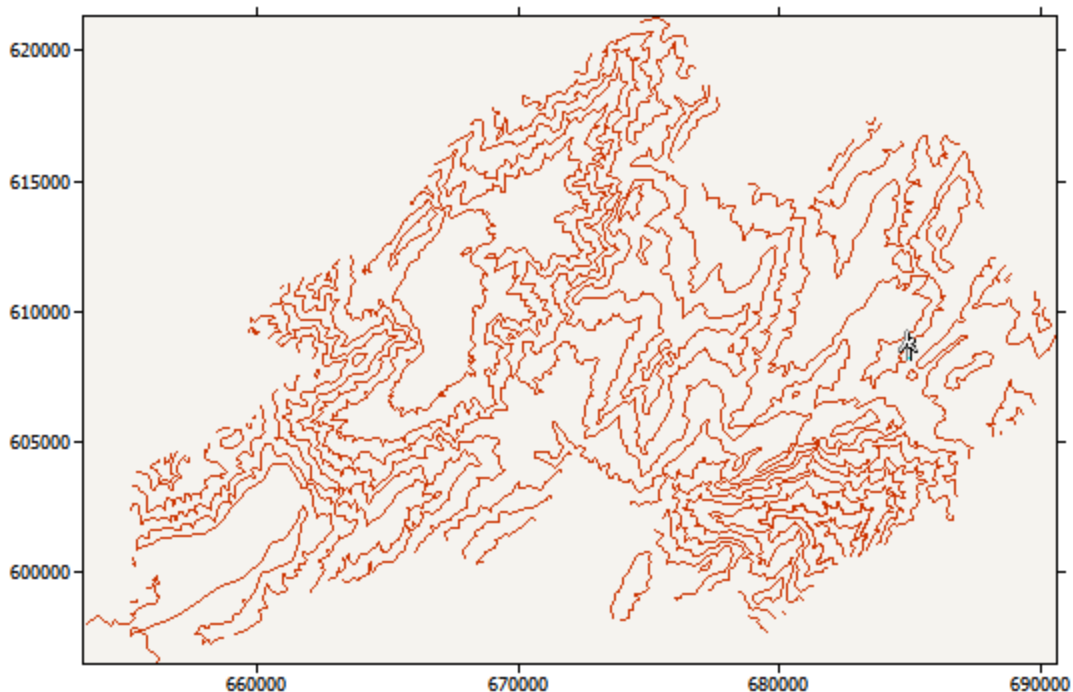


Figura 24. Mapa de curvas de nivel y ubicación del sitio de instalación de la turbina en el municipio de Soracá. Fuente propia mediante software WAsP.

- **Sotaquirá**

Tabla 15. Comparación de parámetros eólicos simulados en WAsP para la ubicación de Sotaquirá a 15 m utilizando datos de NASA POWER y GWA. Fuente: Propia.

Parámetro	NASA POWER (15 m)	GWC (15 m)
Velocidad media del viento (U) [m/s]	2,19	2,49
Parámetro A de Weibull [m/s]	2,5	2,4
Parámetro k de Weibull	2,01	0,94
Densidad de potencia [W/m²]	9	49
AEP neto estimado [kWh/año]	600	2.825
Pérdidas por estela (Wake loss) [%]	0,00	0,00
Índice de rugosidad (RIX) [%]	1,7	1,7

Los resultados para la ubicación de Sotaquirá muestran diferencias marcadas entre ambas fuentes, ejemplo la velocidad media del viento estimada a partir del modelo GWC fue de 2,49 m/s, mientras que para el dataset de NASA fue de 2,19 m/s, y aunque ambas velocidades se consideran bajas para una explotación eólica convencional, de igual manera los datos del GWC indican una mayor densidad de potencia (49 W/m^2) y una producción energética anual neta más elevada (2.825 kWh) frente a los 600 kWh estimados con datos satelitales. En la Figura siguiente se muestra el mapa del terreno utilizado en la simulación, junto con la ubicación específica de la turbina, establecida en las coordenadas (Latitud: 5.76° , Longitud: -73.24°). Estas coordenadas fueron seleccionadas por encontrarse en la zona central del área de cultivo definida para el estudio, representando un punto característico de las condiciones locales del terreno, asimismo, dicha ubicación se utilizó como referencia común para la descarga de los datos del recurso eólico en las plataformas NASA POWER y Global Wind Atlas (GWA).

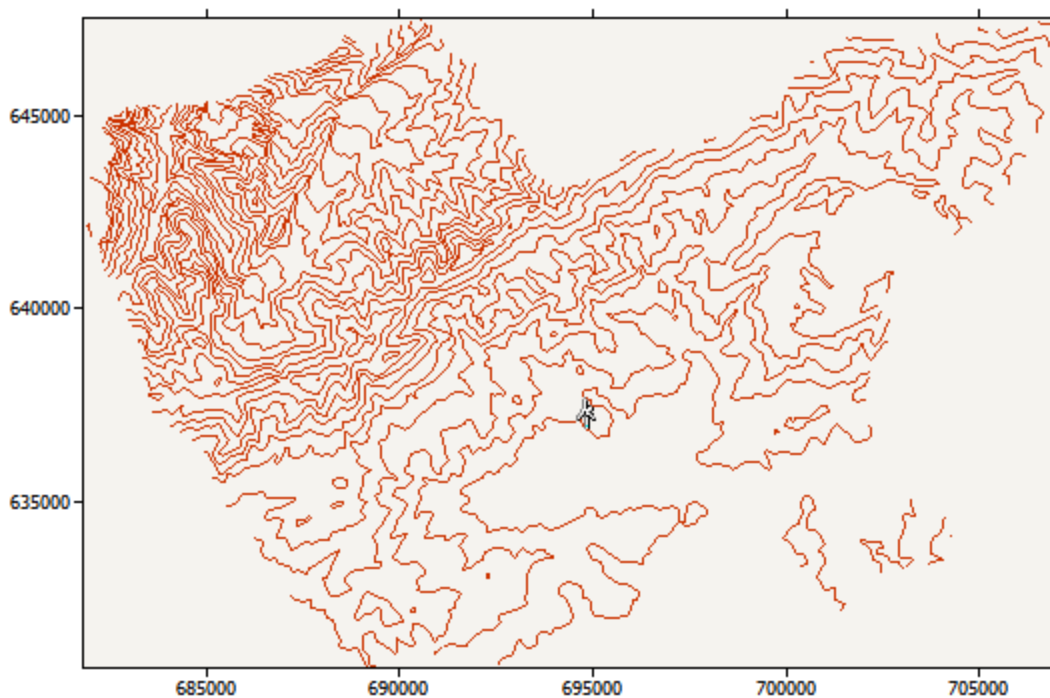


Figura 25. Mapa de curvas de nivel y ubicación del sitio de instalación de la turbina en el municipio de Sotaquirá. Fuente propia mediante software WAsP.

Al comparar los resultados obtenidos mediante simulación en WAsP para Soracá y Sotaquirá, se observan diferencias consistentes entre las estimaciones realizadas con datos

del GWC y aquellos provenientes de la NASA POWER, en todos los casos, los valores reportados por GWC como velocidad media del viento, densidad de potencia y producción energética anual, son sensiblemente mayores que los calculados a partir de datos de NASA. Esta discrepancia se explica por la metodología utilizada en cada fuente, el GWA está basado en modelos numéricos de alta resolución, diseñados para representar condiciones ideales del recurso eólico considerando una topografía suavizada y sin interferencias locales significativas, lo que puede dar lugar a estimaciones más optimistas del potencial eólico [40], en cambio, los datos de NASA POWER derivan de reanálisis atmosféricos que integran observaciones reales y múltiples variables meteorológicas, incluyendo efectos relevantes como rugosidad del terreno, obstáculos físicos y microclimas locales, por lo que estas características generan estimaciones más realistas para zonas montañosas o rurales con heterogeneidad en la superficie [41].

También existen investigaciones adicionales que corroboran los hallazgos sobre la variabilidad y las limitaciones del uso de GWC, ejemplo, un estudio realizado en México comparó datos de GWC con observaciones locales y reanálisis (MERRA-2 y ERA-5), concluyendo que aunque GWC puede mejorar las simulaciones energéticas a nivel estatal o nacional, en zonas con orografía compleja tiende a sobreestimar el recurso eólico, especialmente donde no se consideran efectos de obstáculos locales ni microclimas específicos [42].

De manera similar, una evaluación basada en datos de turbinas eólicas pequeñas en Estados Unidos encontró que herramientas como GWA3 presentaron una sobreestimación del factor de capacidad anual en alrededor de 7.3 puntos porcentuales en promedio, mientras que otras fuentes como SAM y Wind Report, que utilizan reanálisis más realistas como MERRA-2 o ERA-5, mostraron menores sesgos generales y mejor precisión bajo condiciones reales de viento a baja altura [43], por tanto, mientras que GWC proporciona un panorama ideal del recurso disponible, los datos de NASA POWER ofrecen una estimación conservadora y más cercana a las condiciones reales, lo que es mejor para el diseño técnico y la planificación operativa de sistemas de microgeneración eólica en entornos rurales como Boyacá.

6.1.29 Comparación entre Resultados de Weibull y WAsP con Datos de NASA

POWER

Con el objetivo de validar la robustez de la estimación energética realizada mediante la distribución de Weibull, se compararon los valores de producción anual de energía con los resultados obtenidos mediante simulación en WAsP, empleando datos satelitales de NASA POWER para cada una de las tres ubicaciones estudiadas.

En el caso de Samacá, la diferencia entre ambos es significativa, con Weibull estimando casi el doble de energía generada respecto al resultado obtenido en WAsP, siendo la producción estimada de 798 kWh/año y 431 kWh/año respectivamente, el cual, puede estar relacionado con la suavización inherente al modelo de Weibull que tiende a sobreestimar el recurso disponible en zonas con régimen eólico predominantemente bajo y con baja frecuencia de velocidades superiores a 4 m/s, como lo evidenció el histograma de frecuencias.

Ahora bien, en Sotaquirá también se observa una diferencia significativa, aunque menor que en Samacá porcentualmente, Weibull estima un valor más alto que WAsP, siendo de 1343 kWh/año frente a 600 kWh/año respectivamente, donde el perfil de velocidades en esta zona muestra predominancia de vientos en el rango de 2 a 4 m/s, lo que influye en la sensibilidad del método Weibull si no se incorpora adecuadamente la curva real de potencia del aerogenerador.

Finalmente, Soracá presenta el mayor potencial energético de las tres ubicaciones, sin embargo, el valor estimado por Weibull (3252 kWh/año) es más del doble del calculado en WAsP (1319 kWh/año), esta diferencia se puede explicar debido a el comportamiento de Weibull en rangos de viento donde hay mayor regularidad, sumado al hecho de que el mismo, se basa en frecuencias idealizadas que no reflejan pérdidas aerodinámicas o condiciones de turbulencia, además, las simulaciones realizadas en WAsP incorporan la variación de la dirección del viento y las condiciones del terreno, como la orografía y la rugosidad, las cuales influyen directamente en el comportamiento del flujo eólico. A continuación, se presenta gráfica de la comparación de resultados.

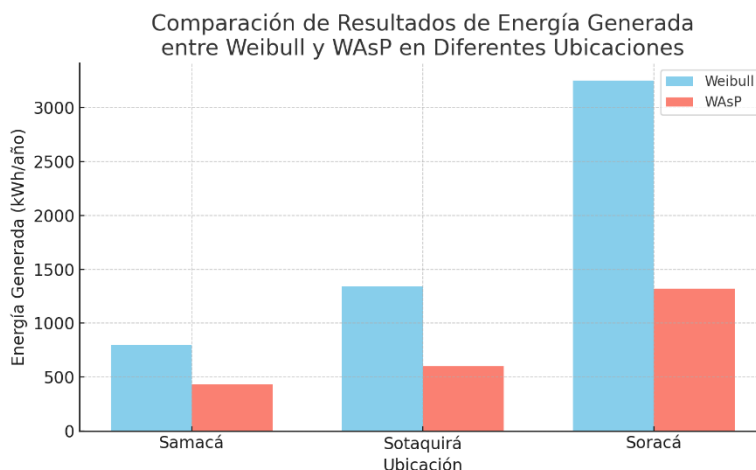


Figura 26. Comparación de energía generada entre Weibull y WAsP. Fuente: Propia.

La comparación entre los resultados obtenidos con el método Weibull y con simulación en WAsP utilizando datos de NASA POWER demuestra que, aunque Weibull es una herramienta útil para estimaciones preliminares, suele sobreestimar la producción energética en condiciones reales de viento, mientras que WAsP genera estimaciones más conservadoras y robustas frente a obstáculos, rugosidad del terreno y turbulencia local, lo que lo convierte en una herramienta más confiable para el dimensionamiento técnico de proyectos de microgeneración.

Desde el punto de vista metodológico, la combinación de ambos enfoques proporciona una gran estrategia en la cual, Weibull puede utilizarse para definir rangos de expectativa energética, mientras que WAsP sirve para validar técnicamente y ajustar los valores a condiciones más cercanas a la realidad operativa, tal como se evalúa en diferentes estudios como el de Ferhat Bingöl (2020), quien encontró que el método de momento presenta un rendimiento superior comparado con el estándar de WAsP, especialmente en sitios con presencia de vientos diversos o entornos topográficos complejos [44], o el de Teimourian et al (2022), que evaluaron múltiples técnicas para estimar parámetros de Weibull, concluyendo que ciertos métodos, como el de momento o el empírico modificado, ofrecen mayor precisión en la predicción de densidad de potencia, en contraste con simulaciones tipo WAsP que suelen ajustarse mejor a condiciones reales [45].

Como respaldo también para los datos obtenidos tanto en el análisis estadístico de Weibull, como los de WAsP, se realiza comparaciones con diferentes estudios académicos sobre

aerogeneradores a pequeña escala con el objetivo de contextualizar la producción energética estimada y validar la factibilidad del sistema propuesto.

En un estudio realizado en Hawái se evaluaron turbinas de 1 kW, 2.5 kW, 3.5 kW y 5kW mediante un análisis técnico económico, donde para la turbina de 5 kW, adaptada a un sitio con velocidad promedio anual entre 4.9 y 5.15 m/s, se estimó un factor de capacidad que produjo valores cercanos a los 9 y 10 MWh/año [46], alineándose con los resultados estimados en el presente estudio para los casos de la base de datos del GWA, que como se mencionó anteriormente, representan condiciones ideales, sin embargo, se debe tener en cuenta resultados menores debido a la rugosidad existente y diferente entre ambas ubicaciones, siendo que Hawái es una isla prácticamente abierta y el departamento de Boyacá se encuentra en regiones montañosas.

Por otro lado, una investigación teórica de Wrobel et al. (2021) sobre optimización de aerogeneradores de pequeña escala en condiciones de baja velocidad promedio concluyó que adaptar la velocidad nominal al régimen eólico local puede duplicar o triplicar la producción anual, especialmente en sitios con vientos débiles (2–5 m/s) [47], reforzando la pertinencia de seleccionar adecuadamente la turbina, como en este caso, una aerogenerador tipo 5 kW con velocidad de arranque baja, para mejorar tanto el rendimiento como la viabilidad técnica.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

- El análisis del recurso eólico en el departamento de Boyacá demuestra un potencial significativo en zonas rurales, especialmente en municipios como Samacá, Sotaquirá y Soracá, con velocidades de viento que permiten la implementación de sistemas de generación a pequeña escala. A pesar de que las velocidades de viento son moderadas, la energía eólica representa una alternativa viable para mejorar la sostenibilidad energética en áreas rurales.
- La elección de turbinas de eje horizontal (HAWT) con capacidades de 5–6 kW resultó adecuada para las condiciones locales de viento, garantizando una generación energética eficiente sin sobrepasar las necesidades de consumo de las áreas estudiadas. Esta capacidad se ajustó a las demandas energéticas de actividades agropecuarias como riego, favoreciendo la autosuficiencia energética en zonas aisladas.
- El uso de bases de datos satelitales como NASA POWER y el Global Wind Atlas (GWA) fue fundamental para el análisis del recurso eólico en las zonas seleccionadas, sin embargo, se evidenciaron diferencias notables entre ambas fuentes: mientras el GWA tiende a ofrecer valores más elevados de velocidad promedio del viento al basarse en modelos idealizados y condiciones atmosféricas estandarizadas, los datos de NASA POWER resultan más conservadores, ya que incorporan efectos reales de rugosidad, fricción y obstáculos. Esta comparación permitió comprender las limitaciones y alcances de cada base de datos para estudios locales de microgeneración eólica.
- al contrastar los resultados obtenidos mediante la distribución de Weibull con las simulaciones en WAsP, se observaron discrepancias en la estimación de la energía anual generada. Los cálculos con Weibull presentaron valores ligeramente superiores, debido a la naturaleza teórica del modelo y su ajuste estadístico a frecuencias ideales de viento; mientras que WAsP, al incorporar factores

- topográficos, de rugosidad y pérdidas por estela, proporcionó estimaciones más realistas y cercanas al comportamiento esperado en campo.
- Los resultados obtenidos sugieren que Boyacá tiene un gran potencial para proyectos eólicos de pequeña escala, especialmente en áreas rurales. Se recomienda seguir explorando el uso de datos satelitales combinados con mediciones locales para mejorar la precisión de las predicciones. Además, se propone incentivar la adopción de tecnologías de generación distribuida como la eólica, aprovechando los incentivos disponibles en el marco de la transición energética justa en Colombia.

REFERENCIAS

- [1] S. Barrows, D. Boff, and M. J. Culler, “Distributed Wind Brings Value to Communities,” no. March, 2024.
- [2] REN21, *Renewables 2021 Global Status Report*. 2021.
- [3] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS - CREG, “INFORME DE GESTIÓN Y DE RESULTADOS 2020 COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS BOGOTÁ,” pp. 1–53, 2021.
- [4] H. P. Frank, O. Rathmann, N. G. Mortensen, and L. Landberg, *The Numerical Wind Atals - KAMM / WAsP Method*, vol. 1252, no. June. 2001.
- [5] A. I. Osman *et al.*, “Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review,” *Environ. Chem. Lett.*, vol. 21, no. 2, pp. 741–764, 2023, doi: 10.1007/s10311-022-01532-8.
- [6] M. Guerra Sanchez, J. C. Montaña Assaf, and N. J. Ascanio Mantilla, “Implementación de energías renovables como garantía al derecho fundamental a un ambiente sano en Colombia,” *CES Derecho*, vol. 12, no. 2, pp. 87–106, 2021, doi: 10.21615/cesder.6163.
- [7] S. Cárdenas-Rodríguez, A. Pardo-García, and O. Maldonado-Bautista, “Acquisition and analysis of open source hydrometeorological data,” *Aibi, Rev. Investig. Adm. e Ing.*, vol. 12, no. 2, pp. 180–187, 2024, doi: 10.15649/2346030X.3852.
- [8] S. A. Roper, “Energía Renovable EnColombia: Resolver ElTrilema Energético,”

- pp. 1–14, 2024.
- [9] J. A. Plata Pinzón, “Colombia en la cadena de valor de la industria eólica,” pp. 1–50, 2021, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1992/55678>.
- [10] UPME and IDEAM, “Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia,” *Doc. interno Corporación Ecofondo. Bogota*, vol. 41, no. 3–4, pp. 296–310, 2017, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1080/21683565.2017.1285843%0Ahttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Estado+actual+y+retos+de+la+agroecología+en+el+contexto+de+la+política+agraria+colombiana#0>.
- [11] L. E. R. Torres, “ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL PARA LA EJECUCIÓN DE PROYECTOS DE MICROGENERACIÓN EÓLICA EN ZONAS URBANAS EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ,” 2019.
- [12] Departamento Administrativo de la Función Pública, “Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional,” 2014.
- [13] LaRepublica, “Tarifas de energía subieron 15,3% anual entre 2021 y 2024, la cifra más alta del siglo,” 2024. [Online]. Available: <https://www.larepublica.co/economia/tarifas-electricas-aumentaron-15-3-anual-entre-2021-y-2024-la-cifra-mas-alta-del-siglo-3964636>.
- [14] O. Jaramillo and M. Borjaz, “ENERGÍA del VIENTO,” *Ciencia*, pp. 18–29, 2010, [Online]. Available: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaViento.pdf.
- [15] J. Amezcua and J. Rojas, “Origen y expansión de los molinos de viento en España,” pp. 7–14, 2005, [Online]. Available: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005000600004&lng=es&nrm=iso.
- [16] M. Castro and L. Alaya, *Diseño de sistema eólico para abastecer de energía a la iluminación externa de la universidad nacional de Jaén*. 2022.

- [17] P. Peña-Carro, O. Izquierdo-Monge, L. Hernández-Callejo, and G. Martín-Jiménez, “Small wind turbines study and integration in a peri-urban microgrid,” *Rev. Fac. Ing.*, no. 104, pp. 108–117, 2022, doi: 10.17533/udea.redin.20210845.
- [18] Manwell, McGowan, and Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, vol. 17. 2009.
- [19] R. C. Siabato, “Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá,” *Univ. Nac. Colomb.*, p. 135, 2018, [Online]. Available: <http://bdigital.unal.edu.co/64252/3/1018424888.2018.pdf>.
- [20] Á. William, A. Alvarado, and C. Cardona, “Assessment of the Potential of the Wind Energy in the Soraca Hill-Tunja,” *Rev. Colombiana Tecnol. Av.*, vol. 2, no. 1692–7257, pp. 90–92, 2014.
- [21] A. Clifton, S. Barber, A. Stökl, H. Frank, and T. Karlsson, “Research challenges and needs for the deployment of wind energy in hilly and mountainous regions,” *Wind Energy Sci.*, vol. 7, no. 6, pp. 2231–2254, 2022, doi: 10.5194/wes-7-2231-2022.
- [22] D. Ostrenga, “README Document for MERRA-2 Data Products,” *Goddard Sp. Flight Cent. Distrib. Act. Arch. Cent. (GSFC DAAC), Greenbelt, MD, USA*, pp. 1–66, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.5067/VJAFPLI1CSIV>.
- [23] A. León, “Análisis De La Viabilidad De La Construcción De Un Parque Eólico Off-Shore De 80 MW En España,” 2022.
- [24] Y. Kassem, H. Gökçekuş, and M. H. A. Abdalla, “Wind energy resource assessment based on the use of multiple satellite data for sustainable energy production in Sudan,” *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 27, no. 3, pp. 7779–7815, 2025, doi: 10.1007/s10668-023-04221-w.
- [25] D. A. Valenzuela Mena, *Evaluación del recurso eólico marino en el litoral peruano para la identificación de su potencial*. 2023.
- [26] K. Gruber, C. Klöckl, P. Regner, J. Baumgartner, and J. Schmidt, “Assessing the Global Wind Atlas and local measurements for bias correction of wind power generation simulated from MERRA-2 in Brazil,” *Energy*, vol. 189, p. 116212,

- 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116212.
- [27] J. Bosch, I. Staffell, and A. D. Hawkes, “Temporally-explicit and spatially-resolved global onshore wind energy potentials,” *Energy*, vol. 131, pp. 207–217, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.05.052.
- [28] M. Zamora-Machado *et al.*, “Classification of Santa Ana winds for the evaluation of their wind potential in La Rumorosa, Baja California, Mexico,” *Ciencias Mar.*, vol. 49, 2023, doi: 10.7773/cm.y2023.3358.
- [29] C. L. Vargas Guevara, “Evaluación del potencial eólico y predicción de la velocidad de viento con Minería de Datos,” *Rev. Odigos*, vol. 1, no. 3, pp. 9–25, 2020, doi: 10.35290/ro.v1n3.2020.368.
- [30] C. G. Gebhardt, S. Preidikman, and J. Massa, *Turbinas eólicas de gran potencia y de eje horizontal: la aerodinámica inestacionaria como fuente generadora de excitaciones periódicas*. 2010.
- [31] E. Lantz, O. Roberts, J. Nunemaker, E. Demeo, K. Dykes, and G. Scott, “Increasing Wind Turbine Tower Heights: Opportunities and Challenges,” no. May, p. 66, 2019, [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73629.pdf>.
- [32] M. Al-Rawajfeh and M. Gomaa, *Comparison between horizontal and vertical axis wind turbine*, vol. 12. 2023.
- [33] E. M. Alave-Vargas, R. Orellana Lafuente, and D. F. Sempértegui-Tapia, “ESTADO DEL ARTE SOBRE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL,” *Investig. Desarro.*, vol. 22, no. 1, pp. 161–172, 2022, doi: 10.23881/idupbo.022.1-13i.
- [34] M. Saad, “Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines,” *IOSR J. Eng.*, vol. 4, pp. 27–30, Aug. 2014, doi: 10.9790/3021-04822730.
- [35] J. D. Simbaña, “Diseño de una estación de bombeo de agua de riego con su respectivo sistema de utilización 22.9kv, para el sector Mallaritos, distrito de Marcavelica, provincia de Sullana, departamento de Piura,” p. 217, 2018.
- [36] ADR, FAO, and Gobernación de Boyacá, “Plan Integral De Desarrollo

- Agropecuario Y Rural Con Enfoque Territorial,” pp. 1–99, 2019.
- [37] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, “Guía para el diseño de sistemas de riego parcelario a nivel predial,” 2022.
- [38] C. Mallampalli, *Design and operation of irrigation systems for smallholder gariculture in South Asia*. 2014.
- [39] N. Mortensen, A. Bowen, and I. Antoniou, “IMPROVING WAsP PREDICTIONS IN (TOO) COMPLEX TERRAIN,” vol. 2846, no. 2000, pp. 1–14, 2006.
- [40] N. N. Davis *et al.*, “The Global Wind Atlas,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 104, no. 8, pp. 1507–1525, 2023.
- [41] J. R. Dorrego Portela *et al.*, “Microscale Wind Assessment, Comparing Mesoscale Information and Observed Wind Data,” *Sustain.*, vol. 14, no. 19, pp. 1–12, 2022, doi: 10.3390/su141911991.
- [42] K. Gruber, P. Regner, S. Wehrle, M. Zeyringer, and J. Schmidt, “Towards global validation of wind power simulations: A multi-country assessment of wind power simulation from MERRA-2 and ERA-5 reanalyses bias-corrected with the global wind atlas,” *Energy*, vol. 238, p. 121520, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.121520.
- [43] L. M. Sheridan *et al.*, “Validation of wind resource and energy production simulations for small wind turbines in the United States,” *Wind Energy Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 659–676, 2022, doi: 10.5194/wes-7-659-2022.
- [44] F. Bingöl, “Comparison of Weibull Estimation Methods for Diverse Winds,” *Adv. Meteorol.*, vol. 2020, pp. 1–11, Jul. 2020, doi: 10.1155/2020/3638423.
- [45] H. Teimourian, M. Abubakar, M. Yıldız, and A. Teimourian, “A Comparative Study on Wind Energy Assessment Distribution Models: A Case Study on Weibull Distribution,” *Energies*, vol. 15, p. 5684, Aug. 2022, doi: 10.3390/en15155684.
- [46] Y. S. Torres and P. R. Ramos, “Techno-Economic Feasibility Study of Small Wind Turbines in Havana city,” *Rev. Cuba. Ing.*, vol. XII, no. 1, pp. 47–57, 2021.
- [47] K. Wrobel, K. Tomczewski, A. Sliwinski, and A. Tomczewski, “Optimization of a small wind power plant for annual wind speed distribution,” *Energies*, vol. 14, no. 6, pp. 1–18, 2021, doi: 10.3390/en14061587.

