

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y**

**MATEMÁTICAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA**



**TESIS**

**CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN EL  
OBSERVATORIO METEOROLÓGICO LUIS OLAZO OLIVERA -  
PERAYOC DE LA UNSAAC, CUSCO: 2012 – 2023**

**PRESENTADA POR:**

**Br. MARITZA QUISPITUPA YUPA**

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL**

**DE FÍSICO**

**ASESOR:**

**Mgt. ROLANDO LOZANO CUSI**

**CUSCO – PERÚ**

**2025**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, asesor del trabajo de investigación/tesis titulado: CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN EL OBSERVATORIO METEOROLÓGICO LUIS OLAZO OLIVERA - PERAYOC DE LA UNSAAC, CUSCO: 2012 - 2023 presentado por: MARITZA QUILSPITUPA YUDA

con Nro. de DNI: 40401331, para optar el título profesional/grado académico de FÍSICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del *Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC* y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 08%

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 15 de AGOSTO de 2025



Firma

Post firma ROLANDO LOZANO CUSI

Nro. de DNI 23962327

ORCID del Asesor 000-0001-7619-2107

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: 27259:483056012

# MARITZA QUISPITUPA YUPA

## CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN EL OBSERVATORIO METEOROLÓGICO LUIS OLAZO OLIVERA - P...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

---

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:483056012

Fecha de entrega

13 ago 2025, 1:54 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

14 ago 2025, 12:11 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

Tesis Maritza Quispitupa Yupa.pdf

Tamaño de archivo

1.8 MB

128 Páginas

22.004 Palabras

118.155 Caracteres

# 8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

---

## Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

---

## Marcas de integridad

### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## **DEDICATORIA**

A mi padre Fidel, que Dios lo tenga en su gloria, Quien me apoyo a un inicio para redactar mi tesis. Hoy concluyo este objetivo que emprendimos juntos, siempre recordaré sus palabras y enseñanzas.

A mi madre Leandra, que me anima en todo momento para seguir adelante a pesar de las adversidades.

A mis hermanos David, Amílcar y Juvenal quienes siempre están conmigo en cada paso que doy en mi vida como un equipo.

A mis amados hijos, Johor David, María Fernanda y Luis Fernando, quienes son mi fortaleza en todo momento y la razón de superación

Maritza Quispitupa Yupa

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) y la Escuela Profesional de Física, por darme la oportunidad de formarme como profesional. Reconozco especialmente a los docentes del Departamento Académico de Física (DAF) y a todos los docentes de la universidad por su valioso aporte en mi formación académica.

De manera especial, agradezco a mi asesor de tesis, Mgt. Rolando Lozano Cusi, por su apoyo constante, paciencia y orientación. En los momentos difíciles, él siempre estuvo allí motivando a seguir adelante, al igual que a los docentes de la Escuela Profesional de Física

## INDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTO .....	ii
INDICE GENERAL.....	iii
INDICE DE TABLAS .....	vii
INDICE DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN .....	xi
ABSTRACT.....	i
INTRODUCCIÓN.....	ii
CAPITULO I ASPECTOS GENERALES .....	1
1.1    Planteamiento del Problema .....	1
1.2    Formulación del Problema.....	2
1.2.1    Problema General .....	2
1.2.2    Problema Especifico.....	2
1.3    Justificación de la Investigación .....	3
1.4    Objetivos.....	3
1.4.1    Objetivo General .....	3
1.4.2    Objetivo Específico .....	3
CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	5
2.1    Energías Renovables y su Importancia .....	5
2.1.1    Definición de las Energías Renovables .....	5
2.1.2    Clasificación de las Energías Renovables .....	5
2.1.3    Beneficio de las Energías Renovables.....	6
2.2    Energía Eólica.....	6
2.2.1    Evolución Histórica .....	6

2.2.2	Origen del Viento .....	7
2.2.3	Definición del Viento .....	8
2.3	Fundamento Matemático .....	8
2.3.1	Energía del Viento .....	8
2.3.2	Densidad del Viento .....	10
2.3.3	Potencia del Viento.....	11
2.3.4	Densidad de Potencia del Viento:.....	13
2.3.5	Variación de la Velocidad del Viento con la Altura.....	16
2.3.6	Distribución del Weibull .....	16
2.3.7	Rosa de Viento .....	22
2.3.8	Rugosidad .....	23
2.3.9	Viabilidad del Recurso Eólico.....	23
2.4	Antecedentes Empíricos de la Investigación .....	24
2.4.1	Antecedentes Internacionales .....	24
2.4.2	Antecedentes Nacionales.....	26
2.4.3	Antecedentes Locales .....	27
CAPITULO III HIPÓTESIS Y VARIABLES.....		29
3.1	Hipótesis .....	29
3.1.1	Hipótesis General .....	29
3.1.2	Hipótesis Específicos.....	29
3.1.3	Identificación de Variables.....	30
CAPITULO IV METODOLOGÍA .....		31

4.1	Enfoque Metodológico .....	31
4.1.1	Tipo y Nivel de Investigación .....	31
4.1.2	Recolección de Datos .....	31
4.1.3	Población y Muestra .....	32
4.1.4	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	32
4.1.5	Procedimientos Metodológicos .....	33
4.1.6	Procesamiento de Datos .....	34
4.1.7	Presentación de Resultados .....	34
4.1.8	Limitaciones de Estudios.....	35
4.2	Selección y Descripción de la Zona de Estudio.....	36
4.2.1	Contexto Geográfico de Cusco.....	36
4.2.2	Marco Legal para el Fomento de Energías Renovables .....	36
4.2.3	Ubicación del Observatorio Meteorológico de la UNSAAC .....	38
4.2.4	Entorno y Características.....	39
4.2.5	Razones para Elegir el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera de la UNSAAC .....	40
4.2.6	Instrumentos de la Estación Meteorológica Luis Olazo Olivera de la UNSAAC .....	41
4.2.7	Anemómetros .....	42
4.2.8	Características de la Estación Meteorológica Automática Davis modelo VANTAGE PRO2-6152.....	43
4.3	Método de Estudio y Materiales .....	45

CAPITULO V RESULTADOS .....	46
5.1    Análisis de Datos .....	46
5.1.1    Clasificación de las Velocidades .....	46
5.2    Determinar las Velocidades Promedio Mensual y Anual del Viento ...	49
5.3    Calcular la Densidad del Aire en Función de la Altitud .....	65
5.3.1    Cálculo de la Densidad de Potencia del Viento.....	67
5.4    Graficas de la Rosa de Vientos .....	68
5.5    Modelar la Variabilidad del Viento Utilizando la Distribución de Weibull .....	93
CONCLUSIONES .....	103
RECOMENDACIONES .....	105
SUGERENCIAS.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	107
ANEXOS .....	110

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Clasificación de la Densidad de Potencia del Viento</i> .....	13
<b>Tabla 2</b> <i>Valores de Clase y Longitud de Rugosidad</i> .....	23
<b>Tabla 3</b> <i>Variable de Investigación</i> .....	30
<b>Tabla 4</b> <i>Estado Actual de los Instrumentos del Observatorio</i> .....	41
<b>Tabla 5</b> <i>Lista de los Equipos en Buen Estado</i> .....	41
<b>Tabla 6</b> <i>Velocidades del Viento Mensual del Año 2012</i> .....	49
<b>Tabla 7</b> <i>Velocidades del Viento Mensual del Año 2013</i> .....	51
<b>Tabla 8</b> <i>Velocidades del Viento Mensual del Año 2014</i> .....	52
<b>Tabla 9</b> <i>Velocidades del Viento Mensual del Año 2015</i> .....	53
<b>Tabla 10</b> <i>Velocidades del Viento Mensual del Año 2016</i> .....	54
<b>Tabla 11</b> <i>Velocidades del Viento Mensual del Año 2017</i> .....	56
<b>Tabla 12</b> <i>Velocidades del Viento Mensual del Año 2018</i> .....	57
<b>Tabla 13</b> <i>Velocidades del Viento Mensual del Año 2019</i> .....	58
<b>Tabla 14</b> <i>Velocidades del Viento Mensual del Año 2022</i> .....	59
<b>Tabla 15</b> <i>Velocidades del Viento Mensual del Año 2023</i> .....	61
<b>Tabla 16</b> <i>Velocidades Promedio Durante 2012-2023</i> .....	62
<b>Tabla 17</b> <i>Dirección del Viento para el Año 2012</i> .....	68
<b>Tabla 18</b> <i>Dirección del Viento para el Año 2013</i> .....	70
<b>Tabla 19</b> <i>Dirección del Viento para el Año 2014</i> .....	72
<b>Tabla 20</b> <i>Dirección del Viento para el Año 2015</i> .....	74
<b>Tabla 21</b> <i>Dirección del Viento para el Año 2016</i> .....	76
<b>Tabla 22</b> <i>Dirección del Viento para el Año 2017</i> .....	78
<b>Tabla 23</b> <i>Dirección del Viento para el Año 2018</i> .....	80
<b>Tabla 24</b> <i>Dirección del Viento para el Año 2019</i> .....	82

<b>Tabla 25</b> <i>Dirección del Viento para el Año 2022</i> .....	84
<b>Tabla 26</b> <i>Dirección del Viento para el Año 2023</i> .....	86
<b>Tabla 27</b> <i>Tabla de Conversión para la Rosa de Viento</i> .....	88
<b>Tabla 28</b> <i>Categorización de las Velocidades del Viento</i> .....	89
<b>Tabla 29</b> <i>Frecuencia de las Velocidades</i> .....	90
<b>Tabla 30</b> <i>Dirección del Viento Durante el Periodo 2012 - 2023</i> .....	91
<b>Tabla 31</b> <i>Parámetros de Weibull Anuales para el Periodo 2012- 2023</i> .....	93
<b>Tabla 32</b> <i>Tabla de Frecuencia de Velocidades para la Distribución de Weibull</i> .....	97
<b>Tabla 33</b> <i>Valores para la Distribución de Weibull</i> .....	100

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Capas de la Atmosfera</i> .....	7
<b>Figura 2</b> <i>Atlas Eólico del Perú a 100 metros</i> .....	9
<b>Figura 3</b> <i>Factor que Interviene en la Potencia de un Aerogenerador</i> .....	12
<b>Figura 4</b> <i>Velocidad Media Anual a 10 metros</i> .....	14
<b>Figura 5</b> <i>Densidad de Potencia Media Anual del Viento a 10 metros</i> .....	15
<b>Figura 6</b> <i>Factor de Escala de la Distribución de Weibull a 10 metros</i> .....	20
<b>Figura 7</b> <i>Factor de Forma Distribución de Weibull a 10 metros</i> .....	21
<b>Figura 8</b> <i>Rosa de Viento</i> .....	22
<b>Figura 9</b> <i>Vista Satelital del Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera de la UNSAAC</i> .....	39
<b>Figura 10</b> <i>Foto del Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera de la UNSAAC con los Equipos Instalados</i> .....	40
<b>Figura 11</b> <i>Foto de la Estación Meteorológica DAVIS VANTAGE PRO 2</i> .....	43
<b>Figura 12</b> <i>Imagen de la Estación con Todos sus Componentes</i> .....	43
<b>Figura 13</b> <i>Imagen de los Datos Almacenados en el Bloc de Notas de Davis</i> ....	47
<b>Figura 14</b> <i>Imagen del Código del Paquete R con RStudio</i> .....	48
<b>Figura 15</b> <i>Imagen de los Datos Registrados por la Estación Meteorológico Davis</i> .....	49
<b>Figura 16</b> <i>Velocidades Promedio Durante el Periodo 2012-2023</i> .....	64
<b>Figura 17</b> <i>Rosa de Vientos para el Año 2012</i> .....	69
<b>Figura 18</b> <i>Rosa de Viento para el Año 2013</i> .....	71
<b>Figura 19</b> <i>Rosa de Viento para el Año 2014</i> .....	73
<b>Figura 20</b> <i>Rosa de Viento para el Año 2015</i> .....	75
<b>Figura 21</b> <i>Rosa de Viento para el Año 2016</i> .....	77

<b>Figura 22</b> <i>Rosa de Viento para el Año 2017</i> .....	79
<b>Figura 23</b> <i>Rosa de Viento para el Año 2018</i> .....	81
<b>Figura 24</b> <i>Rosa de Viento para el Año 2019</i> .....	83
<b>Figura 25</b> <i>Rosa de Viento para el Año 2022</i> .....	85
<b>Figura 26</b> <i>Rosa de Viento para el Año 2023</i> .....	87
<b>Figura 27</b> <i>Rosa de Vientos para el Periodo 2012 - 2023</i> .....	92
<b>Figura 28</b> <i>Método Grafico de la Distribución de Weibull</i> .....	96
<b>Figura 29</b> <i>Grafica de la Frecuencia de las Velocidades de Vientos</i> .....	98
<b>Figura 30</b> <i>Frecuencia Acumulada de las Velocidades del Viento</i> .....	99
<b>Figura 31</b> <i>Ajuste de la Distribución de Weibull a la Velocidad del Viento</i> .....	101
<b>Figura 32</b> <i>Distribución de Weibull</i> .....	102

## RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar el recurso eólico en el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera – Perayoc, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), a partir de datos de velocidad y dirección del viento registrados entre los años 2012 y 2023 mediante una estación automática Davis, con mediciones cada cinco minutos. Se excluyeron los años 2020 y 2021 debido a registros incompletos ocasionados por la pandemia. Los datos fueron procesados en R, RStudio y Excel, generando 120 promedios mensuales representativos.

Se calculó la densidad del aire considerando la altitud (3365 msnm), la densidad de potencia del viento, las direcciones predominantes mediante rosas de viento y los parámetros de la distribución de Weibull. Los resultados indican una velocidad promedio general de 0,4817 m/s y una densidad de potencia de 0,0459 W/m<sup>2</sup>, valores muy inferiores al umbral mínimo de 200 W/m<sup>2</sup> establecido por el Atlas Eólico del Perú. Las direcciones predominantes fueron Oeste (W) y Sur-Sureste (SSE). El modelo de Weibull presentó parámetros  $k = 3,348$  y  $c = 0,4886$  m/s, lo que indica una distribución estable y coherente con la media general de velocidad.

Aunque el recurso eólico no cumple con los estándares para generación de energía a gran escala, su estabilidad y caracterización lo convierten en una fuente útil para fines experimentales, educativos y estudios de dinámica del viento en entornos urbanos de baja velocidad. Estos resultados aportan información relevante para investigaciones y proyectos en contextos similares.

**Palabras clave:** recurso eólico, velocidad del viento, rosa de vientos, distribución de Weibull.

## ABSTRACT

. This study aims to characterize the wind resource at the Luis Olazo Olivera – Perayoc Meteorological Observatory of the Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), based on wind speed and direction data recorded between 2012 and 2023 using a Davis automatic weather station, with measurements taken every five minutes. The years 2020 and 2021 were excluded due to incomplete records caused by the pandemic. Data were processed in R, RStudio, and Excel, producing 120 representative monthly averages.

Air density was calculated considering the site's altitude (3365 m a.s.l.), along with wind power density, predominant wind directions using wind roses, and Weibull distribution parameters. Results indicate a general average wind speed of 0.4817 m/s and a power density of 0.0459 W/m<sup>2</sup>, values well below the minimum threshold of 200 W/m<sup>2</sup> established by Peru's Wind Atlas. Predominant wind directions were West (W) and South-Southeast (SSE). The Weibull model yielded parameters  $k = 3.348$  and  $c = 0.4886$  m/s, indicating a stable distribution consistent with the general mean speed.

Although the wind resource does not meet the standards for large-scale energy generation, its stability and characterization make it a valuable source for experimental, educational purposes and for studying wind dynamics in low-speed urban environments. These results provide relevant information for research planning and project design in similar contexts.

**Keywords:** wind resource, wind speed, wind rose, Weibull distribution.

## INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento del recurso eólico como fuente de energía renovable ha cobrado relevancia ante la necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar el cambio climático. No obstante, su viabilidad depende del conocimiento preciso de sus características locales, ya que el viento presenta una alta variabilidad espacial y temporal. En regiones altoandinas como Cusco, la altitud, la topografía y el desarrollo urbano influyen directamente en la velocidad y dirección del viento.

Este estudio tiene como finalidad caracterizar el recurso eólico en el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera – Perayoc, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), utilizando los datos registrados entre 2012 y 2023. La estación automática Davis registra datos cada cinco minutos; debido al gran volumen de información, los datos fueron procesados con R, RStudio y Excel, obteniendo 120 promedios mensuales. Se excluyeron los años 2020 y 2021 por presentar registros incompletos a causa de la pandemia.

A lo largo del estudio, se calcularon variables clave como la densidad del aire en función de la altitud, la densidad de potencia del viento, la dirección predominante y la distribución de Weibull, que permitió modelar la variabilidad del recurso. Los resultados obtenidos permiten evaluar la estabilidad del viento, su limitada capacidad para generación energética y su utilidad potencial en fines académicos, experimentales y urbanos. La metodología aplicada es replicable en otros sitios con condiciones similares, contribuyendo al conocimiento local del potencial eólico.

## CAPITULO I

### ASPECTOS GENERALES

#### 1.1 Planteamiento del Problema

La creciente preocupación por el agotamiento de los combustibles fósiles ha impulsado una transición energética global orientada hacia fuentes sostenibles. En este contexto, la energía eólica se ha consolidado como una alternativa para diversificar la matriz energética, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover el desarrollo sostenible. A nivel internacional, la caracterización del recurso eólico a través del análisis de variables como la velocidad de viento, su densidad, la rosa de vientos y modelación estadística con distribuciones como la distribución de Weibull, es esencial para la planificación técnica y económica de proyectos de eólicos. (Muñiz, 2012)

En el Perú, se reconoce un importante potencial eólico, su aprovechamiento efectivo aún enfrenta limitaciones. El Atlas Eólico del Perú, elaborado por el Ministerio de Energía y Minas, presenta información relevante a nivel nacional, con una resolución espacial insuficiente para análisis locales. Además, debido a la variabilidad temporal del recurso eólico, los datos requieren constantes actualizaciones, lo que evidencia la necesidad de realizar estudios localizados que permitan una caracterización más precisa. (Perú, 2016)

A nivel institucional, la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) presenta condiciones particulares que dificultan una generalización del recurso eólico dentro del mismo campus, ya que distintas estaciones meteorológicas registran variaciones significativas debido a su entorno construido. El Observatorio

Meteorológico Luis Olazo Olivera, ubicado dentro del campus universitario a 3365 m.s.n.m., cuenta con registros históricos valiosos que no han sido plenamente aprovechados para caracterizar el recurso eólico. Las condiciones topográficas y urbanas que lo rodean influyen en la calidad de los datos, lo cual exige una evaluación específica y contextualizada (Huaman, 2023)

Por tanto, se identifica como problema general la falta de estudios específicos en este punto de medición, lo que limita el desarrollo de investigaciones aplicadas, estrategias de eficiencia energética y soluciones sostenibles dentro de la universidad. Es imprescindible realizar una caracterización detallada del recurso eólico en el observatorio, considerando su variabilidad temporal y su entorno inmediato

## **1.2 Formulación del Problema**

### **1.2.1 Problema General**

¿Cuál es la característica del recurso eólico en el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera – Perayoc, de la Universidad Nacional San Antonio Abad de Cusco (UNSAAC)?

### **1.2.2 Problema Especifico**

- ¿Cuál es la velocidad promedio mensual y anual del viento a partir de los datos registrados en el Observatorio meteorológicos durante el periodo 2012 -2023?
- ¿Cuál es la densidad del aire en función de la altitud del Observatorio?
- ¿Cuáles son las gráficas de la rosa de vientos anual utilizando los datos registrados en el Observatorio durante el periodo 2012 - 2023?
- ¿Cómo modelar la variabilidad del viento mediante la distribución de Weibull con los datos registrados durante el periodo 2012 - 2023?

### **1.3 Justificación de la Investigación**

La transición energética global ha resaltado la necesidad de aprovechar fuentes sostenibles como la energía eólica, cuya implementación requiere estudios técnicos específicos sobre el comportamiento del viento. A pesar del potencial eólico en el Perú, el Atlas Eólico del Perú presenta limitaciones para el análisis a escala local, lo que evidencia la necesidad de investigaciones más precisas.

En entornos urbanos como el campus de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), la variabilidad del viento debido a edificaciones y relieve impide generalizaciones. El Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera dispone de una base de datos extensa que no ha sido completamente utilizada para caracterizar el recurso eólico.

Este estudio permitirá aprovechar esos datos, realizar una evaluación específica del comportamiento del viento y contribuir a la planificación de soluciones sostenibles dentro de la universidad, fortaleciendo así la investigación interdisciplinaria y la gestión energética eficiente.

### **1.4 Objetivos**

#### ***1.4.1 Objetivo General***

Caracterizar el recurso eólico en el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera– Perayoc de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), utilizando los datos registrados durante el periodo 2012 - 2023.

#### ***1.4.2 Objetivo Específico***

- Determinar la velocidad promedio mensual y anual del viento registradas en el Observatorio durante el periodo 2012 – 2023
- Calcular la densidad del aire en función de la altitud del Observatorio Meteorológico durante el periodo 2012 - 2023

- Elaborar las gráficas de las rosas de vientos anuales con datos registrados en el Observatorio Meteorológico durante el periodo 2012 – 2023
- Modelar la variabilidad del viento utilizando el análisis de distribución de Weibull para vientos con datos registrados en el Observatorio Meteorológico durante el periodo 2012 – 2023

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Energías Renovables y su Importancia

##### 2.1.1 *Definición de las Energías Renovables*

Las energías renovables, también llamadas energías alternativas o blancas, son fuentes obtenidas de recursos naturales inagotables o que se generan de forma natural a una velocidad igual o superior a la de su consumo. Se caracteriza por su sostenibilidad y menor impacto con el medio ambiente en comparación con las energías convencionales.

Históricamente, las energías renovables han sido utilizadas de manera empírica, transmitiendo sus conocimientos de generación a generación. Hoy en día, se busca optimizar su permanencia, superando las dificultades que se presentan debido a la disminución de las fuentes de energías convencionales, como el petróleo, cuyo agotamiento es un desafío global.

En respuesta a la disminución de los yacimientos de petróleo, se están buscando nuevas alternativas energéticas a nivel mundial, y Perú no es ajeno a esta realidad. Desde la década 1970, se han desarrollado investigaciones en diversas instituciones del país para optimizar el uso de energías renovables.

##### 2.1.2 *Clasificación de las Energías Renovables*

Las energías renovables se clasifican en:

- **Energía Hidroeléctrica:** Producida a partir del movimiento del agua en ríos o embalses mediante turbinas.
- **Energía Geotérmica:** Obtenida del calor interno de la tierra

- **Energía del Biomasa:** Derivada de la materia orgánica (plantas, residuos agrícolas y forestales)
- **Energía Solar:** Capturada a partir del sol mediante paneles fotovoltaicos o colectores solares.
- **Energía Eólica:** Generada por el viento utilizando aerogeneradores.

### ***2.1.3 Beneficio de las Energías Renovables***

- **Ambientales:** Reducción de emisores de gases de efecto invernadero, menor contaminación del aire y el agua, y preservación de los recursos naturales.
- **Económicos:** Ahorro en costos a largo plazo, creación de empleos, fomento de la independencia energética.
- **Sociales:** Mejora la calidad de vida acceso a energía en áreas rurales, y promoción del desarrollo sostenible.

## **2.2 Energía Eólica**

### ***2.2.1 Evolución Histórica***

La energía eólica ha evolucionado desde simples molinos de vientos desde la antigüedad, usados para moler grano y bombear agua, hasta las modernas turbinas gigantes que generan electricidad. Desde el siglo XX, la crisis energética y avance tecnológicos impulsaron su desarrollo global, convirtiéndola en una fuente clave para un futuro energético sostenible.

En la actualidad, la energía eólica se ha consolidado como una de las opciones más económicas y eficientes dentro del abanico de fuentes energéticas, gracias al avance tecnológico, los aerogeneradores modernos permiten generar electricidad a costo muy competitivos muy competitivos frente a las fuentes convencionales, aprovechando el

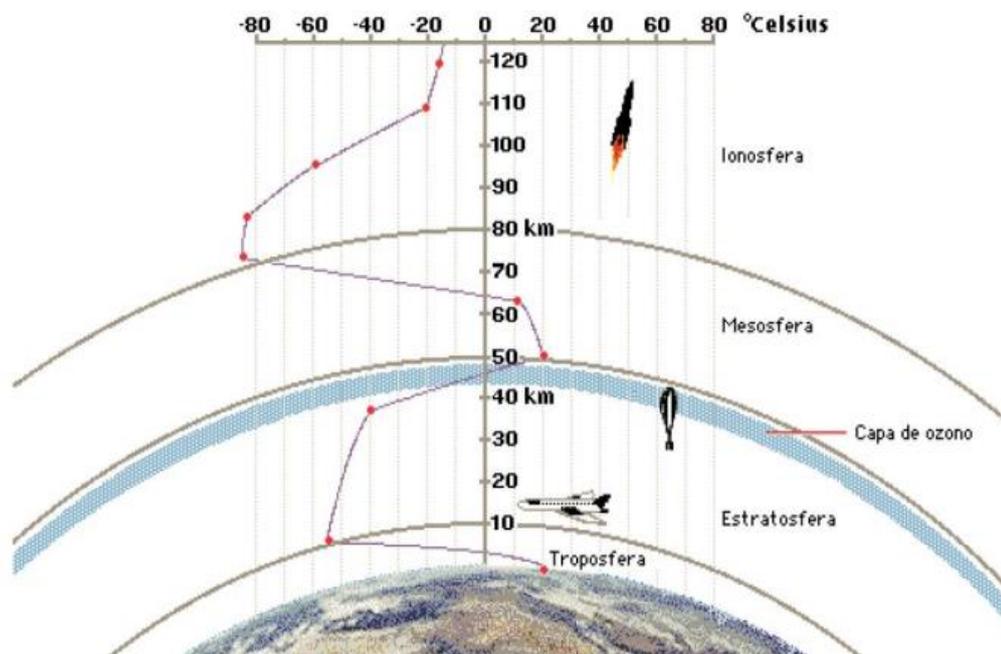
viento una fuente natural, renovable y limpia sin causar impactos negativos al medio ambiente. (Perú, 2016)

### 2.2.2 Origen del Viento

El viento tiene su origen en las dinámicas atmosféricas que ocurren principalmente en la capa más baja de la atmósfera: la troposfera. Esta capa varía en espesor, siendo de unos 8 km en los polos y alcanzando hasta 16 km en la zona ecuatorial. Desde la perspectiva de la energía eólica, el interés se centra en los vientos que se generan cerca de la superficie terrestre, específicamente en los primeros cientos de metros sobre el suelo, ya que es en esta zona donde se ubican y operan los aerogeneradores. (Perú, 2016)

**Figura 1**

*Capas de la Atmósfera*



**Fuente:** Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI

### 2.2.3 Definición del Viento

El viento se define como el desplazamiento de las masas de aire en la atmosfera.

Causadas por dos factores:

- **Las diferencias de presión:** Es la variación de presión atmosférica entre dos puntos. El aire se mueve naturalmente desde zonas de alta presión hacia zonas de baja presión
- **La fuerza de Coriolis:** Es una fuerza aparente que se debe a la rotación de la Tierra. Hace que el viento no se mueva en línea recta, sino que se desvíe:
  - **Hemisferio Norte:** a la derecha
  - **Hemisferio Sur:** a la izquierda

## 2.3 Fundamento Matemático

### 2.3.1 Energía del Viento

La energía del viento es producto de la energía solar, debido a que calienta las diferentes masas de aire de la atmosfera terrestre, lo que permite generar las diferencias de presión lo que produce las corrientes de aire

La energía cinética del viento está definida por:

$$E = \frac{1}{2} mv^2 \quad [Wh] \quad (1)$$

Donde:

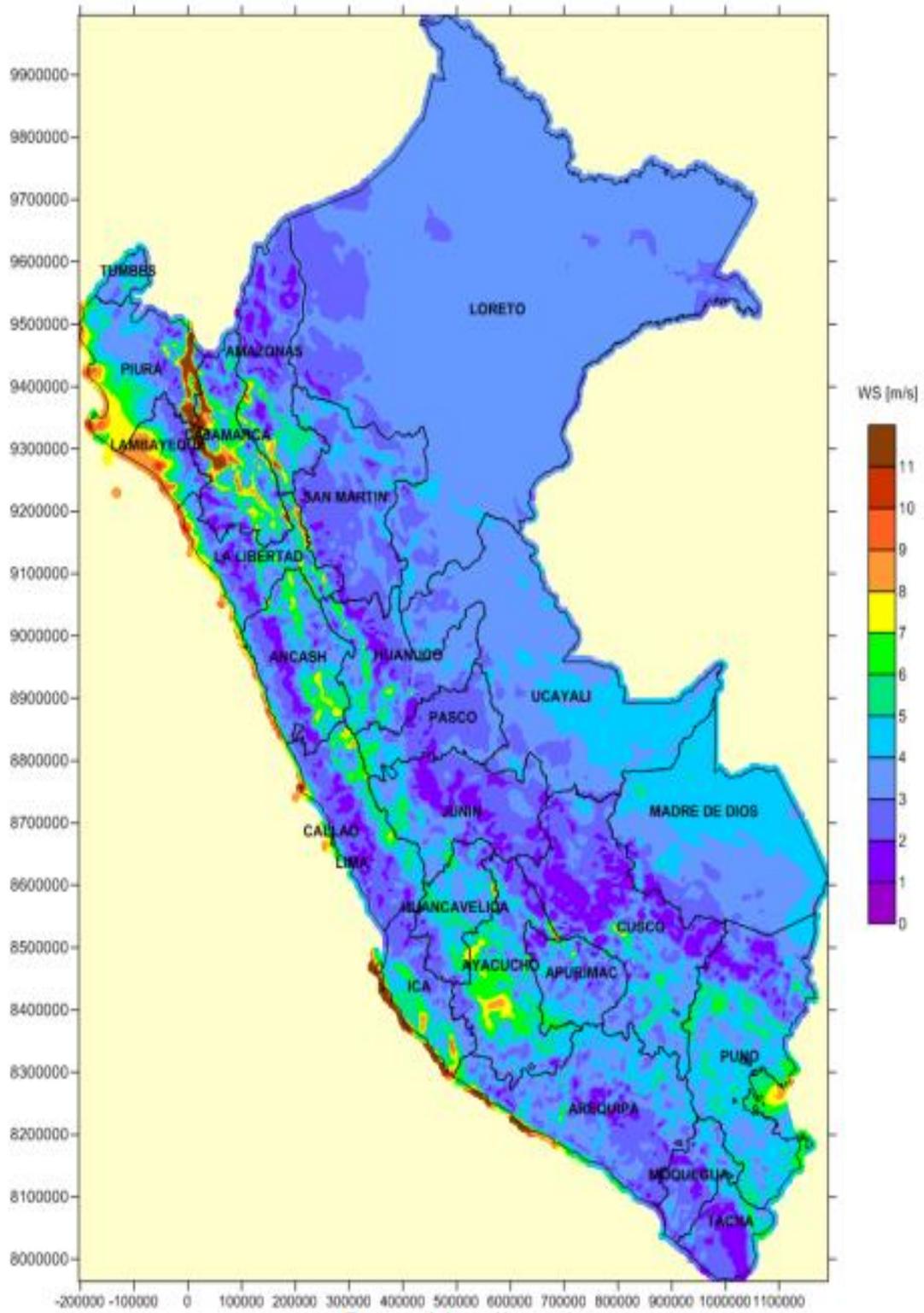
m: masa (kg)

v: velocidad del viento (m/s)

La ecuación (1) es la forma general de expresar la energía cinética. Donde m corresponde a la masa de aire y v es la velocidad del aire

**Figura 2**

*Atlas Eólico del Perú a 100 metros*



*Fuente:* Atlas Eólico del Perú pág. 79 (Perú, 2016)

### 2.3.2 Densidad del Viento

Según (Méndez, 2012) dice: Como hemos visto anteriormente en la ecuación (1), la energía cinética del viento, considerado como un volumen del aire que se desplaza, y en general de cualquier cuerpo que se mueve con una velocidad dada, depende de su masa:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2)$$

Se tiene de la ecuación (2), la energía del viento dependerá de la densidad ( $\rho$ ) masa por unidad de volumen del aire:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3)$$

Consecuentemente, cuanto mayor sea la densidad del aire, es decir cuanta más masa tenga un determinado volumen, mayor cantidad de energía del viento se podrá aprovecharse.

La densidad del aire no es un parámetro sobre el que podamos actuar directamente, ya que depende de condiciones meteorológicas, disminuye con el aumento de la altitud es decir aumentando con la presión podemos aproximar a la siguiente expresión, donde R es la constante universal de los gases ideales:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (4)$$

Tenemos modelo barométrico, para la atmósfera isotérmica con el valor de la temperatura constante, la presión disminuye exponencial con la altitud:

$$p(h) = \rho_0 \cdot e^{\frac{-gh}{RT}} \quad (5)$$

Sustituimos las ecuaciones (4) y (5) tenemos

$$p(h) = \frac{p(h)}{RT} = \frac{\rho_0 \cdot e^{\frac{-gh}{RT}}}{RT} = \left(\frac{\rho_0}{RT}\right) \cdot e^{\frac{-gh}{RT}}$$

Sabemos que  $\rho_0 = \frac{\rho_0}{RT}$  tenemos

$$p(h) = \rho_0 \cdot e^{\frac{-gh}{RT}} \quad (6)$$

Reemplazamos los valores en la ecuación (6):

$g$ : 9,81 m/s<sup>2</sup>(gravedad)

$R$ : 287 J/kg. °k (constante de gases ideal del aire seco)

$T$ : 288.15°k (temperatura)

$\rho_0$ : 1,225 kg/m<sup>3</sup>(densidad de aire al nivel del mar)

$$\frac{g}{RT} = \frac{9,81}{287 \cdot 288,15}$$

$$\frac{g}{RT} = \frac{9,81}{82694,05} = 0,0001186$$

Reemplazamos el valor obtenido en la ecuación (6)

$$\rho(h) = \rho_0 e^{-0.0001186 h} \quad (7)$$

Donde:

$\rho(h)$ : densidad atmosférica a una altitud  $h$  sobre el nivel del mar (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_0$ : densidad atmosférica a nivel del mar (kg/m<sup>3</sup>)

$h$ : altitud respecto al nivel del mar (m)

### 2.3.3 Potencia del Viento

La potencia ( $P$ ) desarrollada por el viento depende de la rapidez de cambio de la energía cinética con respecto al tiempo:

$$P = E_c \cdot t \quad (8)$$

La energía cinética:  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$

La masa se puede expresar:  $m = V\rho$

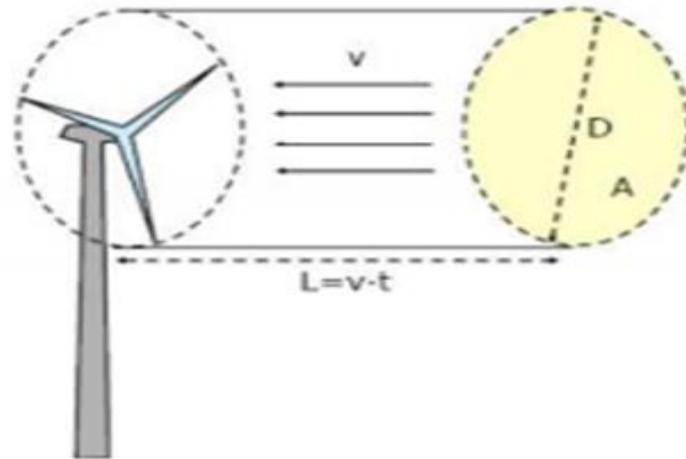
Reemplazando en la ecuación (8), se tiene:

$$P = \frac{1}{2}V\rho v^2 \cdot t \quad (9)$$

Podemos expresar también en función a la cantidad de aire que llega al rotor de un aerogenerador en un determinado tiempo  $t$  dependerá del área de barrido del rotor en función al área  $A$  y a velocidad del viento  $v$  como se muestra en la figura 3

### Figura 3

*Factor que Interviene en la Potencia de un Aerogenerador*



**Fuente:** Google (s.f.).

Según propuesto por (Méndez, 2012), el volumen de aire que índice sobre el rotor esta dado por:

$$V = Avt \quad (10)$$

Reemplazando la ecuación 10 en la ecuación 9 se tiene la potencia del viento esta dado por:

$$P = \frac{1}{2} \rho Av^3 \quad [W] \quad (11)$$

Donde:

$\rho$ : densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ )

$A$ : área barrida ( $\text{m}^2$ )

$v$ : velocidad del viento ( $\text{m/s}$ )

$t$ : tiempo (s)

Se puede observar que tanto la ecuación de la energía cinética como la de la potencia dependen del cubo de la velocidad del viento. Esto implica que pequeñas variaciones en la velocidad generan grandes cambios en la potencia producida por el aerogenerador. Esta característica constituye un factor crítico en los proyectos de energía eólica.

### 2.3.4 Densidad de Potencia del Viento:

Según el Atlas Eólico del Perú, (Perú, 2016) dice: La densidad de potencia del viento se define como la potencia eólica aprovechable por unidad de área según la siguiente ecuación:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (12)$$

Donde

P: potencia (W)

A: área(m<sup>2</sup>)

$\rho$ : densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)

v: velocidad media (m/s)

**Tabla 1**

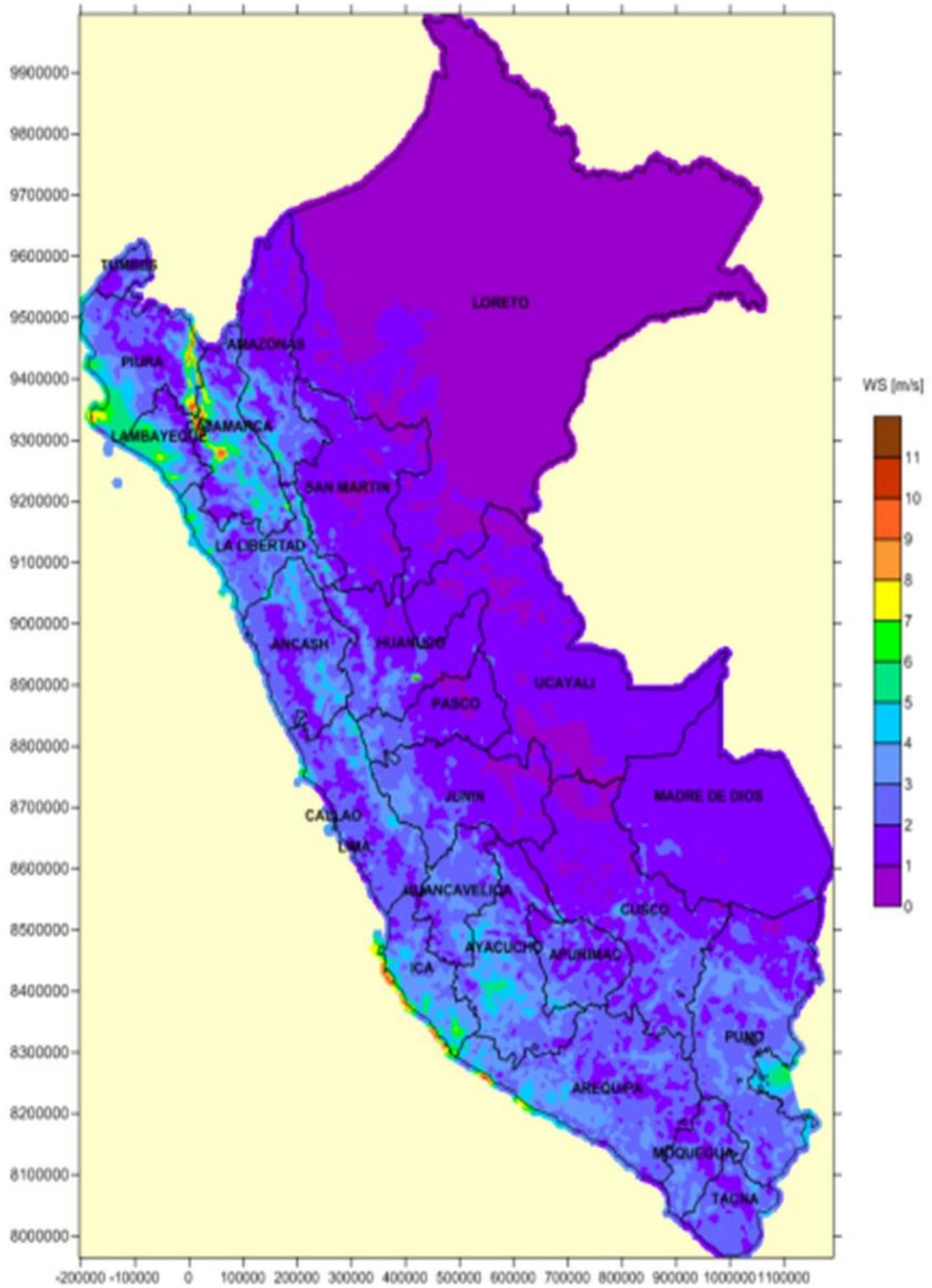
*Clasificación de la Densidad de Potencia del Viento*

Clase de potencia del viento	Clasificación del potencial del recurso	Densidad de potencia del viento
1	Pobre	0 - 200
2	Escaso	200 - 300
3	Moderado	300 - 400
4	Bueno	400 - 500
5	Excelente 1	500 - 600
6	Excelente 2	600 - 800
7	Excelente 3	> 800

**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas pag.68 (Perú, 2016)

**Figura 4**

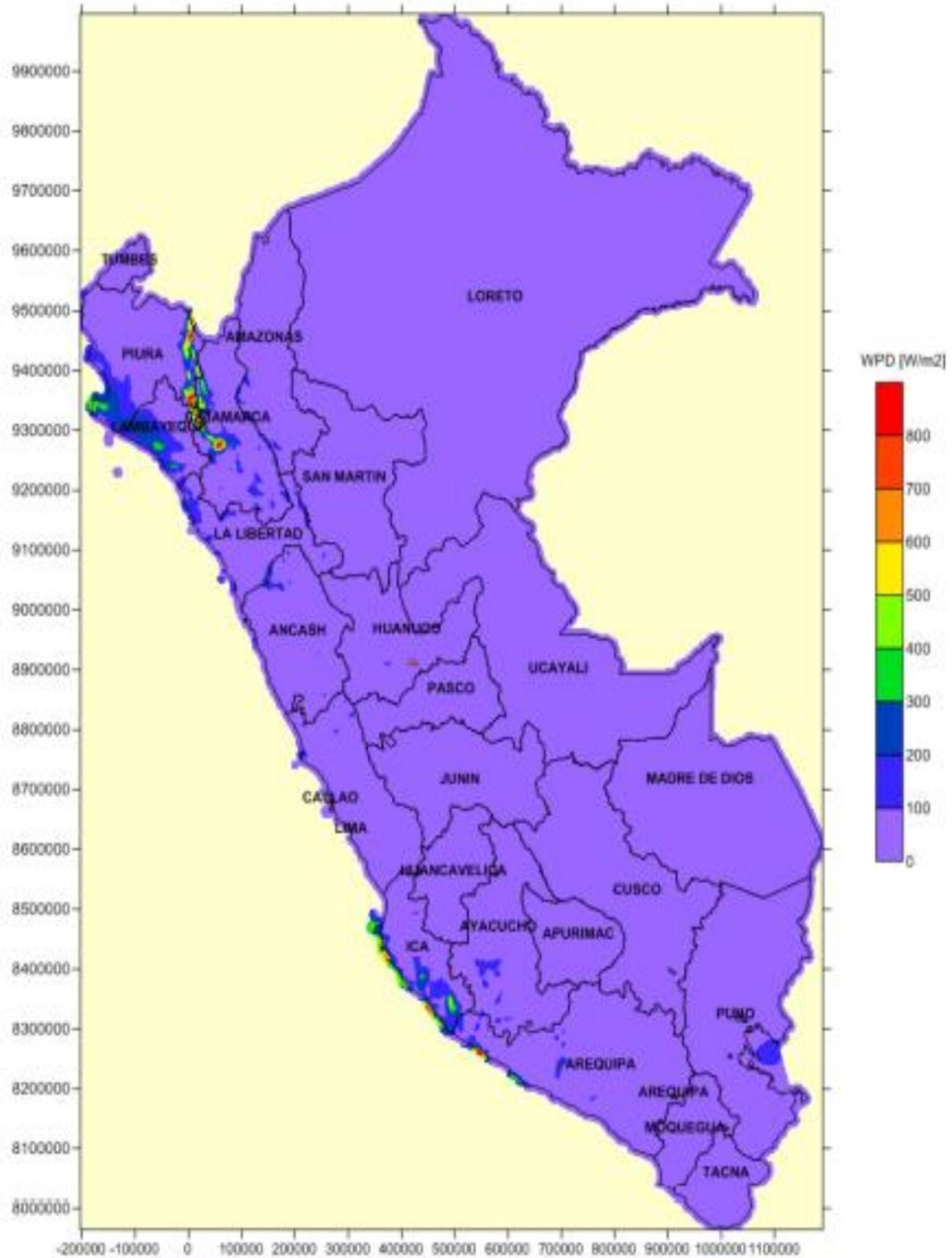
*Velocidad Media Anual a 10 metros*



Fuente: Atlas Eólico del Perú pág.128 (Perú, 2016)

**Figura 5**

*Densidad de Potencia Media Anual del Viento a 10 metros*



*Fuente:* Atlas Eólico del Perú pág. 133 (Perú, 2016)

### 2.3.5 Variación de la Velocidad del Viento con la Altura

La velocidad del viento varía con la altura con respecto al suelo, con ello la energía disponible para ser utilizado, para lo cual es importante tener una ecuación que permita calcular la velocidad del viento a una determinada altura, donde utilizaremos la ecuación más común esta dado por:

$$v = v_o \left( \frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad (13)$$

Donde:

$h_o$ : es la altura referencial conocida es del anemómetro

$h$ : es la altura donde se desee conocer la velocidad  $v$  y  $v_o$

$\alpha$ : es la variación de coeficiente o rugosidad del terreno

### 2.3.6 Distribución del Weibull

#### Introducción

La distribución de Weibull es una de las funciones estadísticas más utilizadas para modelar fenómenos aleatorios en ingeniería, ciencias ambientales, meteorología y confiabilidad. Su aplicación en el estudio de la velocidad del viento ha sido ampliamente validada, debido a su capacidad para ajustarse a datos reales mediante el uso de parámetros que definen la forma y dispersión del fenómeno. A continuación, se desarrolla su origen histórico, sus fundamentos matemáticos, propiedades, ventajas y su importancia específica en el estudio del recurso eólico.

#### Origen e Historia de la Distribución de Weibull:

El artículo titulado "*A statistical distribution function of wide applicability*" de Waloddi Weibull, publicado en 1951 en el Journal of Applied Mechanics, presenta una propuesta innovadora para el uso de funciones de distribución estadística en una amplia variedad de problemas en ciencia e ingeniería. Weibull argumenta que, en muchas ocasiones las distribuciones de probabilidad complejas son utilizadas para modelar

fenómenos naturales o tecnológicos, sin embargo, lo más práctico y efectivo es adoptar funciones de distribución simples que puedan ajustarse razonablemente a los datos observados.

El autor enfatiza que, no es realísticamente buscar una "distribución correcta" en un sentido absoluto, sino encontrar una función que sirva como una buena aproximación para describir el comportamiento de los datos. Para ello, propone el uso de funciones de distribución que cumplen con condiciones básicas de positividad, monotonía decreciente y que se anulan en ciertos límites, siendo la más sencilla una forma exponencial de la función de distribución acumulada:

$$F(x) = 1 - e^{-(x - x_0)^{m/\lambda}} \quad (14)$$

Donde:  $x_0$ ,  $m$ , y  $\lambda$  son parámetros que se ajustan a los datos, y  $x_0$  representa un umbral inferior del fenómeno observado.

Weibull destaca que esta forma, aunque carece de una base teórica estricta en muchas aplicaciones, ha mostrado ser de gran utilidad práctica para ajustar datos, especialmente cuando no existe una teoría física específica que guíe la elección de la distribución.

El autor presenta múltiples ejemplos extraídos de campos diversos para ilustrar la aplicabilidad de su método, incluyendo datos sobre la resistencia a la tracción de materiales metálicos, la duración de componentes eléctricos, el tamaño de partículas en materiales particulados, y la longitud de ciertos organismos biológicos. Dentro de estos ejemplos, destaca la modelación de distribuciones complejas, donde una única distribución simple no es suficiente y, en consecuencia, se requiere dividir los datos en componentes que sumados puedan representar mejor la realidad.

Una idea central del trabajo es que, aunque una distribución puede parecer simple, la presencia de fenómenos verdaderamente complejos, o la existencia de diferentes

mecanismos subyacentes, puede hacer necesario recurrir a distribuciones compuestas. Weibull también advierte que la división en componentes no siempre tiene una base física, pero que puede ser metodológicamente útil y, en algunos casos, reflejar causas reales no evidentes inicialmente.

El artículo también discute la forma de verificar la calidad del ajuste mediante el método del chi-cuadrado, y señala que a veces, a pesar de múltiples parámetros, la función de distribución puede no ajustarse perfectamente a los datos, lo cual también es una indicación de que la modelización requiere una interpretación cuidadosa.

Finalmente, Weibull concluye que en diversas aplicaciones el uso de sus funciones de distribución puede ser una estrategia práctica efectiva, aun sin una fundamentación teórica completa. La esencia de su trabajo es mostrar que, en muchos problemas reales, lo más importante es seleccionar una función simple, que sirva bien en la práctica, en lugar de buscar una distribución teórica perfecta que quizás no sea alcanzable o necesaria. (Weibull, 1951)

### **Fundamento Matemático de la Distribución de Weibull:**

La distribución de Weibull fue propuesta por Waloddi Weibull en 1951 como un modelo de probabilidad para describir el tiempo de fallo de materiales. Sin embargo, con el tiempo se descubrió que también es capaz de modelar fenómenos naturales aleatorios, como la velocidad del viento, gracias a su versatilidad para ajustarse a datos empíricos.

Desde el punto de vista matemático, la distribución de Weibull pertenece a la familia de distribuciones continuas y se utiliza cuando el fenómeno presenta una variabilidad asimétrica. En el caso del viento, este fenómeno no sigue una distribución normal, ya que tiene un límite inferior (no puede haber viento negativo) y una cola hacia velocidades altas. La Weibull se adapta perfectamente.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad k > 0, v > 0, c > 0 \quad (15)$$

Donde:

$c$ : es el parámetro de escala (m/s)

$k$ : es el factor de forma (adimensional)

$v$ : velocidad del viento

$f(v)$ : densidad de probabilidad

Para determinar los valores de los parámetros  $c$  y  $k$ , utilizaremos la estadística estimaremos las ecuaciones de la desviación estándar y la media aritmética para las velocidades y el factor de forma viene dado por:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (16)$$

Donde:

$\sigma$ : Desviación estándar

$\bar{v}$ : Velocidad promedio

De la desviación estándar podemos determinar la varianza ( $\sigma^2$ ) se define como:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \quad (17)$$

Para determinar el parámetro  $c$  se tiene la ecuación:

$$c = \frac{\bar{v}}{\gamma(1+\frac{1}{k})} \quad (18)$$

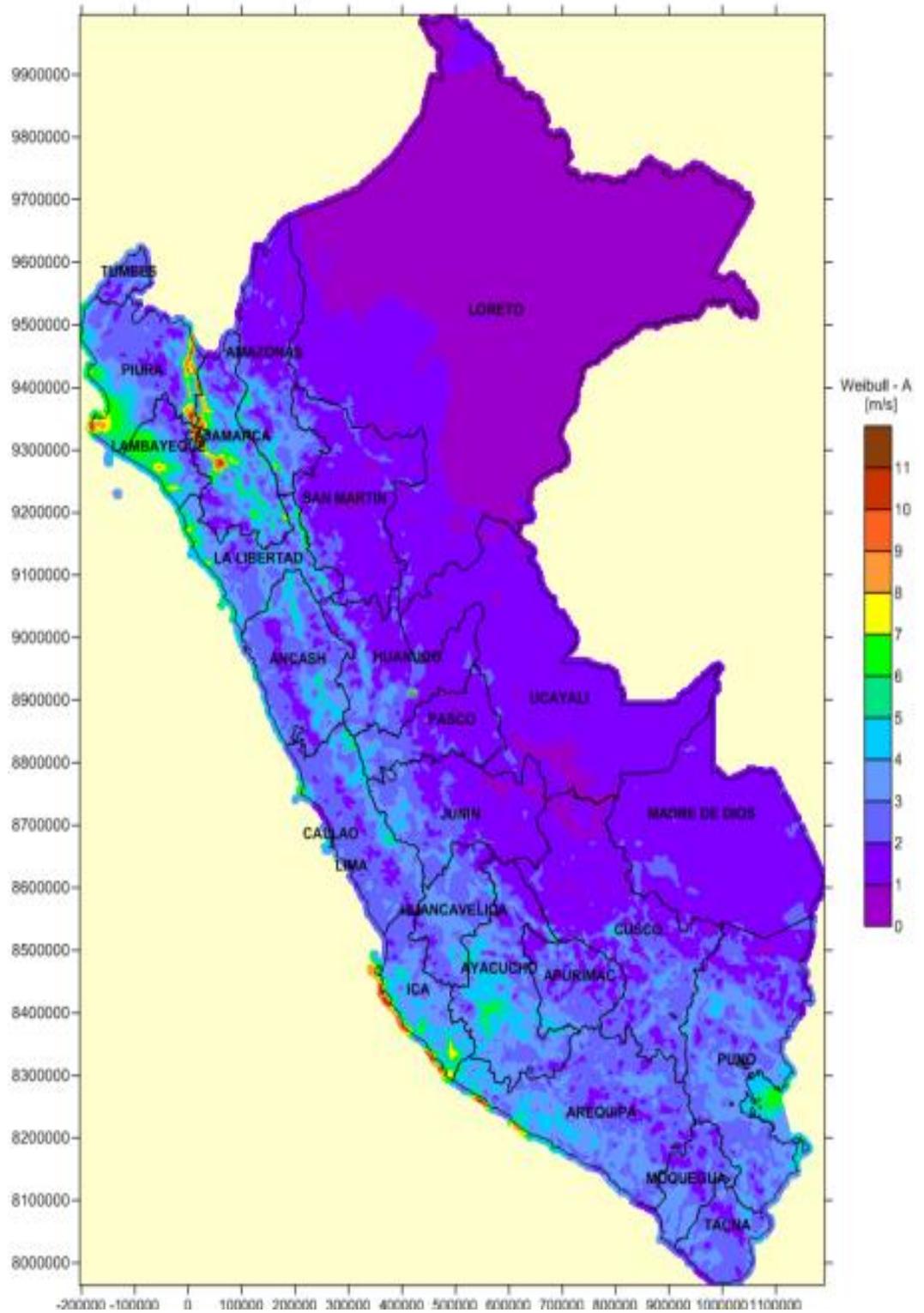
Donde:

$\gamma$ : es la función de gamma

$\bar{v}$ : es la velocidad promedio

**Figura 6**

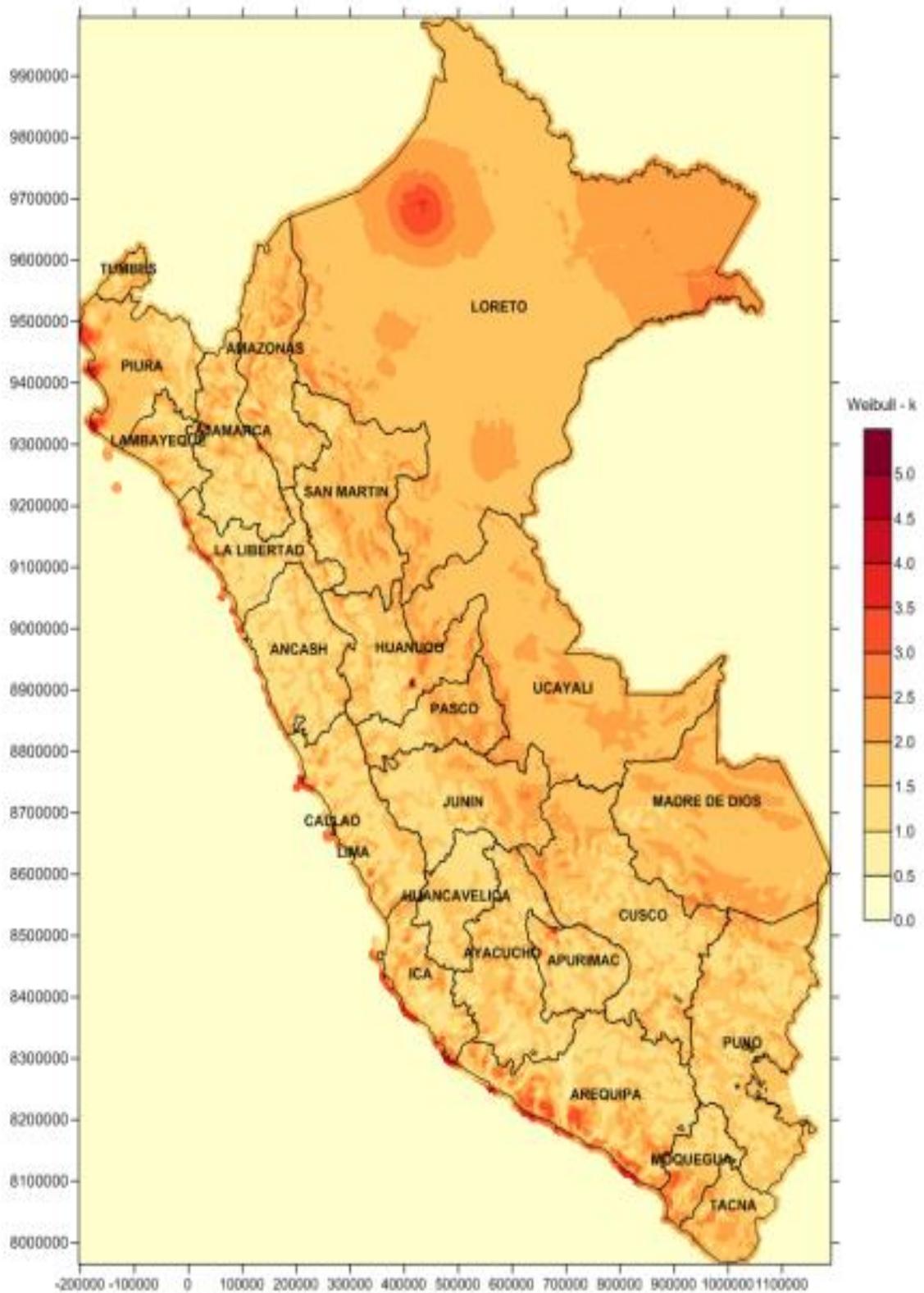
*Factor de Escala de la Distribución de Weibull a 10 metros*



**Fuente:** Altas Eólico del Perú pág. 117 (Perú, 2016)

**Figura 7**

*Factor de Forma Distribución de Weibull a 10 metros*



**Fuente:** *Atlas Eólico del Perú* pág. 118 (Perú, 2016)

### 2.3.7 Rosa de Viento

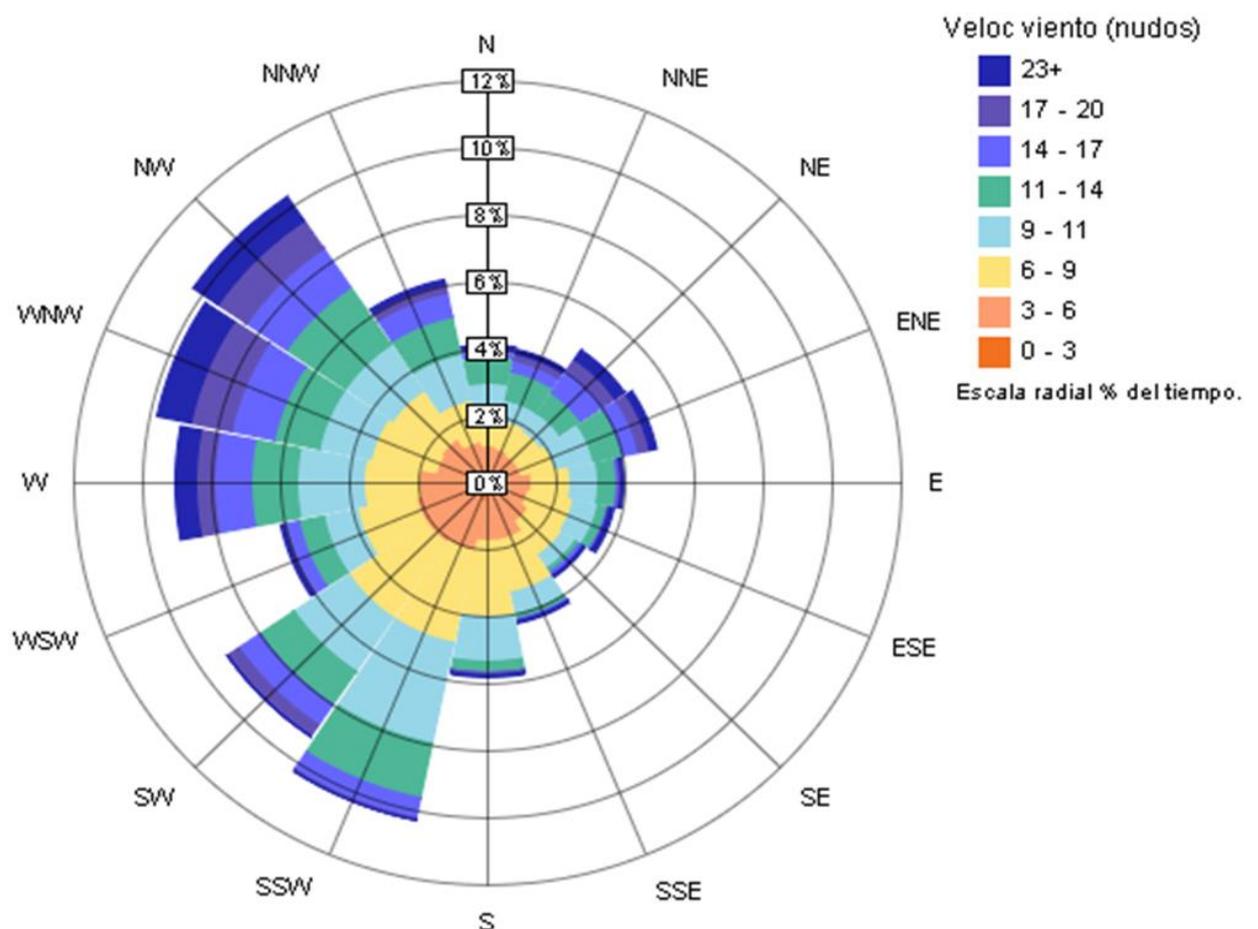
Es una representación gráfica de 16 puntos cardinales, Norte, Sur, Este, Oeste, puntos colaterales como Noreste, Noroeste, Suroeste y los sub cardinales que se encuentran equidistantes de los señalados.

Según (Muñiz, 2012) dice: Uno de los fines principales es obtener la distribución dirección y frecuencia del viento y en consecuencia del recurso eólico aprovechable es decir la energía del viento en un emplazamiento determinado.

El diagrama más usado es la rosa de vientos que están dividido entre 12 o 16 sectores como se ve en la figura siguiente:

**Figura 8**

*Rosa de Viento*



**Fuente** <https://help.autodesk.com/view/RVT/2015/ESP>

### 2.3.8 Rugosidad

Cuanto mayor sea la rugosidad del terreno mayor será el freno que sufra el viento.

Existe una escala de rugosidad para cada tipo de paisaje que se asigna un valor de la longitud de rugosidad se ve en la siguiente tabla:

**Tabla 2**

*Valores de Clase y Longitud de Rugosidad*

Caracterización de la zona	Clases de rugosidad	Longitud de rugosidad(m)
Gran lámina de agua	0.0	0.0002
Terreno abierto y liso. Grandes asfaltos y praderas segadas	0.5	0.0024
Colinas redondeadas y zonas de uso agrícola sin separaciones de fincas y con edificaciones dispersas.	1.0	0.0300
Zonas de uso agrícola con edificaciones y cierres de 8 metros de altura separados 1.250 m	1.5	0.0550
Zonas de uso agrícola con edificaciones y cierres de 8 metros de altura separados 500 m	2.0	0.1000
Zonas de uso agrícola con edificaciones, arbustos y plantas o cierres de 8 metros de altura de separados 250 m	2.5	0.2000
Pueblos, ciudades pequeñas, zonas de uso agrícolas con edificaciones y cierres altos, bosques y terreno accidentado y muy desiguales	3.0	0.4000
Grandes ciudades	3.5	0.8000
Grandes metrópolis con rascacielos	4.0	1.6000

**Fuente:** Clase y Longitud de Rugosidad de acuerdo al atlas eólico europeo (pág. 78) (Muñiz, 2012)

### 2.3.9 Viabilidad del Recurso Eólico

Se refiere a la evaluación de las condiciones y características del viento en una determina ubicación si es adecuado el lugar para la generación de energía eólica. Para lo cual se deben evaluar algunos factores como son:

- Velocidad del viento

- Frecuencia
- Distribución del viento
- Variabilidad del viento
- Rugosidad del terreno
- Acceso
- Costo de infraestructura
- El impacto ambiental y social

## **2.4 Antecedentes Empíricos de la Investigación**

La caracterización del recurso eólico ha sido objeto de estudio en diversas partes del mundo debido a la creciente necesidad de diversificar las fuentes de energía y promover opciones más sostenibles. A nivel global, se han desarrollado estudios que destacan la importancia de analizar parámetros como la velocidad, densidad y dirección del viento, así como de aplicar modelos como la distribución de Weibull para estimar la potencia disponible. En el caso de Perú, la diversidad geográfica del territorio ofrece un gran potencial para desarrollar proyectos de energía eólica; sin embargo, enfrentan desafíos relacionados con la disponibilidad y precisión de datos en diversas regiones.

En este contexto, es fundamental realizar una revisión de investigaciones previas que aborden la caracterización del recurso eólico, tanto a nivel internacional, nacional y local, que sustente la investigación.

### **2.4.1 Antecedentes Internacionales**

Según (Rubio, 2024), en su trabajo de tesis de pregrado titulado “*Estudio de caso: Energía eólica para generación de energía eléctrica a nivel urbano*” cuyo objetivo fue demostrar la viabilidad de uso del recurso eólico para producción de energía en contextos urbanos. Para ello, empleo una metodología de tipo explicativa y descriptiva, con un enfoque transversal. Como resultado, se concluyó que la ciudad de Guayaquil cuenta con

un recurso eólico adecuado, con una velocidad promedio de 4,73 m/s, lo que permite afirmar que es viable aprovechar el recurso eólico en dicha zona. El problema de investigación abordado fue el uso del recurso eólico en un entorno urbano. Su aporte es relevante para la presente investigación, ya que se analizó datos meteorológicos del Observatorio de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, el cual se encuentra en un contexto urbano, rodeado por edificaciones de distintas facultades.

Según (Malaver, 2023), en su tesis de pregrado titulada " *Simulación del rendimiento de una turbina eólica vertical helicoidal Darrieus en ambientes urbanos*", el objetivo fue seleccionar la geometría óptima de la turbina considerando parámetros como la velocidad del viento. Mediante simulaciones en el programa ANSYS, se obtuvo una velocidad constante de 3,5 m/s, lo que permitió evaluar el desempeño de las turbinas eólicas para el suministro de energía en zonas urbanas. Se concluyó que dicha geometría no es adecuada para implementar a entornos urbanos debido a las bajas velocidades del viento en el lugar de estudio, y se recomienda realizar investigaciones adicionales. El aporte de este estudio es significativo, ya que pone en evidencia la necesidad de analizar la velocidad del viento en distintos contextos para identificar zonas con potencial eólico y sus posibles aplicaciones.

Según (Mori, 2018), en su trabajo de maestría titulado " *Proyecto de viabilidad de climatización y electrificación en viviendas de comunidades rurales en Zonas Alto Andinas (Puno – Perú)*" tuvo como objetivo determinar el recurso renovable más adecuado para electrificar viviendas en zonas rurales. Se caracterizó el potencial energético del recurso eólico para seleccionar la opción más viable. Utilizó una metodología de evaluación del recurso eólico para el dimensionamiento del sistema e instalación de electrificación en viviendas ubicadas a más de 3800 msnm. El estudio, realizado en comunidades rurales de la provincia de Huancané, arrojó velocidades medias

anuales de 3 a 4 m/s a una altura de 80 metros y de 1,8 m/s a una altura de 10 metros. Estos resultados evidencian que la energía eólica presenta limitaciones como fuente de generación eléctrica en la zona. Se concluye, que, para el diseño eficiente de viviendas se deben considerar factores como la geometría del clima, la velocidad del viento, la ventilación cruzada y el uso de invernaderos adyacentes.

El problema identificado fue la falta de electrificación en áreas rurales, en contraste con una cobertura del 98,7 % en zonas urbanas. Este estudio aporta a la presente investigación al centrarse en una zona altoandina del sur del Perú, a una altitud similar (3365 msnm), considerando posibles aplicaciones prácticas del estudio del recurso eólico.

#### **2.4.2 Antecedentes Nacionales**

Según (Yancachajlla & Vilca, 2022), en su artículo titulado “*Caracterización del viento con la función de Weibull para una zona altoandina, Laraqueri - Perú*”, se destaca la importancia de la disponibilidad del recurso eólico, en particular del viento. Para ello, se realizó una evaluación del potencial eólico utilizando datos del SENAMHI durante un periodo de un año. La metodología empleada fue la distribución de Weibull, obteniéndose como resultado una velocidad promedio de 3,5 m/s. por lo que se concluye que se pueden utilizar aerogeneradores de baja potencia, los cuales funcionarían de forma limitada debido a las variaciones de velocidad del viento a lo largo del año. El aporte más relevante del estudio es la identificación de la dinámica del viento, que varía anualmente, por lo que se recomienda una evaluación permanente para determinar el verdadero potencial eólico de un lugar determinado.

Según (Quiñonez, 2019), en su artículo titulado “*Caracterización del recurso eólico en la ciudad de Juliaca*”, el objetivo fue caracterizar el potencial explotable del recurso eólico en el entorno de la ciudad de Juliaca, región Puno. Para ello, se utilizaron datos proporcionados por el SENAMHI y la NASA durante el periodo 2013–2014. Se

analizó cuantitativamente la velocidad media horaria y mensual del viento a una altura de 10 metros, obteniéndose una velocidad promedio de 3 m/s y una velocidad máxima de 6,56 m/s, con dirección predominante hacia el oeste. Se compararon los datos de ambas fuentes, obteniendo resultados similares: el SENAMHI reportó entre 2 y 3 m/s, y la NASA, 3,09 m/s. Esta última fue considerada más confiable. El aporte significativo de este estudio radica en la existencia de diversas fuentes de información confiables para el análisis del recurso eólico.

### **2.4.3 Antecedentes Locales**

Según (Huaman, 2023), en su trabajo de tesis de maestría titulado *“Análisis de tendencias de las variables meteorológicas: precipitación, velocidad del viento y temperatura utilizando la distribución de Weibull en la ciudad de Cusco, durante el periodo 2001-2021”* cuyo objetivo específico fue describir el comportamiento de la velocidad del viento a partir de los datos registrados por el Observatorio Meteorológico de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC). La metodología utilizada fue de tipo longitudinal no experimental, con un diseño descriptivo. Se obtuvieron velocidades máximas de 1,99 m/s y mínimas de 0,03 m/s. El problema planteado fue comprender el comportamiento de las variables meteorológicas, en especial del viento. El aporte de esta investigación es significativo, ya que se desarrolló directamente en la UNSAAC.

Según (Franco, 2022), en su trabajo de tesis de pre grado titulado *“Diseño e implementación del sistema de adquisición de datos de un aerogenerador con carga para el estudio de potencial eólico en la UNSAAC-Cusco”*, el objetivo fue determinar el potencial eólico en la UNSAAC. Se obtuvo una velocidad promedio de 0,7957 m/s y un potencial de 1,7057 W/m<sup>2</sup>. Se concluyó que la implementación de energía eólica en la UNSAAC es poco viable, ya que se requiere una velocidad mínima de 4 m/s para

generadores de pequeña escala. Esta investigación aporta significativamente, ya que se desarrolló en la propia universidad, y sus resultados pueden orientar la toma de decisiones.

## **CAPITULO III**

### **HIPÓTESIS Y VARIABLES**

#### **3.1 Hipótesis**

##### **3.1.1 Hipótesis General**

El recurso eólico en el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera – Perayoc de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), presenta características favorables para su aprovechamiento sostenible.

##### **3.1.2 Hipótesis Específicos**

- La velocidad promedio del viento, tanto mensuales como anuales, presentan variaciones significativas a lo largo del tiempo.
- La densidad del aire, disminuye significativamente con la altitud del observatorio, e influye directamente en el potencial energético del viento.
- La rosa de vientos anual identifica claramente direcciones predominantes del viento que pueden ser aprovechadas estratégicamente para la instalación de turbinas.
- La distribución de Weibull permite modelar eficientemente la variabilidad del viento en la zona, facilitando una caracterización estadística precisa del recurso eólico.

### 3.1.3 Identificación de Variables

**Tabla 3**

*Variable de Investigación*

Variables	Dimensiones
<ul style="list-style-type: none"><li>• Velocidad del viento (m/s)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Valor medio mensual, anual y rangos</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Dirección del viento (grados sexagesimales)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• mínimos y máximos</li><li>• Rosa de viento</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Variación con la altitud</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Parámetros de Weibull</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Parámetro de forma(k), parámetro de escala (c) y coeficiente de ajuste R<sup>2</sup></li></ul>

**Nota:** Elaboración propia

La operacionalización de variables se encuentra en el anexo

## CAPITULO IV

### METODOLOGÍA

#### 4.1 Enfoque Metodológico

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo y descriptivo, orientado al análisis objetivo y sistemático de datos meteorológicos registrados durante un periodo de once años. La naturaleza no experimental del estudio implica que no se manipulan variables, sino que se observan y analizan tal como fueron registradas. El objetivo principal es caracterizar el recurso eólico en el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera de Perayoc de la Universidad Nacional San Antonio abad del Cusco, sin establecer relaciones causales entre variables.

Se adopta un diseño longitudinal, dado que se analiza la evolución de los parámetros del viento a lo largo del periodo comprendido entre 2012 y 2023. Este enfoque permite identificar patrones característicos anual, mensual del viento.

##### *4.1.1 Tipo y Nivel de Investigación*

- **Tipo de investigación:** Cuantitativa
- **Nivel:** Descriptivo, orientado a la caracterización del recurso eólico
- **Diseño:** Longitudinal – No experimental.

La investigación busca caracterizar la información existente sobre la velocidad, dirección, mediante herramientas estadística.

##### *4.1.2 Recolección de Datos*

Los datos empleados en la investigación fueron obtenidos directamente del Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera, ubicado en el campus de la Universidad

Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), específicamente en la zona de Perayoc, a 3365 msnm.

- Velocidad del viento (m/s)
- Dirección del viento (grados sexagesimales (°))

La fuente principal de datos fue la estación Davis Vantage Pro2, instalada a una altura de 2 metros sobre el nivel del suelo

#### **4.1.3 Población y Muestra**

- **Población:** Conjunto de datos meteorológicos registrados por el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco durante el periodo 2012 - 2023.
- **Muestra:** Sub conjunto de los datos específicos de velocidad y dirección del viento, extraído de manera continua para cada año del periodo de estudio. Se utiliza el total de registros validos disponibles.

#### **4.1.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

- **Instrumento principal:** Estación meteorológica automática Davis Vantage Pro2 instalada en el observatorio.
- **Técnicas de recolección:** Descarga de archivos de datos digitales (en formatos compatibles con Excel y software de análisis)
- **Instrumento de procesamiento:** Microsoft Excel, complementado con funciones estadísticas para la elaboración de tablas, gráficos, y análisis cuantitativo.
- **Frecuencia de registro:** Cada 5 minutos
- **VARIABLES MEDIDAS:**
  - ❖ Velocidad del Viento (m/s)
  - ❖ Dirección del viento (grados)

#### 4.1.5 *Procedimientos Metodológicos*

- **Revisión bibliográfica:** Se realizó una investigación documental sobre conceptos clave del recurso eólico, variables físicas del viento y métodos de análisis estadístico utilizados en meteorología
- **Selección de variables:** se eligieron las siguientes variables:
  - ❖ Velocidad del viento (variable principal)
  - ❖ Dirección del viento (para la rosa de vientos)
  - ❖ Fecha y hora de registro
- **Depuración y organización de datos:**

Se filtraron registros incompletos o erróneos. Se organizó la base de datos por año, mes, día y hora.
- **Análisis estadístico:** Se aplicaron las siguientes medidas:
  - ❖ Promedios mensuales y anuales.
  - ❖ Desviación estándar
  - ❖ Frecuencia de ocurrencia de rango de velocidad
  - ❖ Modelado mediante la distribución de Weibull
- **Construcción de la Rosa de Vientos:** Se elaboraron gráficos que representan la dirección predominante y la frecuencia de velocidades del viento en diferentes sectores, utilizando tablas dinámicas y gráficos de Excel, con el complemento con R y Rstudio
- **Modelamiento con la distribución de Weibull:**

Se ajustaron curvas para obtener los parámetros de forma (k) y escala (c) mediante el método de momentos y regresión lineal en Excel.

- **Cálculo de la densidad del aire:**

Se empleó la ecuación de estado de los gases ideales ajustada a la altitud del lugar.

- **Interpretación de resultados:**

Se analizaron las velocidades del viento a escala anual, mensual, la densidad y las direcciones predominantes del viento y la distribución de Weibull, permitiendo identificar el potencial eólico dentro del Observatorio.

#### ***4.1.6 Procesamiento de Datos***

El procesamiento de datos se realizó en Microsoft Excel, aplicando funciones estadísticas para calcular promedios, máximos, mínimos y desviaciones estándar. Se utilizaron tablas dinámicas y gráficos para clasificar los datos por meses y años, e interpretar las características del viento.

Se modeló la distribución de Weibull se modeló mediante el método de los momentos, estimando los parámetros de forma (k) y escala (c) a partir del promedio y la variabilidad del viento. También se calculó la densidad del aire considerando la altitud, y se estimó la potencia del viento, aun cuando las velocidades fueron bajas, como parte de la caracterización integral del recurso eólico.

Finalmente, se generaron rosas de viento en RStudio, lo que permitió visualizar claramente la distribución direccional del viento.

#### ***4.1.7 Presentación de Resultados***

Los resultados obtenidos fueron organizados y presentados mediante:

- Tablas estadísticas descriptivas
- Gráfico de líneas para tendencias temporales
- Rosa de vientos anuales

- Histogramas de velocidad
- Curvas de distribución de Weibull
- Análisis textual detallado de los patrones observados

Los hallazgos están dirigidos a aportar información útil para evaluar la factibilidad de implementar proyectos de energía eólica y sus aplicaciones en la ciudad del Cusco.

#### **4.1.8 Limitaciones de Estudios.**

- **Altura de medición limitada:** La estación está ubicada a 2 metros del suelo, por debajo de las alturas recomendadas (10 m) por encima de la superficie del suelo y evitando la presencia de obstáculo al rededor. (SENAMHI, 2021)
- **Obstáculos físicos:** La presencia de edificaciones universitarias de cinco pisos y edificios vecinos de seis pisos altera el flujo natural del viento, afectando la dirección y velocidad registrada.
- **Cobertura espacial restringida:** Los datos corresponden exclusivamente al punto del observatorio, por lo que no representan la totalidad del recurso eólico en la región de Cusco.
- **Datos faltantes y discontinuidades:** En algunos años existen vacíos o registros incompletos, lo cual limita la continuidad en ciertas series temporales.
- **Para el cálculo de la densidad del aire:** Se efectuará el estudio bajo dos escenarios: condiciones atmosféricas estándar a nivel del mar, y condiciones específicas correspondientes a la altitud del Observatorio Meteorológico

## **4.2 Selección y Descripción de la Zona de Estudio**

### **4.2.1 Contexto Geográfico de Cusco**

Cusco es la capital de la Provincia y región homónima, ubicada al sureste del Perú. A una altitud 3,399 msnm. Limitando al norte con los departamentos de Junín y Ucayali, al este con Madre de Dios, al sureste con Puno, al sur con Arequipa y al oeste con Apurímac y Ayacucho. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática, es la séptima ciudad más poblada del Perú, con una población de 437, 538 habitantes en 2017.

La ciudad cuenta con varias universidades privadas, y dos universidades públicas, la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) es la única que tiende a 18 facultades, 42 Escuelas Profesionales, 37 maestrías, 2 doctorados y 29 programas de segunda especialización, que están al servicio de la sociedad. En el año 2023 se matricularon 18,891 estudiantes (Cusco U. N., 2023). Uno de los objetivos estratégicos de la UNSAAC es fortalecer la investigación científica, la innovación, la transferencia y el emprendimiento en docentes y estudiantes.

### **4.2.2 Marco Legal para el Fomento de Energías Renovables**

El Decreto Legislativo No 1002, publicado el 2 de mayo de 2008, promueve la inversión en generación de electricidad a partir de recursos energéticos renovables (RER) en Perú sus objetivos principales son:

- **Fomentar la Inversión:** Facilitar la inversión privada en la generación de electricidad con RER.
- **Prioridad en el Despacho:** La generación de RER tiene prioridad en el despacho diario
- **Promoción Regional:** Los Gobiernos Regionales pueden promover el uso de RER en sus territorios.

- **Objetivo de Participación:** Se establece un objetivo del 5% en participación de RER en la matriz energética.

Este Decreto busca diversificar la matriz energética y contribuir a la sostenibilidad ambiental. (Decreto Legislativo 1002, 2008)

**La Norma EM.090 Instalaciones con Energía Eólica**, establece los requisitos técnicos mínimos para la instalación de sistemas de energía eólica en edificaciones, con el propósito de promover fuentes de energías renovables en respuesta al cambio climático.

#### **Partes Fundamentales:**

- **Profesional Responsable:** La instalación debe ser supervisada por un Ingeniero Mecánico, Electricista o Mecánico-Electricista.
- **Elementos del Sistema:** El sistema debe incluir al menos un aerogenerador, sistema de control y puesta a tierra, con la posibilidad de incorporar almacenamiento de energía o pararrayos.

#### **Condiciones de Instalación**

- **Ubicación:** Debe garantizar la seguridad, funcionalidad y armonía estética con el entorno, y prever espacios adecuados para el mantenimiento.
- **Aerogenerador:** Debe cumplir con normativas locales, garantizar estabilidad y minimizar el impacto visual.
- **Sistema de Control:** Debe medir dirección y velocidad del viento, y controlar la potencia entregada.
- **Mantenimiento y Seguridad:** Se debe restringir el acceso al sistema y prever áreas libres para el mantenimiento, así como implementar medidas para controlar el ruido y la vibración.

- **Estudio de Vientos:** Es obligatorio realizar un estudio de vientos que incluya mediciones de velocidad y dirección, características del suelo y parámetros ambientales.

Este resumen abarca los aspectos claves de la norma, destacando la importancia de la planificación y el diseño adecuado para la instalación de sistemas de energía eólica en edificaciones (Normas Legales, 2012)

#### ***4.2.3 Ubicación del Observatorio Meteorológico de la UNSAAC***

El Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera se encuentra dentro del campus de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), ubicado al costado del Zoológico universitario.

Funcionando desde la década de 1970, el observatorio cuenta con diversos equipos meteorológicos que registran variables como Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad del viento, Precipitación, Radiación y otros datos. Esta información es proporcionada a estudiantes de las diferentes escuelas profesionales de la UNSAAC, y al público en general.

#### **Coordenadas Geográficas**

- **Altitud:** 3,365 msnm
- **Latitud:** 13° 31' 16" Sur
- **Longitud:** 71° 57' 53" Oeste

**Figura 9**

*Vista Satelital del Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera de la UNSAAC*



Fuente: Google (s.f.). *Google Maps*

#### **4.2.4 Entorno y Características**

El observatorio está rodeado por construcciones y edificaciones del campus universitario, incluyendo edificaciones de aulas y laboratorios que varían en altura. Estas construcciones pueden influir en las mediciones meteorológicas, específicamente en variables como la velocidad y dirección del viento, debido a los efectos de turbulencia y sombra del viento generado por las estructuras cercanas.

## **Figura 10**

*Foto del Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera de la UNSAAC con los Equipos Instalados*



*Nota:* Elaboración propia.

### ***4.2.5 Razones para Elegir el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera de la UNSAAC***

Una de las razones para elegir el observatorio es la disponibilidad de datos meteorológico registrados durante **más de 30 años**. Al ser procesados, estos datos proporcionarán información vital para la implementación de proyectos de investigación en diferentes líneas de estudio, beneficiando a las diversas Escuelas Profesionales y a la comunidad científica de la región del Cusco, a nivel nacional e internacional.

#### 4.2.6 Instrumentos de la Estación Meteorológica Luis Olazo Olivera de la UNSAAC

##### Estado Actual de los Instrumentos

El Observatorio meteorológico cuenta con 49 instrumentos, aunque no todos se encuentran operativos. A continuación, se detalla el estado de los instrumentos en la siguiente tabla:

**Tabla 4**

*Estado Actual de los Instrumentos del Observatorio*

	Buen estado	Para dar de baja	Malogrados	Enseñanza
16	X			
17		X		
15			X	
1				X

*Nota:* Elaboración propia

##### Detalles de los Instrumentos en Buen Estado

Los instrumentos que se encuentran en buen estado y operativo se detallan a continuación:

**Tabla 5**

*Lista de los Equipos en Buen Estado*

N°	Denominación	Marca	Modelo	Número de serie	de color
1	Veleta pequeña				
2	Estación Meteorológica Automática	DAVIS	VANTAGE		CREMA
3	Panel consola Vantage Pro2	DAVIS	6152	COD: A10112A022	NEGRO CRISS
4	Estación Meteorológica Automática	DAVIS INSTRUMENTS	VINTAJE PRO PLUS	IR2DWW6328 2	BLANCO/NEGRO
5	Anemómetro Totalizador	THIES	4.3018.10.00	1180012	GRIS
6	veleta				

*Nota:* Elaboración propia

#### 4.2.7 Anemómetros

Según (Muñiz, 2012) dice: “El primer paso para la valorización del recurso eólico aprovechable existente en un emplazamiento concreto consiste en realizar la medición de la velocidad del viento. Para conseguir dicho objetivo se emplean los anemómetros”  
pág.65

Los anemómetros miden la velocidad del viento usando diferentes principios:

a) **Mecánicos**

- **Cazoletas:** Mide la velocidad del viento mediante la rotación de cazoletas.
- **Hélice:** Usan hélice que gira con el viento

b) **De presión:** Como el tubo de Pitot que mide la diferencia de presión del viento.

c) **Térmicos:** Como el hilo caliente, que mide el enfriamiento del viento en un filamento.

d) **Sonidos:** Usan ondas de sonido para calcular la velocidad del viento sin partes móviles

El desarrollo de los anemómetros ha permitido una diversidad con mayor exactitud para las mediciones del viento y poder aplicarlos en meteorología. Aviación y energías eólica.

**4.2.8 Características de la Estación Meteorológica Automática Davis modelo VANTAGE PRO2-6152**

**Figura 11**

*Foto de la Estación Meteorológica DAVIS VANTAGE PRO 2*



**Nota:** Elaboración propia

**Figura 12**

*Imagen de la Estación con Todos sus Componentes*



**Fuente:** Google (s.f.)

Las características de la consola **Vantage Pro2** es una herramienta completa y versátil para el monitoreo y análisis d datos meteorológico según algunas características:

- 1) **Visualización de Datos:** La consola muestra datos entiendo real como temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, precipitación, y radiación.
- 2) **Registro de Datos:** La consola registra datos históricos, permitiendo revisar y analizar tendencias a lo largo del tiempo.
- 3) **Interfaz de Usuario:** Cuenta con un teclado que permite navegar por las diferentes funciones establecer alarmas y cambiar configuraciones.
- 4) **Conectividad:** La consola se puede conectar a un ordenador mediante un puerto serial o USB utilizando el software WeatherLink para visualizar y análisis de los datos.
- 5) **Gráficos y Tendencias:** Ofrece la capacidad de visualizar gráficos que muestran tendencias en los datos meteorológicos.

Ahora nos centraremos en el viento:

**Medición de la velocidad del Viento:** La consola Vantage Pro2 mide la velocidad del viento en diferentes unidades como millas por hora (MPH), kilómetros por hora (Km/h), nudos, o metros por segundo (m/s), la velocidad del viento se muestra en tiempo real.

- **Dirección del Viento:** La dirección del viento se mide en grados (0° a 360°) o como un punto cardinal (norte, sur este, oeste), la consola utiliza una veleta para determinar la dirección del viento que se muestra en la pantalla.

- **Sensores de Viento:** La estación está equipada con un anemómetro para medir la velocidad del viento y una veleta para medir su dirección, estos sensores son esenciales para proporcionar sobre las condiciones del viento.
- **Datos Históricos:** La consola puede almacenar datos históricos sobre la velocidad y dirección del viento, permitiendo revisar.
- **Tendencias del Viento:** La consola puede mostrar la tendencia del viento, que indica si la velocidad del viento está aumentando o disminuyendo.
- **Exportación de Datos:** Los datos de viento pueden ser exportados a través del software WeatherLink, permitiendo su análisis en programas como Excel.

#### 4.3 Método de Estudio y Materiales

El estudio ha sido realizado con los datos proporcionados por el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera de la UNSAAC, ubicada en la ciudad de Cusco, recabando datos concernientes a la velocidad y dirección del viento medidos por la Estación Meteorológica DAVIS VANTAGE PRO2 modelo 6152. Con las cuales usando el software Excel 2013 en un ordenador, se determinaron las tendencias mensuales del promedio de las velocidades del viento durante todo el tiempo indicado, la dirección predominante del viento mediante la rosa de viento para la zona de estudio.

Posteriormente se realizó un análisis cualitativo utilizando herramientas matemáticas como la distribución de Weibull para el recurso eólico.

## **CAPITULO V**

### **RESULTADOS**

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los datos registrados por la estación meteorológica Davis Vantage Pro2, instalada en el observatorio Luis Olazo Olivera – Perayoc de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), durante el periodo 2012–2023. El objetivo principal es caracterizar el recurso eólico desde un enfoque descriptivo y analítico, en concordancia con los objetivos específicos planteados en la presente investigación.

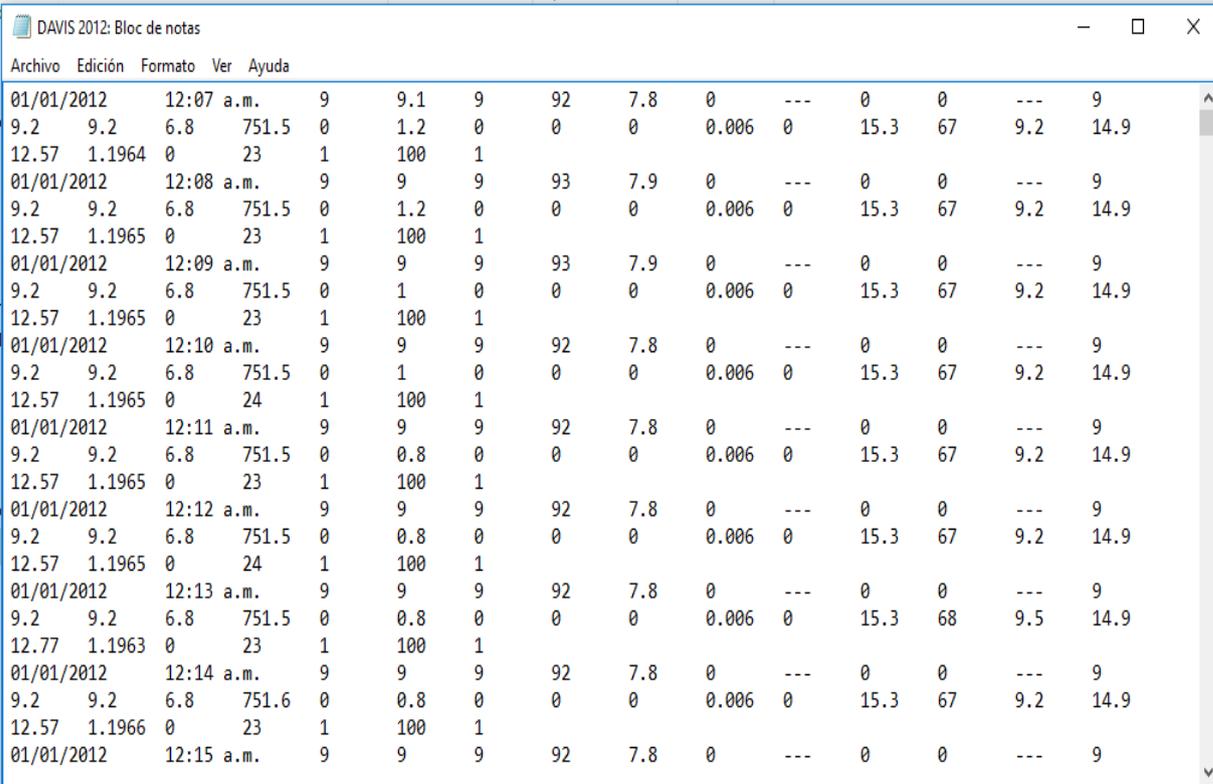
#### **5.1 Análisis de Datos**

##### **5.1.1 Clasificación de las Velocidades**

Para garantizar la viabilidad del presente estudio en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, se utilizaron los datos registrados por el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera, correspondientes a la velocidad y dirección del viento en el periodo 2012–2023. La información fue obtenida mediante la estación meteorológica automática DAVIS Vantage Pro2 y recopilada con el objetivo de caracterizar el recurso eólico en el área de estudio

**Figura 13**

*Imagen de los Datos Almacenados en el Bloc de Notas de Davis*



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda										
01/01/2012	12:07	a.m.	9	9.1	9	92	7.8	0	---	0	0	---	9	
9.2	9.2	6.8	751.5	0	1.2	0	0	0	0.006	0	15.3	67	9.2	14.9
12.57	1.1964	0	23	1	100	1								
01/01/2012	12:08	a.m.	9	9	9	93	7.9	0	---	0	0	---	9	
9.2	9.2	6.8	751.5	0	1.2	0	0	0	0.006	0	15.3	67	9.2	14.9
12.57	1.1965	0	23	1	100	1								
01/01/2012	12:09	a.m.	9	9	9	93	7.9	0	---	0	0	---	9	
9.2	9.2	6.8	751.5	0	1	0	0	0	0.006	0	15.3	67	9.2	14.9
12.57	1.1965	0	23	1	100	1								
01/01/2012	12:10	a.m.	9	9	9	92	7.8	0	---	0	0	---	9	
9.2	9.2	6.8	751.5	0	1	0	0	0	0.006	0	15.3	67	9.2	14.9
12.57	1.1965	0	24	1	100	1								
01/01/2012	12:11	a.m.	9	9	9	92	7.8	0	---	0	0	---	9	
9.2	9.2	6.8	751.5	0	0.8	0	0	0	0.006	0	15.3	67	9.2	14.9
12.57	1.1965	0	23	1	100	1								
01/01/2012	12:12	a.m.	9	9	9	92	7.8	0	---	0	0	---	9	
9.2	9.2	6.8	751.5	0	0.8	0	0	0	0.006	0	15.3	67	9.2	14.9
12.57	1.1965	0	24	1	100	1								
01/01/2012	12:13	a.m.	9	9	9	92	7.8	0	---	0	0	---	9	
9.2	9.2	6.8	751.5	0	0.8	0	0	0	0.006	0	15.3	68	9.5	14.9
12.77	1.1963	0	23	1	100	1								
01/01/2012	12:14	a.m.	9	9	9	92	7.8	0	---	0	0	---	9	
9.2	9.2	6.8	751.6	0	0.8	0	0	0	0.006	0	15.3	67	9.2	14.9
12.57	1.1966	0	23	1	100	1								
01/01/2012	12:15	a.m.	9	9	9	92	7.8	0	---	0	0	---	9	

**Nota:** Elaboración propia

El procesamiento de los datos proporcionado por el Observatorio tiene registros diarios, mensuales desde el año 2012 hasta el año 2023, se realizó utilizando el paquete R base y el editor Rstudio. Esto permitió generar resúmenes mensuales de las velocidades del viento y sus respectivas direcciones. El análisis efectuado fue minucioso y abarco a la base de datos proporcionado por el Observatorio meteorológico de la UNSAAC.

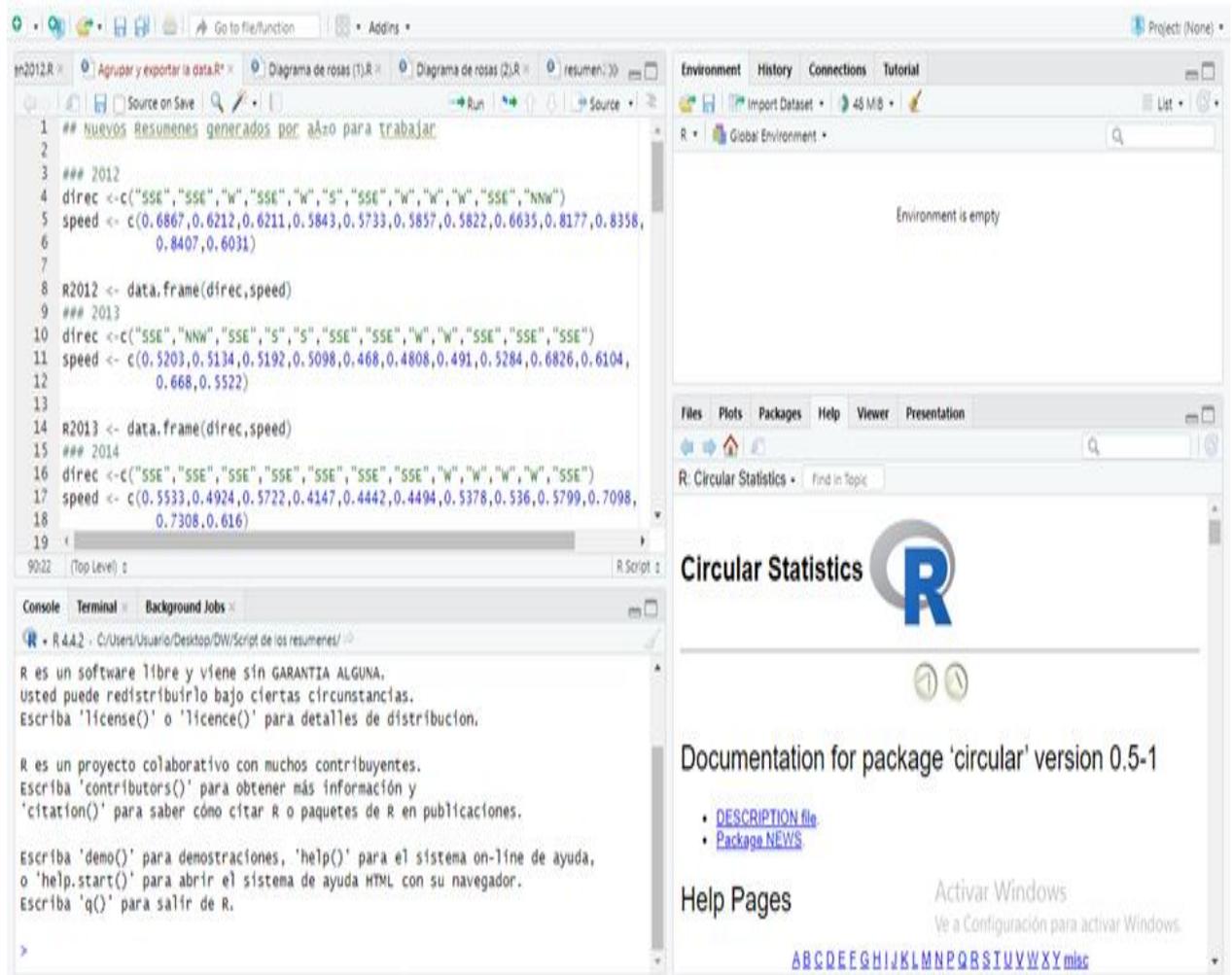
Cabe mencionar que existen datos faltantes en los años 2020 y 2021 debido a la pandemia de COVID – 19, como se detalla a continuación:

- En el año 2020 solo se cuenta con los datos registrados de los meses de enero a mayo.
- En el 2021, únicamente se tiene información del mes de julio.

Debido a que los datos no son completos, se trabajó con la información disponible para generar los resúmenes respectivos. Estos resúmenes se exportaron a un a base de datos, la cual se utilizó para realizar el análisis de la velocidad, dirección del viento y la distribución de Weibull para caracterizar el recurso eólico. El procesamiento de los datos se trabajó en el paquete R permitiendo estructurar la información de manera más adecuada para su análisis posterior.

**Figura 14**

*Imagen del Código del Paquete R con RStudio*



**Nota:** Elaboración propia

## 5.2 Determinar las Velocidades Promedio Mensual y Anual del Viento

En respuesta al Objetivo Especifico 1: Evaluar las velocidades promedio del viento registrados en el observatorio durante el periodo de estudio

**Figura 15**

*Imagen de los Datos Registrados por la Estación Meteorológico Davis*

The image shows a spreadsheet titled 'DAVIS 2012' with columns labeled A through AE. The data rows represent hourly measurements from 12:01 a.m. to 12:38 a.m. Key columns include: Date, Time, Temp (High, Low, Out, Dew Pt), Hum, Vind (Speed, Dir, Flon), HI, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, and AE. The 'Vind' column shows wind speeds and directions such as '0.4 E', '0.9 E', and '0.4 ENE'. The 'HI' column shows wind direction codes like 'SSE', 'W', and 'SSE'.

**Nota:** Elaboración propia

**Tabla 6**

*Velocidades del Viento Mensual del Año 2012*

Años	Meses	Dirección	Velocidad	$v_i - \bar{v}$	Varianza ( $\sigma^2$ )
2012	Enero	SSE	0.7	0.03333333	0.00111111
2012	Febrero	SSE	0.6	-0.06666667	0.00444444
2012	Marzo	W	0.6	-0.06666667	0.00444444
2012	Abril	SSE	0.6	-0.06666667	0.00444444
2012	Mayo	W	0.6	-0.06666667	0.00444444
2012	Junio	S	0.6	-0.06666667	0.00444444
2012	Julio	SSE	0.6	-0.06666667	0.00444444
2012	Agosto	W	0.7	0.03333333	0.00111111
2012	Setiembre	W	0.8	0.13333333	0.01777778
2012	Octubre	W	0.8	0.13333333	0.01777778
2012	Noviembre	SSE	0.8	0.13333333	0.01777778
2012	Diciembre	NNW	0.6	-0.06666667	0.00444444

**Nota:** Elaboración propia

Formulas empleadas para los cálculos:

Para el promedio de la velocidad para el año 2012

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$\bar{v} = \frac{8,0}{12} = 0,66666667 \text{ m/s}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$$

$$\sigma^2 = \frac{0,08666667}{11} = 0,00787879 (\text{m/s})^2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{0,00787879} = 0,0888762548 \text{ m/s}$$

#### **Interpretación de la tabla N° 6:**

Durante el año 2012 la velocidad promedio anual del viento fue de 0,667 m/s y una desviación estándar de 0,089 m/s, lo que indica baja variabilidad en el recurso eólico. Los meses con mayor desviación correspondieron a setiembre, octubre y noviembre, reflejando mayor inestabilidad en esos periodos.

**Tabla 7***Velocidades del Viento Mensual del Año 2013*

Años	Meses	Dirección	Velocidad	$v_i - \bar{v}$	Varianza ( $\sigma^2$ )
2013	Enero	SSE	0.5	-0.05	0.0025
2013	Febrero	NNW	0.5	-0.05	0.0025
2013	Marzo	SSE	0.5	-0.05	0.0025
2013	Abril	S	0.5	-0.05	0.0025
2013	Mayo	S	0.5	-0.05	0.0025
2013	Junio	SSE	0.5	-0.05	0.0025
2013	Julio	SSE	0.5	-0.05	0.0025
2013	Agosto	W	0.5	-0.05	0.0025
2013	Setiembre	W	0.7	0.15	0.0225
2013	Octubre	SSE	0.6	0.05	0.0025
2013	Noviembre	SSE	0.7	0.15	0.0225
2013	Diciembre	SSE	0.6	0.05	0.0025

*Nota:* Elaboración propia

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$\bar{v} = \frac{6,6}{12} = 0,55 \text{ m/s}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$$

$$\sigma^2 = \frac{0,0675}{11} = 0,00613637 (\text{m/s})^2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{0.00613637} = 0.078335 \text{ m/s}$$

### Interpretación de la tabla N° 7:

Durante el año 2013, la velocidad promedio del viento fue de 0,55 m/s, con una desviación estándar de 0,078 m/s, lo que indica que el viento fue relativamente constante. Solo algunos meses (como setiembre y noviembre) presentaron valores superiores al promedio. Esto refleja una baja variabilidad del recurso eólico durante este año.

**Tabla 8**

*Velocidades del Viento Mensual del Año 2014*

Años	Meses	Dirección	Velocidad	$v_i - \bar{v}$	Varianza ( $\sigma^2$ )
2014	Enero	SSE	0.6	0.05833333	0.00340278
2014	Febrero	SSE	0.5	-0.04166667	0.00173611
2014	Marzo	SSE	0.6	0.05833333	0.00340278
2014	Abril	SSE	0.4	-0.14166667	0.02006944
2014	Mayo	SSE	0.4	-0.14166667	0.02006944
2014	Junio	SSE	0.4	-0.14166667	0.02006944
2014	Julio	SSE	0.5	-0.04166667	0.00173611
2014	Agosto	W	0.5	-0.04166667	0.00173611
2014	Setiembre	W	0.6	0.05833333	0.00340278
2014	Octubre	W	0.7	0.15833333	0.02506944
2014	Noviembre	W	0.7	0.15833333	0.02506944
2014	Diciembre	SSE	0.6	0.05833333	0.00340278

*Nota:* Elaboración propia

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$\bar{v} = \frac{6,5}{12} = 0,54166667 \text{ m/s}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$$

$$\sigma^2 = \frac{0,12916667}{11} = 0,011742 (\text{m/s})^2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{0.011742} = 0.1084 \text{ m/s}$$

**Interpretación de la tabla N° 8:**

Durante el año 2014, la velocidad promedio del viento fue de 0,542 m/s, con una desviación estándar de 0,108 m/s, lo que indica una moderada variabilidad a lo largo del año. En particular, se observa que los meses de abril, mayo y junio presentan valores por debajo del promedio, mientras que octubre y noviembre alcanzan los mayores picos. Este comportamiento sugiere una leve estacionalidad del recurso eólico en la zona de estudio.

**Tabla 9**

*Velocidades del Viento Mensual del Año 2015*

Años	Meses	Dirección	Velocidad	$v_i - \bar{v}$	Varianza ( $\sigma^2$ )
2015	Enero	SSE	0.6	0.1	0.01
2015	Febrero	SSE	0.5	0	0
2015	Marzo	W	0.5	0	0
2015	Abril	W	0.4	-0.1	0.01
2015	Mayo	SSE	0.4	-0.1	0.01
2015	Junio	W	0.4	-0.1	0.01
2015	Julio	SSE	0.4	-0.1	0.01
2015	Agosto	W	0.5	0	0
2015	Setiembre	W	0.6	0.1	0.01
2015	Octubre	W	0.6	0.1	0.01
2015	Noviembre	SSE	0.7	0.2	0.04
2015	Diciembre	SSE	0.4	-0.1	0.01

*Nota:* Elaboración propia

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$\bar{v} = \frac{6,0}{12} = 0,5 \text{ m/s}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$$

$$\sigma^2 = \frac{0,12}{12} = 0,010909 (m/s)^2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{0.010909} = 0.104446 \text{ m/s}$$

### Interpretación de la tabla N° 9:

Durante el año 2015, la velocidad media del viento fue de 0,5 m/s, con una desviación estándar de 0,104 m/s, lo cual indica una baja variabilidad mensual en los valores. La mayor velocidad registrada fue en noviembre (0,7 m/s), mientras que varios meses se mantuvieron por debajo del promedio (abril a julio y diciembre). La varianza constante en muchos meses sugiere que el viento fue relativamente estable ese año.

### Tabla 10

*Velocidades del Viento Mensual del Año 2016*

Años	Meses	Dirección	Velocidad	$v_i - \bar{v}$	Varianza ( $\sigma^2$ )
2016	Enero	W	0.5	0.00833333	6.94444E-05
2016	Febrero	SSE	0.5	0.00833333	6.94444E-05
2016	Marzo	W	0.6	0.10833333	0.011736111
2016	Abril	SSE	0.4	-0.09166667	0.008402778
2016	Mayo	W	0.4	-0.09166667	0.008402778
2016	Junio	SSE	0.4	-0.09166667	0.008402778
2016	Julio	W	0.3	-0.19166667	0.036736111
2016	Agosto	W	0.5	0.00833333	6.94444E-05
2016	Setiembre	W	0.6	0.10833333	0.011736111
2016	Octubre	W	0.5	0.00833333	6.94444E-05
2016	Noviembre	W	0.7	0.20833333	0.043402778
2016	Diciembre	W	0.5	0.00833333	6.94444E-05

**Nota:** Elaboración propia

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$\bar{v} = \frac{6,5}{12} = 0,54166667 \text{ m/s}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$$

$$\sigma^2 = \frac{0,12916667}{11} = 0,011742 (\text{m/s})^2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{0.011742} = 0.1084 \text{ m/s}$$

#### **Interpretación de la tabla N° 10:**

En 2016, las velocidades del viento oscilaron entre 0,3 m/s (julio) y 0,7 m/s (noviembre), con un promedio anual de aproximadamente 0,542 m/s. La mayoría de los meses presentaron valores cercanos al promedio, destacando una mayor estabilidad en enero, febrero, octubre y diciembre (0.5 m/s), y ligeros aumentos en marzo, septiembre y noviembre.

**Tabla 11***Velocidades del Viento Mensual del Año 2017*

Años	Meses	Dirección	Velocidad	$v_i - \bar{v}$	Varianza ( $\sigma^2$ )
2017	Enero	W	0.5	0.05833333	0.00340278
2017	Febrero	SSE	0.5	0.05833333	0.00340278
2017	Marzo	W	0.4	-0.04166667	0.00173611
2017	Abril	W	0.4	-0.04166667	0.00173611
2017	Mayo	SSE	0.3	-0.14166667	0.02006944
2017	Junio	W	0.3	-0.14166667	0.02006944
2017	Julio	W	0.4	-0.04166667	0.00173611
2017	Agosto	SSE	0.5	0.05833333	0.00340278
2017	Setiembre	W	0.5	0.05833333	0.00340278
2017	Octubre	W	0.5	0.05833333	0.00340278
2017	Noviembre	W	0.5	0.05833333	0.00340278
2017	Diciembre	W	0.5	0.05833333	0.00340278

**Nota:** Elaboración propia

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$\bar{v} = \frac{5,3}{12} = 0,44166667 \text{ m/s}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$$

$$\sigma^2 = \frac{0,06916667}{11} = 0,006288(m/s)^2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{0,006288} = 0,07930 \text{ m/s}$$

### Interpretación de la tabla N°11:

Durante 2017, el viento tuvo una velocidad promedio de 0,442 m/s, con una desviación estándar de 0,079 m/s, lo que indica baja variabilidad mensual. Los meses de mayo y junio presentaron las velocidades más bajas (0,3 m/s), generando la mayor dispersión respecto al promedio. La mayor parte de los meses mantuvieron valores ligeramente por encima del promedio (entre 0,5 m/s)

**Tabla 12**

*Velocidades del Viento Mensual del Año 2018*

Años	Meses	Dirección	Velocidad	$v_i - \bar{v}$	Varianza ( $\sigma^2$ )
2018	Enero	SSE	0.5	0.06666667	0.00444444
2018	Febrero	NW	0.4	-0.03333333	0.00111111
2018	Marzo	NW	0.4	-0.03333333	0.00111111
2018	Abril	W	0.4	-0.03333333	0.00111111
2018	Mayo	SSE	0.3	-0.13333333	0.01777778
2018	Junio	SSE	0.4	-0.03333333	0.00111111
2018	Julio	W	0.3	-0.13333333	0.01777778
2018	Agosto	SSE	0.5	0.06666667	0.00444444
2018	Setiembre	W	0.5	0.06666667	0.00444444
2018	Octubre	NW	0.5	0.06666667	0.00444444
2018	Noviembre	NW	0.5	0.06666667	0.00444444
2018	Diciembre	W	0.5	0.06666667	0.00444444

*Nota:* Elaboración propia

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$\bar{v} = \frac{5,2}{12} = 0,43333333 \text{ m/s}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$$

$$\sigma^2 = \frac{0,06666667}{11} = 0,060606 \text{ m/s}^2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{0.060606} = 0.246183 \text{ m/s}$$

**Interpretación de la tabla N° 12:**

Durante 2018, la velocidad del viento fue moderadamente estable con una media de 0,433 m/s y una baja variabilidad mensual ( $\sigma = 0,245183$  m/s). Los meses de mayo y julio registraron las velocidades más bajas (0,3 m/s), causando las mayores desviaciones respecto al promedio. En contraste, agosto a diciembre mostraron valores estables de 0,5 m/s, lo cual redujo la dispersión general.

**Tabla 13**

*Velocidades del Viento Mensual del Año 2019*

Años	Meses	Dirección	Velocidad	$v_i - \bar{v}$	Varianza ( $\sigma^2$ )
2019	Enero	ENE	0.5	0.09166667	0.008402778
2019	Febrero	SW	0.4	-0.00833333	6.94444E-05
2019	Marzo	E	0.4	-0.00833333	6.94444E-05
2019	Abril	NW	0.4	-0.00833333	6.94444E-05
2019	Mayo	NW	0.3	-0.10833333	0.011736111
2019	Junio	NW	0.3	-0.10833333	0.011736111
2019	Julio	SW	0.3	-0.10833333	0.011736111
2019	Agosto	E	0.4	-0.00833333	6.94444E-05
2019	Setiembre	E	0.5	0.09166667	0.008402778
2019	Octubre	NW	0.5	0.09166667	0.008402778
2019	Noviembre	SW	0.4	-0.00833333	6.94444E-05
2019	Diciembre	SW	0.5	0.09166667	0.008402778

*Nota:* Elaboración propia

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$\bar{v} = \frac{4,9}{12} = 0,40833333 \text{ m/s}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$$

$$\sigma^2 = \frac{0,06916667}{11} = 0,006288 \text{ (m/s)}^2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{0.006288} = 0.07930 \text{ m/s}$$

### Interpretación de la tabla N° 13:

Durante el año 2019, la velocidad promedio del viento fue de aproximadamente 0,408 m/s, con una variabilidad moderada ( $\sigma = 0,079$  m/s). Los meses de mayo, junio y julio mostraron las velocidades más bajas (0,3 m/s), lo que incrementó la varianza. Los meses con velocidades más altas fueron enero, setiembre, octubre y diciembre (0,5 m/s), lo cual contribuyó a aumentar el promedio. En general, el viento se mantuvo bastante estable durante el año con fluctuaciones pequeñas.

### Tabla 14

*Velocidades del Viento Mensual del Año 2022*

Años	Meses	Dirección	Velocidad	$v_i - \bar{v}$	Varianza ( $\sigma^2$ )
2022	Enero	SE	0.5	0.05833333	0.003402778
2022	Febrero	W	0.4	-0.04166667	0.001736111
2022	Marzo	W	0.4	-0.04166667	0.001736111
2022	Abril	SW	0.4	-0.04166667	0.001736111
2022	Mayo	S	0.4	-0.04166667	0.001736111
2022	Junio	SE	0.4	-0.04166667	0.001736111
2022	Julio	SW	0.4	-0.04166667	0.001736111
2022	Agosto	SE	0.5	0.05833333	0.003402778
2022	Setiembre	E	0.4	-0.04166667	0.001736111
2022	Octubre	E	0.5	0.05833333	0.003402778
2022	Noviembre	E	0.6	0.15833333	0.025069444
2022	Diciembre	NNE	0.4	-0.04166667	0.001736111

*Nota:* Elaboración propia

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$\bar{v} = \frac{5,3}{12} = 0,44166667 \text{ m/s}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$$

$$\sigma^2 = \frac{0,04916667}{11} = 0,004470 (\text{m/s})^2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{0,004470} = 0,06686 \text{ m/s}$$

#### **Interpretación de la tabla N° 14:**

Durante el año 2022, la velocidad promedio del viento fue de 0,442 m/s con una desviación estándar baja de 0,067 m/s, lo que indica poca variabilidad mensual. La mayoría de los meses tuvieron velocidades alrededor de 0,4 m/s, mientras que noviembre presentó la velocidad más alta con 0,6 m/s, generando la mayor dispersión. En general, el viento mostró un comportamiento estable durante el año.

**Tabla 15***Velocidades del Viento Mensual del Año 2023*

Años	Meses	Dirección	Velocidad	$v_i - \bar{v}$	Varianza ( $\sigma^2$ )
2023	Enero	WSW	0.3	-0.04166667	0.00173611
2023	Febrero	W	0.4	0.05833333	0.00340278
2023	Marzo	S	0.1	-0.24166667	0.05840278
2023	Abril	NNE	0.2	-0.14166667	0.02006944
2023	Mayo	WSW	0.2	-0.14166667	0.02006944
2023	Junio	SSE	0.3	-0.04166667	0.00173611
2023	Julio	W	0.3	-0.04166667	0.00173611
2023	Agosto	W	0.3	-0.04166667	0.00173611
2023	Setiembre	W	0.5	0.15833333	0.02506944
2023	Octubre	W	0.7	0.35833333	0.12840278
2023	Noviembre	W	0.5	0.15833333	0.02506944
2023	Diciembre	W	0.3	-0.04166667	0.00173611

**Nota:** Elaboración propia

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$\bar{v} = \frac{4,0}{12} = 0,34166667 \text{ m/s}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$$

$$\sigma^2 = \frac{0,28916667}{11} = 0,026288(m/s)^2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{0,026288} = 0,162136 \text{ m/s}$$

### Interpretación de la tabla N° 15:

Durante el año 2023, la velocidad promedio del viento fue de 0,342 m/s, con una desviación estándar más alta (0,162 m/s) que indica mayor variabilidad mensual. Los meses de marzo, abril y mayo mostraron velocidades bajas (0,1–0,2 m/s), mientras que octubre alcanzó la velocidad máxima con 0,7 m/s, generando la mayor dispersión. En general, el viento presentó un comportamiento más variable y con picos más marcados que en años anteriores.

**Tabla 16**

*Velocidades Promedio Durante 2012-2023*

Años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	$\bar{v}$
2012	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.6	0.666667
2013	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.6	0.7	0.6	0.550000
2014	0.6	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.541667
2015	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.4	0.500000
2016	0.5	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.7	0.5	0.491667
2017	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.441667
2018	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.433333
2019	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.408333
2022	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.6	0.4	0.441667
2023	0.3	0.4	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.5	0.7	0.5	0.3	0.341667
													0.481667

*Nota:* Elaboración propia

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$\bar{v} = \frac{4,81667}{10} = 0,481667 \text{ m/s}$$

$$\bar{v} = 0,481667 \text{ m/s}$$

### **Interpretación de la tabla N° 16:**

Los datos registrados en el Observatorio Meteorológico “Luis Olazo Olivera” durante el periodo 2012–2023 muestran una tendencia general a la disminución en las velocidades promedio del viento. El valor más alto de velocidad promedio anual se presentó en el año 2012, con 0,6667 m/s, mientras que el valor más bajo corresponde al año 2023, con 0,3417 m/s. Esta reducción sostenida sugiere la posible influencia de factores locales, como el crecimiento de la infraestructura urbana en los alrededores de la estación, lo que habría incrementado la rugosidad superficial y reducido la velocidad del viento registrada a 2 metros de altura.

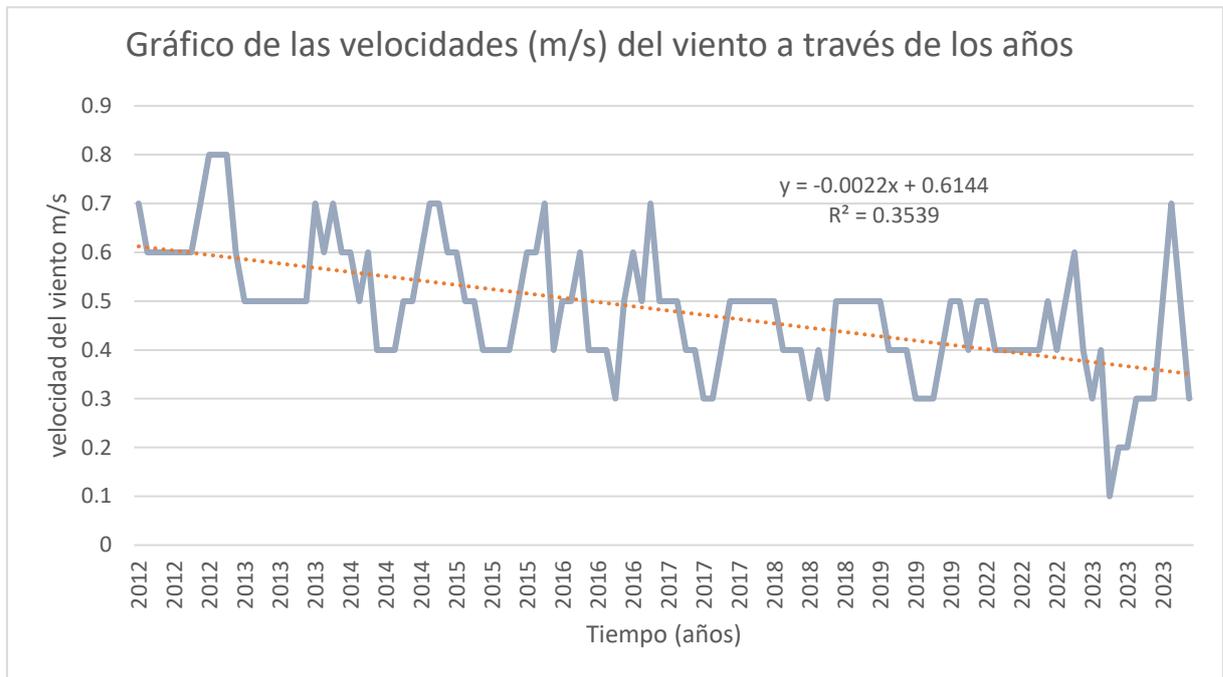
En cuanto al comportamiento mensual, los meses de septiembre, octubre y noviembre registran, en general, las mayores velocidades promedio, mientras que junio, julio y agosto presentan los valores más bajos en la mayoría de los años. Este comportamiento estacional está asociado al régimen climático del Cusco, en el cual la temporada seca influye en la dinámica de los vientos locales.

El promedio general de las velocidades anuales en todo el periodo evaluado es de aproximadamente 0,481667 m/s, lo cual evidencia que el recurso eólico en esta zona es relativamente baja y posiblemente más adecuado para aplicaciones de pequeña escala o fines experimentales.

Cabe resaltar que los años 2020 y 2021 no fueron incluidos en el análisis debido a la incompletitud de los registros, resultado de la suspensión de actividades presenciales durante la pandemia por la COVID-19, que limitó el mantenimiento y monitoreo continuo de la estación meteorológica. En conjunto, el análisis temporal revela una disminución paulatina de la velocidad del viento y una marcada estacionalidad, lo cual es fundamental para la caracterización del recurso eólico en esta zona específica del campus universitario.

**Figura 16**

*Velocidades Promedio Durante el Periodo 2012-2023*



**Nota:** Elaboración propia

**Interpretación de la figura N° 16:**

El análisis de la velocidad promedio del viento registrada entre 2012 y 2023 en el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera muestra una tendencia descendente a lo largo del tiempo. Esta tendencia se refleja en la línea de regresión del gráfico, cuya ecuación es:

$$Y = -0,0022 X + 0.6144$$

La pendiente negativa (-0,0022) indica que la velocidad del viento ha disminuido, en promedio, 0,0022 m/s por año, lo que sugiere un descenso paulatino del recurso eólico en la zona. La ordenada al origen (0,6144 m/s) representa el valor estimado al inicio del

período analizado, y es coherente con los registros más altos obtenidos en los primeros años del estudio.

Este descenso puede estar asociado a modificaciones en las condiciones locales, como el aumento de construcciones en los alrededores del observatorio, lo que genera mayor rugosidad superficial, reduce la velocidad efectiva del viento a baja altura (2 metros) y puede generar turbulencia. Además, no se descarta la influencia de factores climáticos regionales o globales que afectan la circulación atmosférica local.

$R^2 = 0.3539$  indica que el modelo de regresión lineal explica aproximadamente el 35.4 % de la variabilidad de las velocidades del viento en función del tiempo. Esto sugiere que, si bien existe una tendencia temporal clara, hay también una alta variabilidad anual y mensual, lo que es característico de este tipo de variable meteorológica, influenciada por múltiples factores dinámicos.

Es importante señalar que los años 2020 y 2021 no fueron considerados en este análisis debido a la incompletitud de los registros durante la pandemia por la COVID-19, lo cual interrumpió el monitoreo continuo en la estación. Los datos evidencian una evolución decreciente y estacional del viento en el lugar de estudio, lo que constituye una característica clave para la comprensión y caracterización del recurso eólico en este entorno urbano-universitario.

### **5.3 Calcular la Densidad del Aire en Función de la Altitud**

La densidad del aire ( $\rho$ ) es una variable fundamental para el estudio del recurso eólico, ya que influye directamente en la cantidad de energía que el viento puede transportar. Normalmente, la densidad del aire depende de tres factores: la presión atmosférica, la temperatura y la altitud.

Sin embargo, debido a que las variables temperatura y presión no fueron consideradas en los objetivos específicos del estudio, se optó por estimar la densidad del aire utilizando un modelo empírico basado únicamente en la altitud sobre el nivel del mar. Según la ecuación (7), la densidad atmosférica disminuye exponencialmente con la altitud, de manera similar a la presión atmosférica. La relación entre la densidad atmosférica y la altura está dada por la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_0 e^{-0.0001186.h}$$

Se calcula la densidad del aire para la altitud del observatorio, ubicado a 3365 msnm, y también para la altura del instrumento de medición, situado a 2 metros sobre el nivel del suelo, es decir, a 3367 msnm. Aplicando la ecuación:

- Para 3365 msnm:

Reemplazamos el valor de la densidad:  $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$

$$\rho = 1.225 e^{-(0,0001186).(3,365)}$$

$$\rho = 1,225 e^{-0,399199}$$

$$\rho = 1,225(0,6707)$$

$$\rho = 0,8211 \text{ kg/m}^3$$

- Para 3367 msnm:

$$\rho = \rho_0 e^{-0.0001186.h}$$

$$\rho = 1,225 e^{-0,3994362}$$

$$\rho = 1,225(0,6705)$$

$$\rho = 0,8210 \text{ kg/m}^3$$

### **Interpretación de los resultados:**

Como se observa, la diferencia de densidad entre ambas alturas (3365 y 3367 msnm) es mínima, por lo que se puede considerar prácticamente constante es rango para efectos del presente estudio.

### 5.3.1 Cálculo de la Densidad de Potencia del Viento

Para estimar el potencial energético del viento en el observatorio meteorológico Luis Olazo Olivera a una altitud de 3365 msnm, se utiliza la ecuación (12) de la densidad de potencia del viento:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3$$

Donde reemplazamos con los valores antes obtenidos para 3365 msnm

$$\rho = 0,8211 \frac{kg}{m^3}$$

$$v = 0,481667 \text{ m/s}$$

$\frac{P}{A}$  = potencia por unidad de área(w/m<sup>2</sup>)

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot 0,8211 \cdot (0,481667)^3$$

$$\frac{P}{A} = 0,5 \cdot 0,8211 \cdot 0,1118$$

$$\frac{P}{A} = 0,04589949 \text{ W/m}^2$$

Donde reemplazamos con los valores antes obtenidos para 3367 msnm

$$\rho = 0,8210 \frac{kg}{m^3}$$

$$v = 0,481667 \text{ m/s}$$

$\frac{P}{A}$  = potencia por unidad de área(w/m<sup>2</sup>)

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot 0,8210 \cdot (0,481667)^3$$

$$\frac{P}{A} = 0,5 \cdot 0,8210 \cdot 0,1118$$

$$\frac{P}{A} = 0,0458939 \text{ W/m}^2$$

### **Interpretación de los resultados:**

Ambos resultados muestran valores muy similares, lo cual era esperado dada la escasa diferencia altitudinal entre ambos puntos de medición (2 metros). La leve variación en la densidad del aire no genera un cambio significativo en la densidad de potencia del viento. Estos valores se ubican muy por debajo del umbral mínimo establecido por el Atlas Eólico del Perú, que considera un potencial eólico pobre cuando la densidad de potencia es menor a 200 W/m<sup>2</sup>. Esto indica que, bajo las condiciones registradas en el periodo de 2012-2023, el recurso eólico en la zona evaluada presenta una capacidad muy limitada para la generación de energía mediante turbinas eólicas, principalmente debido a la baja velocidad promedio del viento y a la disminución de la densidad del aire producto de la altitud.

### **5.4 Graficas de la Rosa de Vientos**

A partir de las frecuencias de las direcciones de las velocidades de viento predominantes, permitirá construir la rosa de vientos anuales.

**Tabla 17**

*Dirección del Viento para el Año 2012*

Año	Año	Dirección
2012	Enero	SSE
2012	Febrero	SSE
2012	Marzo	W
2012	Abril	SSE
2012	Mayo	W
2012	Junio	S
2012	Julio	SSE
2012	Agosto	W
2012	Setiembre	W
2012	Octubre	W
2012	Noviembre	SSE
2012	Diciembre	NNW

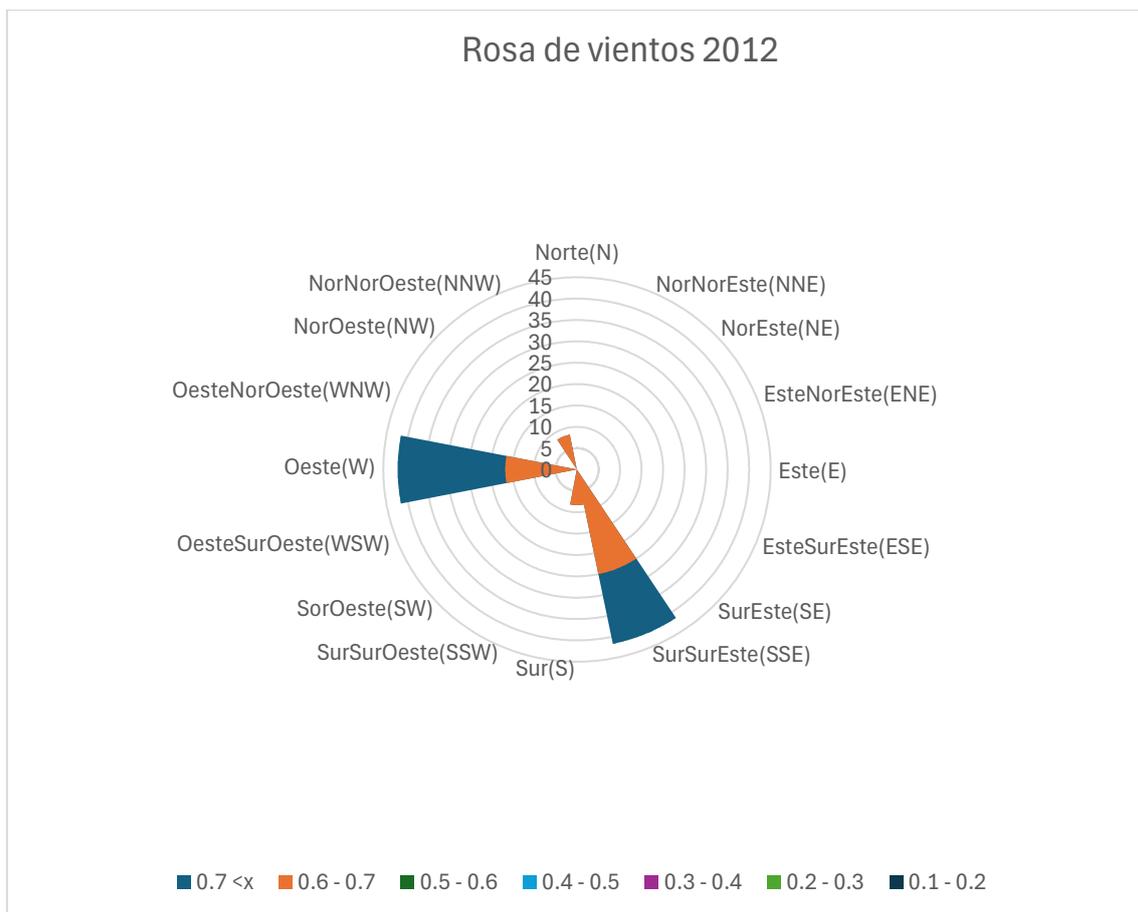
Nota: Elaboración propia

### Interpretación de la tabla N° 19:

En 2012, las direcciones predominantes del viento fueron Sur-Sureste (SSE) y Oeste (W), cada una presente en 5 meses del año. Esto refleja dos regímenes principales de viento, influenciados por la estacionalidad y la topografía local. El SSE se asocia a meses húmedos o de transición, mientras que el W aparece en meses más secos y estables. También se registraron direcciones aisladas como Sur (S) y Nornoroeste (NNW), indicando cierta variabilidad estacional. Esta información es clave para entender el comportamiento del viento y su potencial aprovechamiento energético.

**Figura 17**

*Rosa de Vientos para el Año 2012*



**Nota:** Elaboración propia

### **Interpretación de la figura N° 18:**

La rosa de vientos del año 2012 muestra que las direcciones predominantes fueron Sur-Sureste (SSE) y Oeste (W), ambas con igual frecuencia. Esto indica una circulación bimodal del viento influenciada por la estacionalidad y la topografía local. Direcciones como Sur (S) y Nornoroeste (NNW) aparecen ocasionalmente, reflejando una variabilidad moderada. Esta información es esencial para orientar adecuadamente sistemas eólicos y evaluar el potencial del recurso.

### **Tabla 18**

*Dirección del Viento para el Año 2013*

Año	Mes	Dirección
2013	Enero	SSE
2013	Febrero	NNW
2013	Marzo	SSE
2013	Abril	S
2013	Mayo	S
2013	Junio	SSE
2013	Julio	SSE
2013	Agosto	W
2013	Setiembre	W
2013	Octubre	SSE
2013	Noviembre	SSE
2013	Diciembre	SSE

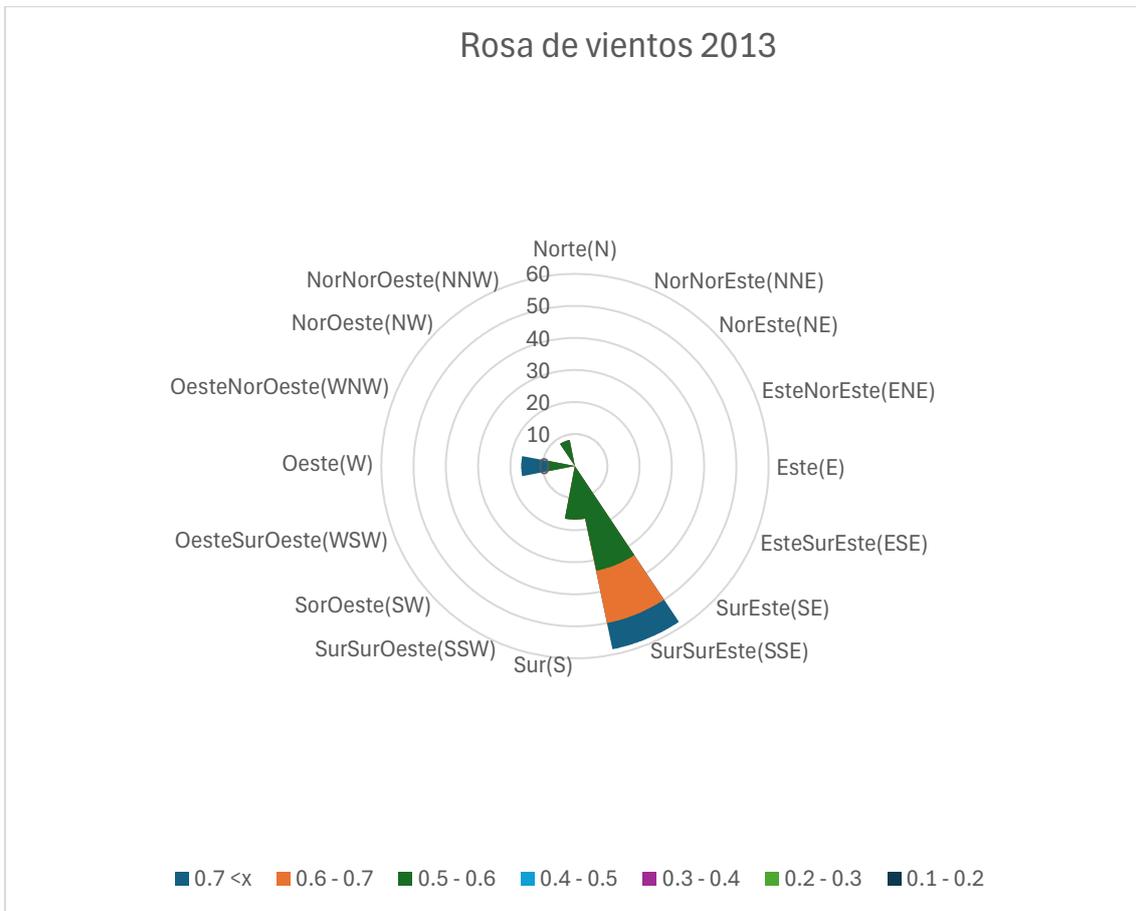
*Nota:* Elaboración propia

### **Interpretación de la tabla N° 20:**

En 2013, la dirección predominante del viento fue Sur-Sureste (SSE), presente en 7 meses del año, lo que indica un claro dominio de este flujo. Le siguen el Sur (S) y el Oeste (W), cada uno con 2 ocurrencias, y una sola aparición del Nornoroeste (NNW). Esta distribución muestra una tendencia marcada hacia vientos provenientes del sur, lo que refleja la influencia de la topografía local y los patrones climáticos regionales.

**Figura 18**

*Rosa de Viento para el Año 2013*



**Nota:** Elaboración propia

**Interpretación de la figura N° 19:**

La rosa de vientos del año 2013 muestra una clara predominancia de vientos desde el Sur-Sureste (SSE), presente en 7 de los 12 meses del año. También se observan direcciones desde el Sur (S) en 2 meses y desde el Oeste (W) en 2 meses, con una aparición aislada del Nornoroeste (NNW). Este patrón indica una circulación dominante desde el sector sur, influenciada probablemente por la topografía y condiciones climáticas regionales. La información es clave para orientar sistemas eólicos y optimizar su rendimiento en función de la dirección predominante.

**Tabla 19***Dirección del Viento para el Año 2014*

Año	Mes	Dirección
2014	Enero	SSE
2014	Febrero	SSE
2014	Marzo	SSE
2014	Abril	SSE
2014	Mayo	SSE
2014	Junio	SSE
2014	Julio	SSE
2014	Agosto	W
2014	Setiembre	W
2014	Octubre	W
2014	Noviembre	W
2014	Diciembre	SSE

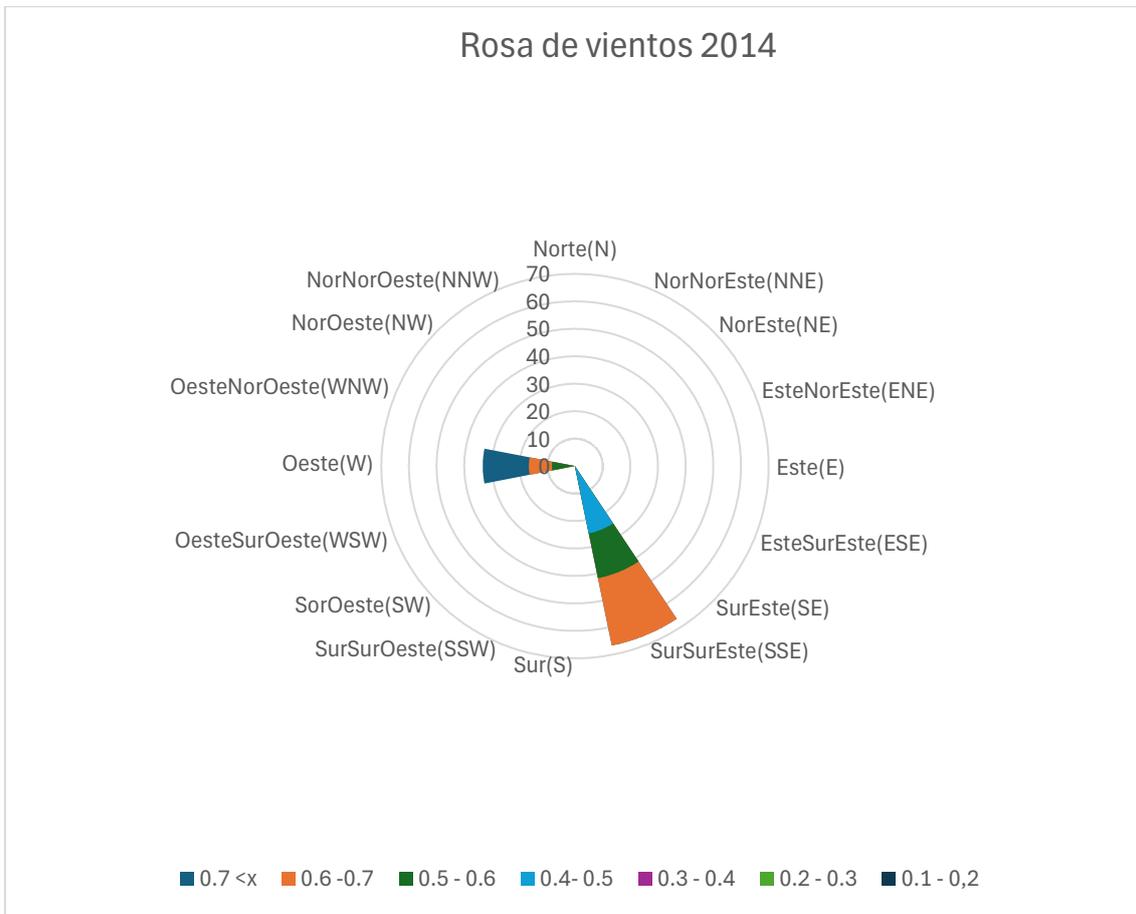
Nota: Elaboración propia

**Interpretación de la tabla N° 21:**

Durante el año 2014, la dirección del viento fue mayormente Sur-Sureste (SSE), presente en 8 de los 12 meses del año. El Oeste (W) se registró solo en 4 meses (de agosto a noviembre). Esta tabla refleja una marcada predominancia del flujo de aire desde el SSE, lo cual sugiere una circulación estable posiblemente asociada a condiciones geográficas y climáticas persistentes durante gran parte del año.

## Figura 19

### Rosa de Viento para el Año 2014



**Nota:** Elaboración propia

### Interpretación de la figura N° 20:

La rosa de vientos de 2014 evidencia una fuerte concentración de vientos provenientes del Sur-Sureste (SSE), representando dos tercios del año. En menor proporción, aparecen vientos del Oeste (W). Esta distribución indica un patrón de viento muy definido, con dirección dominante desde el SSE, lo que es relevante para el diseño y orientación de tecnologías eólicas, así como para el análisis de la dinámica atmosférica local.

**Tabla 20***Dirección del Viento para el Año 2015*

Año	Mes	Dirección
2015	Enero	SSE
2015	Febrero	SSE
2015	Marzo	W
2015	Abril	W
2015	Mayo	SSE
2015	Junio	W
2015	julio	SSE
2015	Agosto	W
2015	Setiembre	W
2015	Octubre	W
2015	Noviembre	SSE
2015	Diciembre	SSE

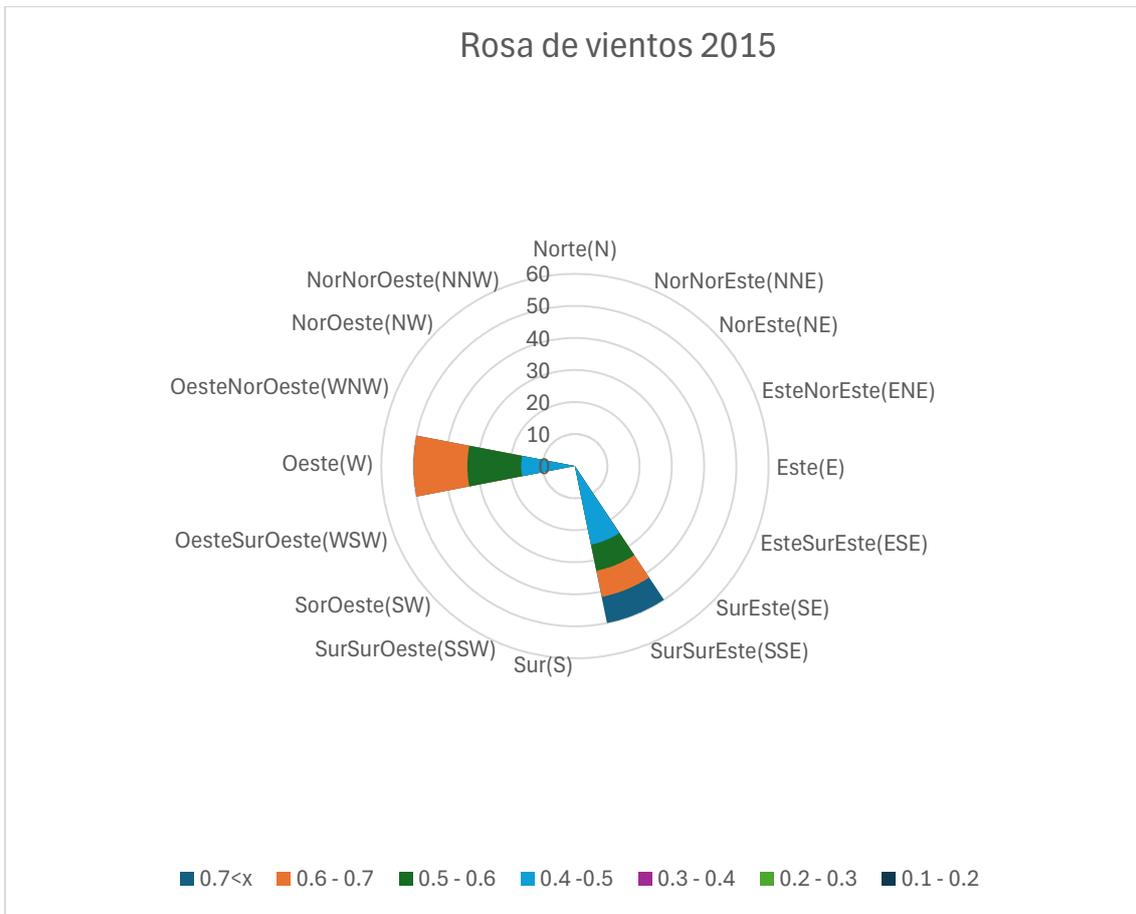
*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la tabla N° 22:**

En el año 2015, se observa una distribución equilibrada entre los vientos provenientes del Sur-Sureste (SSE) y del Oeste (W). El SSE se presentó en 6 meses del año, mientras que el W en los otros 6 meses. Esta alternancia sugiere una circulación del viento, posiblemente vinculada a los cambios estacionales, donde cada dirección predomina en diferentes épocas del año.

**Figura 20**

*Rosa de Viento para el Año 2015*



**Nota:** Elaboración propia

**Interpretación de la figura N° 21:**

La rosa de vientos de 2015 refleja que el viento viene en dos direcciones, con igual frecuencia de vientos desde el Sur-Sureste (SSE) y el Oeste (W). Este comportamiento indica la coexistencia de dos regímenes de viento a lo largo del año, influenciados por la topografía local y la variabilidad climática estacional. Esta información es clave para considerar en estudios de potencial eólico y planificación de sistemas de captación.

**Tabla 21***Dirección del Viento para el Año 2016*

Año	Mes	Dirección
2016	Enero	W
2016	Febrero	SSE
2016	Marzo	W
2016	Abril	SSE
2016	Mayo	W
2016	Junio	SSE
2016	Julio	W
2016	Agosto	W
2016	Setiembre	W
2016	Octubre	W
2016	Noviembre	W
2016	Diciembre	W

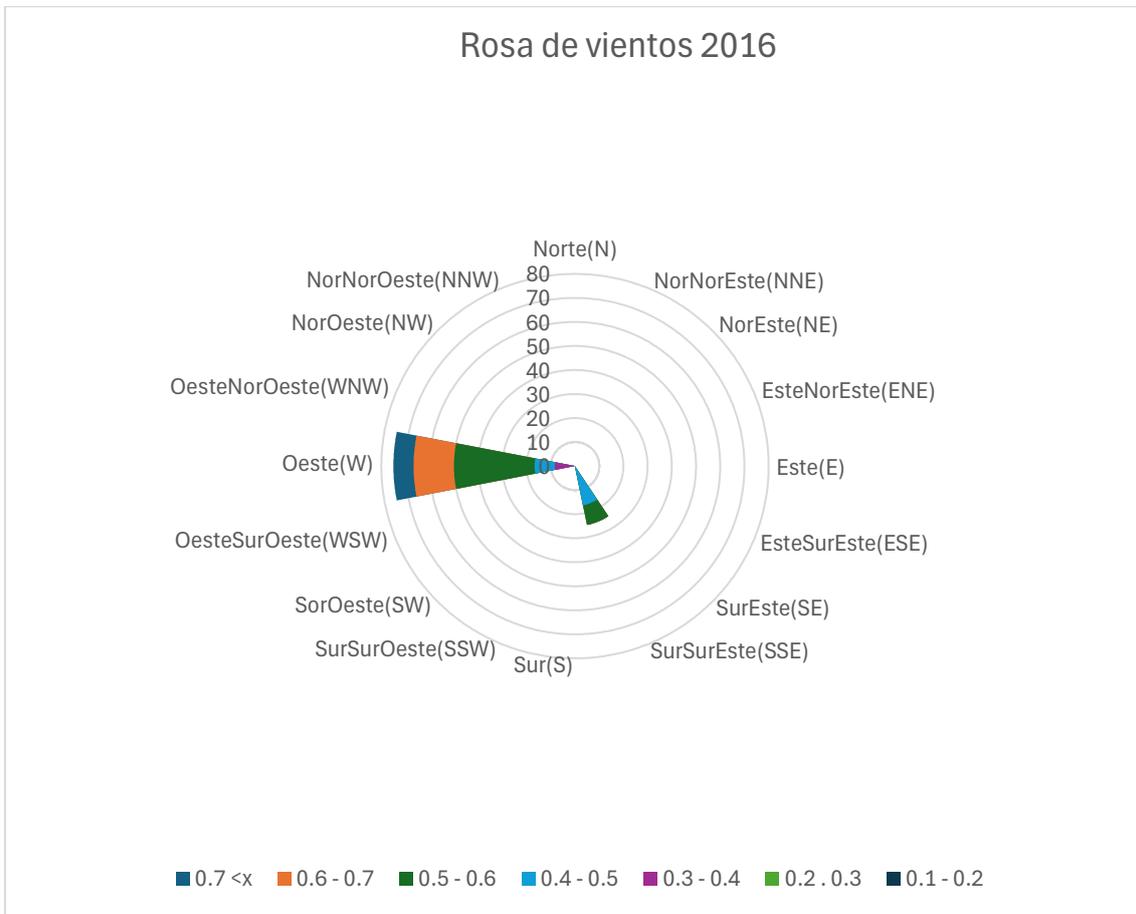
*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la tabla N° 22:**

Durante el año 2016, se observa un claro predominio del viento proveniente del Oeste (W), registrado en 8 de los 12 meses. El Sur-Sureste (SSE) aparece en los otros 4 meses. Esta tabla refleja una tendencia marcada hacia el flujo del oeste, especialmente en el segundo semestre del año, lo que podría asociarse a condiciones más secas o de estabilidad atmosférica.

**Figura 21**

*Rosa de Viento para el Año 2016*



**Nota:** Elaboración propia

**Interpretación de la figura N° 22:**

La rosa de vientos de 2016 muestra una distribución unimodal, con predominancia del viento del Oeste (W), que representa más de dos tercios del año. El SSE aparece con menor frecuencia y se concentra en los primeros meses. Este patrón indica una dirección dominante bien definida, lo que facilita la toma de decisiones para el aprovechamiento del recurso eólico en cuanto a la orientación de sistemas de captación

**Tabla 22***Dirección del Viento para el Año 2017*

Año	Mes	Dirección
2017	Enero	W
2017	Febrero	SSE
2017	Marzo	W
2017	Abril	W
2017	Mayo	SSE
2017	Junio	W
2017	Julio	W
2017	Agosto	SSE
2017	Setiembre	W
2017	Octubre	W
2017	Noviembre	W
2017	Diciembre	W

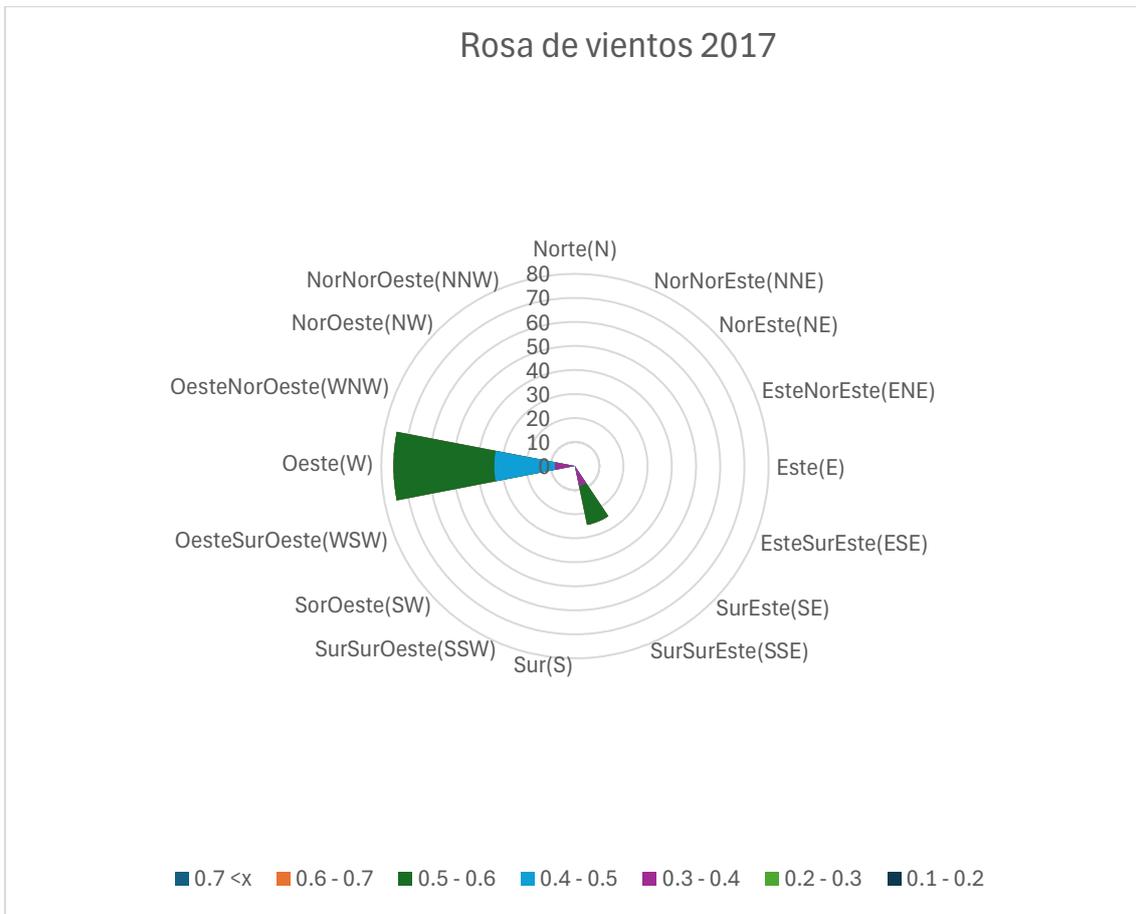
*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la tabla N°24:**

En el año 2017, la dirección predominante del viento fue el Oeste (W), presente en al menos 8 meses del año. El Sur-Sureste (SSE) se registró en 3 meses. La tendencia muestra un claro dominio del viento occidental, especialmente en el segundo semestre. La tabla refleja un patrón de circulación estable desde el oeste, con algunas variaciones asociadas a cambios estacionales.

**Figura 22**

*Rosa de Viento para el Año 2017*



**Nota:** Elaboración propia

**Interpretación de la Figura N°23:**

La rosa de vientos de 2017 presenta un patrón unimodal, con fuerte predominancia de vientos provenientes del Oeste (W). El SSE aparece de forma esporádica, concentrado en el primer semestre. Este comportamiento confirma una dirección dominante del viento, lo que es clave para el análisis del potencial eólico y la orientación de sistemas de captación.

**Tabla 23***Dirección del Viento para el Año 2018*

Año	Mes	Dirección
2018	Enero	SSE
2018	Febrero	NW
2018	Marzo	NW
2018	Abril	W
2018	Mayo	SSE
2018	Junio	SSE
2018	Julio	W
2018	Agosto	SSE
2018	Setiembre	W
2018	Octubre	NW
2018	Noviembre	NW
2018	Diciembre	W

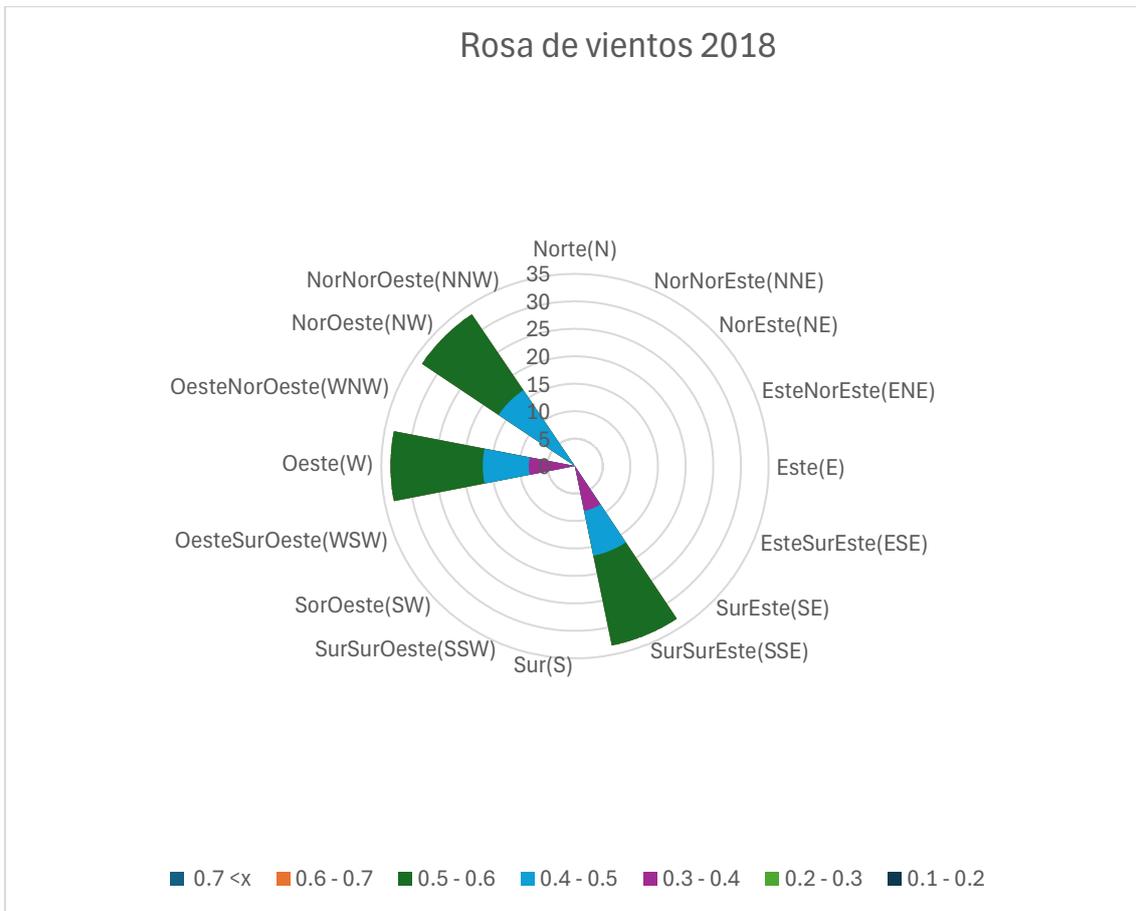
*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la tabla N°25:**

En 2018, se observa una mayor variabilidad en las direcciones del viento. Las direcciones más frecuentes fueron Sur-Sureste (SSE) con 4 meses y Noroeste (NW) con 4 meses también, seguidas por el Oeste (W) en 4 meses. Esta distribución más equitativa entre tres direcciones principales indica un año con comportamiento eólico menos uniforme, posiblemente influenciado por transiciones climáticas más marcadas.

**Figura 23**

*Rosa de Viento para el 1 Año 2018*



*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la figura N° 24:**

La rosa de vientos de 2018 muestra una distribución multimodal, con tres direcciones relevantes: SSE, NW y W, cada una con igual frecuencia. Este patrón indica una mayor variabilidad en la circulación del viento, lo que puede reflejar transiciones estacionales más dinámicas o perturbaciones atmosféricas locales. Esta diversidad direccional debe tenerse en cuenta al planificar el aprovechamiento energético del viento, ya que requiere mayor flexibilidad en el diseño de los sistemas.

**Tabla 24***Dirección del Viento para el Año 2019*

Año	Mes	Dirección
2019	Enero	ENE
2019	Febrero	SW
2019	Marzo	E
2019	Abril	NW
2019	Mayo	NW
2019	Junio	NW
2019	Julio	SW
2019	Agosto	E
2019	Setiembre	E
2019	Octubre	NW
2019	Noviembre	SW
2019	Diciembre	SW

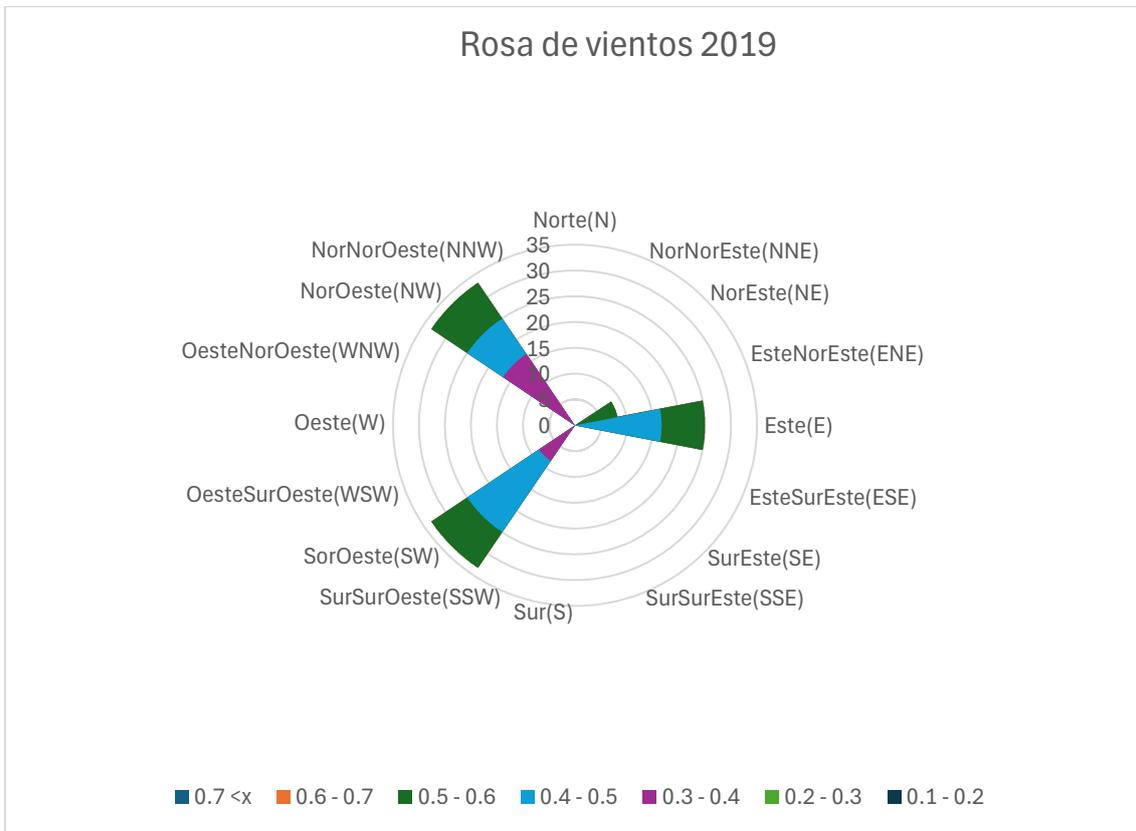
*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la tabla N°26:**

En 2019, las direcciones del viento mostraron una notable variabilidad, con predominancia del Noroeste (NW) en 4 meses y del Suroeste (SW) en otros 4. Le siguen el Este (E) en 3 meses y el Este-Noreste (ENE) en un solo mes. Esta distribución refleja un comportamiento eólico disperso, posiblemente asociado a condiciones atmosféricas inestables o cambios regionales en los patrones de circulación.

## Figura 24

Rosa de Viento para el Año 2019



**Nota:** Elaboración propia

### Interpretación de la figura N°25:

La rosa de vientos de 2019 muestra un patrón multimodal, con mayor frecuencia de vientos provenientes del Noroeste (NW) y Suroeste (SW), seguidos por el Este (E). Esta distribución sugiere una circulación variable sin una dirección dominante clara, lo que puede representar un reto para el diseño óptimo de sistemas eólicos, ya que exige considerar mayor rango direccional para su captación eficiente.

**Tabla 25***Dirección del Viento para el Año 2022*

Año	Mes	Dirección
2022	Enero	SE
2022	Febrero	W
2022	Marzo	W
2022	Abril	SW
2022	Mayo	S
2022	Junio	SE
2022	Julio	SW
2022	Agosto	SE
2022	Setiembre	E
2022	Octubre	E
2022	Noviembre	E
2022	Diciembre	NNE

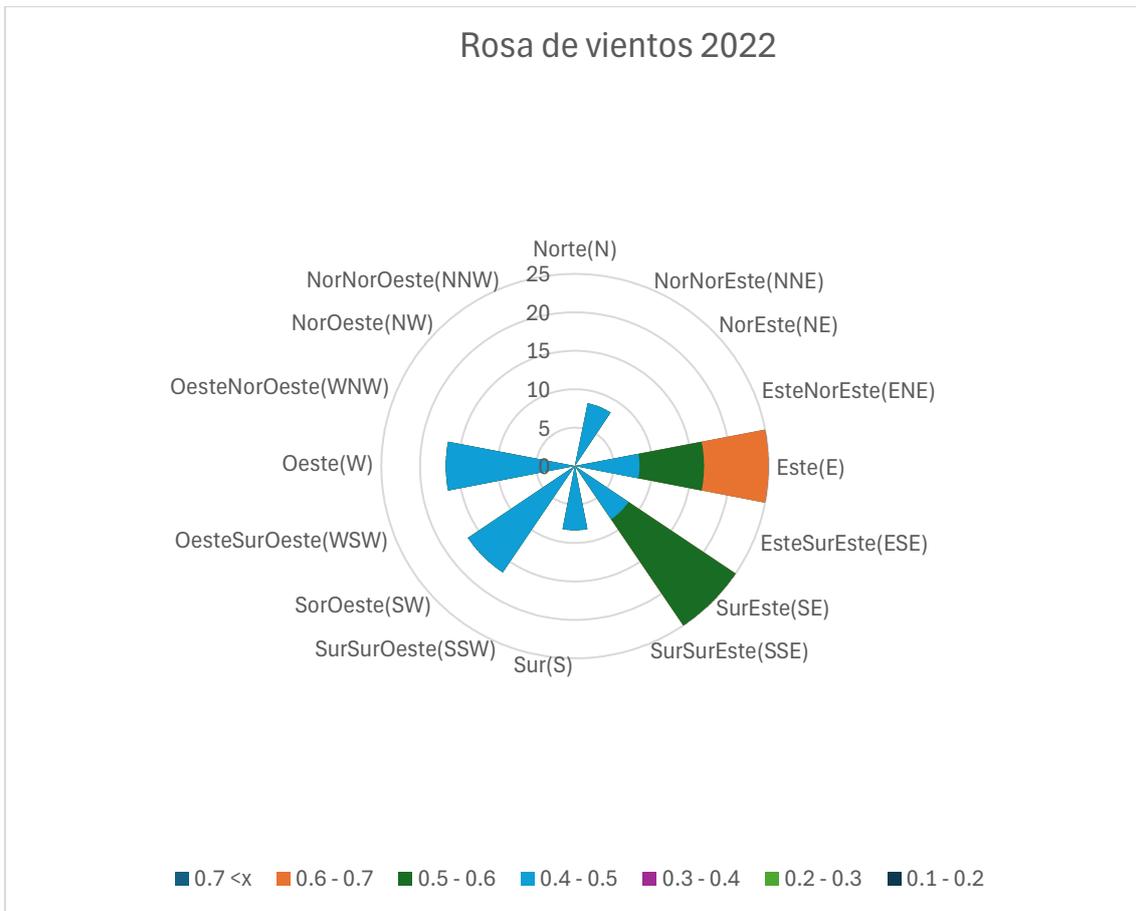
*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la tabla N°27:**

En 2022, el viento mostró una distribución moderadamente variada. Las direcciones más frecuentes fueron Sureste (SE) con 3 apariciones, seguida de Oeste (W), Suroeste (SW) y Este (E) con 2 cada una. También se registraron direcciones puntuales como Sur (S) y Nornoreste (NNE). Esta distribución sugiere una ligera predominancia de vientos del cuadrante suroriental, con una transición hacia otras direcciones en distintos meses del año.

**Figura 25**

*Rosa de Viento para el Año 2022*



*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la figura N°26:**

La rosa de vientos de 2022 presenta un patrón multimodal, con mayor concentración de vientos del Sureste (SE), seguidos por Oeste (W), Suroeste (SW) y Este (E). Este comportamiento indica una circulación del viento sin un eje dominante claro, pero con tendencia hacia sectores del sur y este. Este tipo de distribución debe ser considerado al planificar sistemas eólicos, ya que requiere flexibilidad en su orientación y diseño.

**Tabla 26***Dirección del Viento para el Año 2023*

Año	Mes	Dirección
2023	Enero	WSW
2023	Febrero	W
2023	Marzo	S
2023	Abril	NNE
2023	Mayo	WSW
2023	Junio	SSE
2023	Julio	W
2023	Agosto	W
2023	Setiembre	W
2023	Octubre	W
2023	Noviembre	W
2023	Diciembre	W

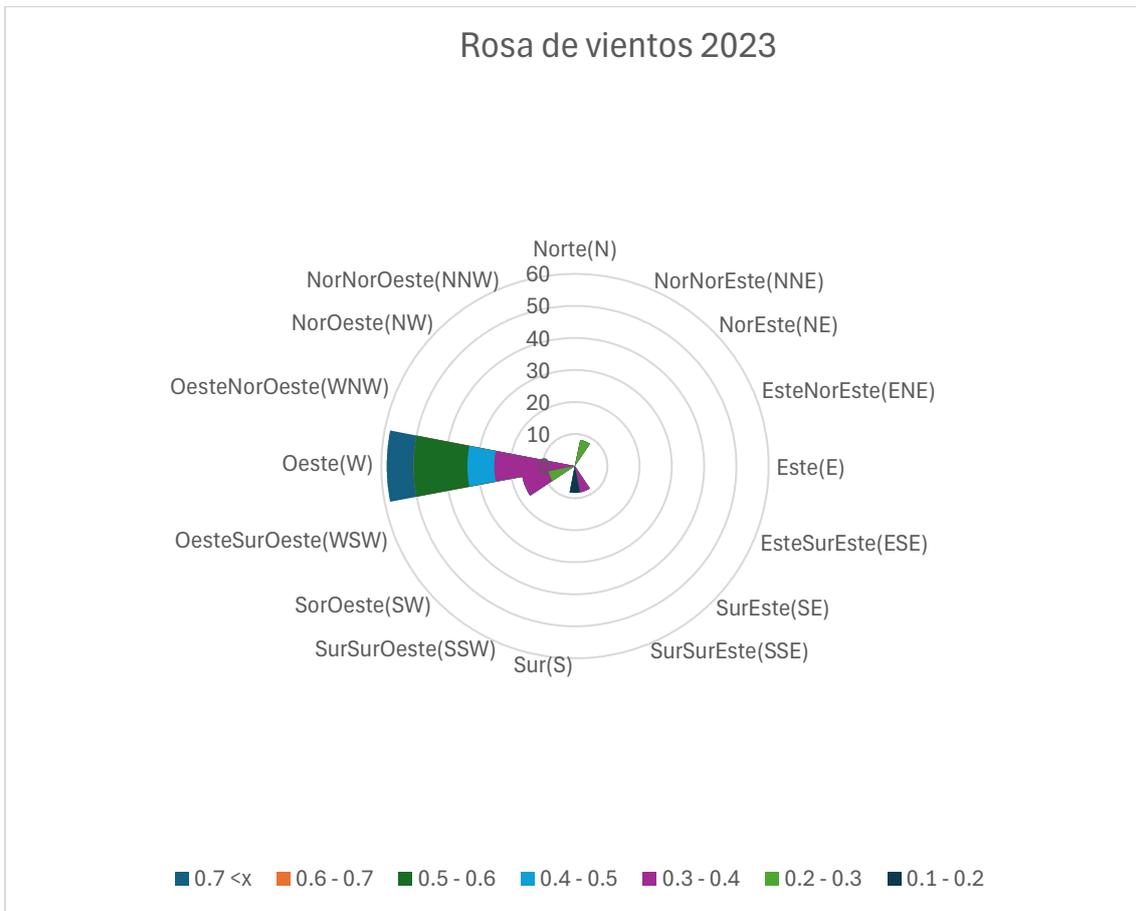
*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la tabla N°28:**

Durante el año 2023, la dirección predominante del viento fue el Oeste (W), registrado en 6 meses consecutivos (de julio a diciembre) y también en febrero. Le siguen el Oeste-Suroeste (WSW) con 2 apariciones, y direcciones puntuales como Sur (S), Sur-Sureste (SSE) y Nornoreste (NNE). Este patrón refleja un claro dominio del flujo desde el oeste, especialmente en la segunda mitad del año.

**Figura 26**

*Rosa de Viento para el Año 2023*



*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la figura N°27:**

La rosa de vientos de 2023 muestra un patrón unimodal, con fuerte predominancia del viento desde el Oeste (W), que representa más de la mitad del año. Las direcciones secundarias como WSW, S y SSE aparecen de forma esporádica, mientras que el NNE representa un caso aislado. Esta concentración en el cuadrante occidental indica un comportamiento eólico constante, ideal para orientar sistemas de captación hacia ese sector.

## Tabla 27

### Tabla de Conversión para la Rosa de Viento

Tabla de conversión	
Puntos cardiales	Grados
N	0
NNE	22.5
NE	45
ENE	77.5
E	90
ESE	112.5
SE	135
SSE	157.2
S	180
SSW	202.5
SW	225
WSW	274.5
W	270
WNW	292.5
NW	315
NNW	337.5

*Nota:* Elaboración propia

#### Interpretación de la tabla N°29:

La tabla de conversión de direcciones del viento a grados permite transformar los puntos cardinales (como N, SE, W) en valores numéricos expresados en grados. Esta conversión es fundamental para representar gráficamente la rosa de vientos, realizar análisis estadísticos, cálculos técnicos y trabajar con programas como Excel, software de simulación o sistemas de información geográfica (GIS). Al convertir las direcciones en ángulos, se logra una representación más precisa y útil del comportamiento del viento.

**Tabla 28***Categorización de las Velocidades del Viento*

<b>Velocidad</b>			
<b>LI</b>	<b>LS</b>	<b>recategorizar</b>	<b>Clases</b>
0.1	0.2		1 0.1-0.2
0.2	0.3		2 0.2-0.3
0.3	0.4		3 0.3-0.4
0.4	0.5		4 0.4-0.5
0.5	0.6		5 0.5-0.6
0.6	0.7		6 0.6-0.7
0.7	x		7 0.7 < x

*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la tabla N° 30:**

La tabla de recategorización de velocidades del viento permite clasificar los datos en intervalos definidos, facilitando su análisis e interpretación. Al agrupar las velocidades en rangos (por ejemplo, de 0.1 a 0.2 m/s, de 0.2 a 0.3 m/s, etc.), se asigna a cada clase un valor numérico que simplifica la elaboración de gráficos, frecuencias y análisis estadísticos. Esta recategorización es especialmente útil para construir histogramas, curvas de frecuencia o representar la distribución de velocidades en análisis como la modelación de Weibull, permitiendo una mejor comprensión del comportamiento del viento en la zona de estudio.

**Tabla 29***Frecuencia de las Velocidades*

Cuenta de años	Velocidades							Total, general
Direcciones	1	2	3	4	5	6	7	
N								0
NNE		1		1				2
NE								0
ENE					1			1
E				3	2	1		6
ESE								0
SE				1	2			3
SSE			3	9	12	9	4	37
S	1			1	2	1		5
SSW								0
SW			1	4	1			6
WSW		1	1					2
W			6	10	17	7	8	48
WNW								1
NW			2	1	3			6
NNW					1	1		2
								120

*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la tabla N° 31:**

La tabla de frecuencias cruzadas entre dirección del viento y clases de velocidad muestra cuántas veces se registraron rangos específicos de velocidad (de 0.1 m/s a más de 0.7 m/s) en cada dirección cardinal. Este tipo de análisis es esencial para construir rosas de vientos ponderadas y conocer la dinámica real del recurso eólico. En este caso, se observa que la dirección predominante es W (Oeste), con un total de 48 registros, seguida de SSE (Sur-Sureste) con 37 registros. Además, las velocidades más frecuentes se concentran entre 0.4 y 0.6 m/s, lo que indica un régimen de viento de baja a moderada intensidad. Esta información es crucial para identificar las direcciones más productivas

para generación eólica, evaluar el potencial energético y entender la variabilidad del viento en la zona de estudio.

**Tabla 30**

*Dirección del Viento Durante el Periodo 2012 - 2023*

Años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
2012	SSE	SSE	W	SSE	W	S	SSE	W	W	W	SSE	NNW
2013	SSE	NNW	SSE	S	S	SSE	SSE	W	W	SSE	SSE	SSE
2014	SSE	W	W	W	W	SSE						
2015	SSE	SSE	W	W	SSE	W	SSE	W	W	W	SSE	SSE
2016	W	SSE	W	SSE	W	SSE	W	W	W	W	W	W
2017	W	SSE	W	W	SSE	W	W	SSE	W	W	W	W
2018	SSE	NW	NW	W	SSE	SSE	W	SSE	W	NW	NW	W
2019	ENE	SW	E	NW	NW	NW	SW	E	E	NW	SW	SW
2022	SE	W	W	SW	S	SE	SW	SE	E	E	E	NNE
2023	WSW	W	S	NNE	WSW	SSE	W	W	W	W	W	W

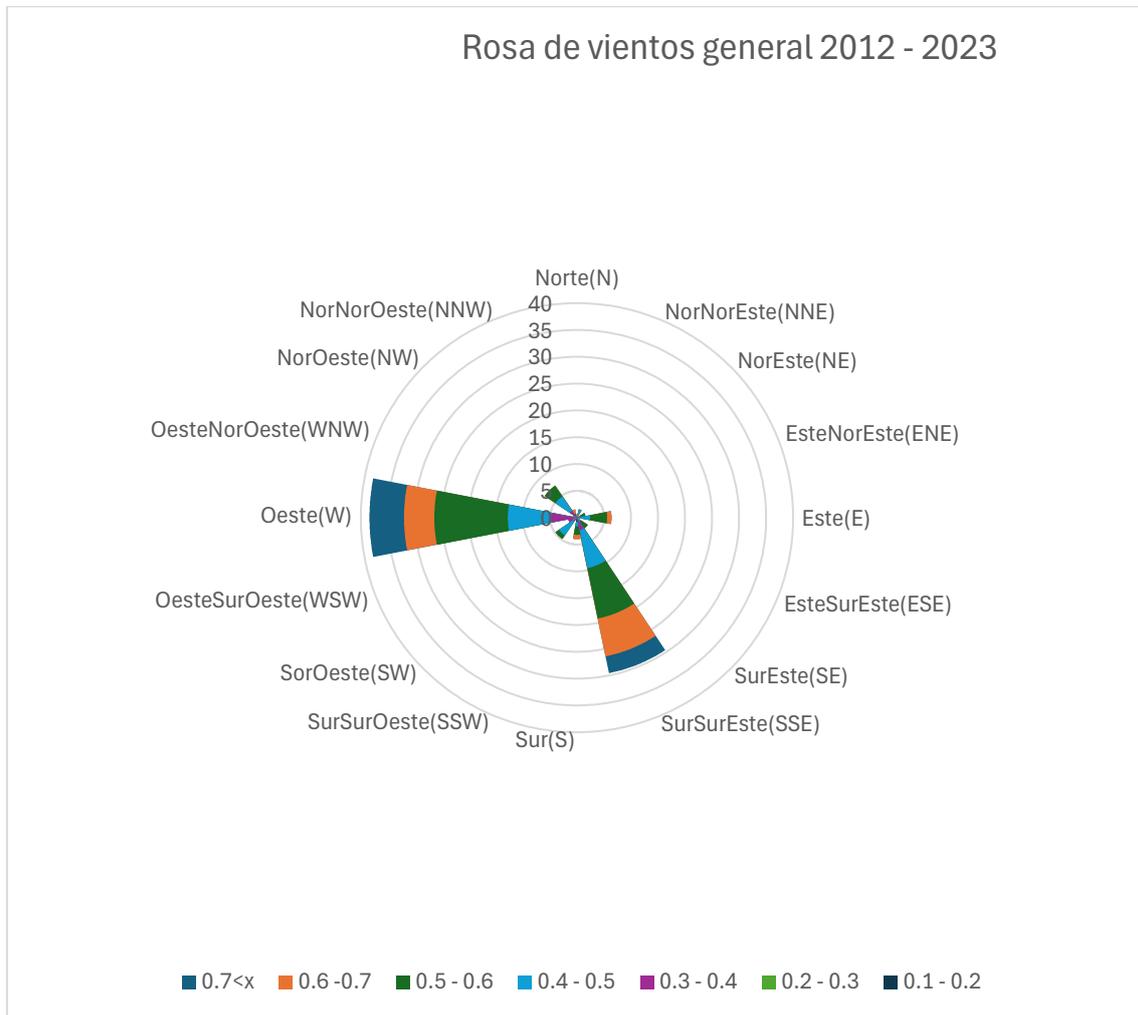
*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la tabla N° 32:**

La tabla muestra la distribución mensual de las direcciones predominantes del viento desde el año 2012 hasta el 2023. Su utilidad principal radica en identificar patrones estacionales y variaciones interanuales en el comportamiento direccional del viento. Se observa que la dirección SSE (Sur-Sureste) predomina en los primeros años (2012–2015), especialmente entre enero y julio, mientras que a partir del 2016 se incrementa notablemente la presencia del viento proveniente del Oeste (W), en especial en los meses de invierno y primavera. En años más recientes como 2019, 2022 y 2023, la dirección del viento muestra una mayor diversificación con registros provenientes del Noroeste (NW), Suroeste (SW), Este (E) y Noreste (NNE) lo que evidencia una posible transición hacia un régimen multidireccional o bimodal. Esta tabla es clave para analizar la estacionalidad del recurso eólico y orientar estudios sobre su variabilidad temporal en la zona de estudio.

**Figura 27**

*Rosa de Vientos para el Periodo 2012 - 2023*



**Nota:** Elaboración propia

**Interpretación de la figura N° 28:**

La rosa de vientos del periodo 2012–2023 permite visualizar de forma integrada las direcciones predominantes del viento a lo largo de los años, facilitando la comprensión del comportamiento eólico en la zona de estudio. El análisis muestra que la dirección Oeste (W) es la más frecuente, seguida por la Sur-Sureste (SSE), lo que indica un patrón bimodal, es decir, con dos direcciones dominantes claramente definidas. Este comportamiento sugiere que los flujos de aire en la región están influenciados por factores

topográficos y estacionales que canalizan el viento principalmente desde el oeste y el sureste. Además, se observan otras direcciones con menor frecuencia, como Noroeste (NW), Suroeste (SW), Este (E) y Nornoreste (NNE), que reflejan la variabilidad interanual del viento. Esta información es esencial para el diseño, orientación y eficiencia de sistemas eólicos en el lugar.

### 5.5 Modelar la Variabilidad del Viento Utilizando la Distribución de Weibull

La distribución de Weibull es ampliamente utilizada en el análisis del recurso eólico debido a su capacidad para modelar la variabilidad de la velocidad del viento mediante parámetros estadísticos. En este estudio, se emplea la velocidad promedio anual y la desviación estándar correspondiente a cada año, lo que permite analizar cómo varía la distribución de Weibull a lo largo del tiempo. Para ello, se aplicaron las ecuaciones (16) y (17), que permiten estimar los parámetros de forma (k) y de escala (c) de la distribución.

$$k = \left(\frac{\bar{v}}{\sigma}\right)^{-1.086}$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\gamma \left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

**Tabla 31**

*Parámetros de Weibull Anuales para el Periodo 2012- 2023*

años	$\bar{v}$	$\sigma$	k	c
2012	0.667	0.089	8.32	0.667
2013	0.550	0.078	5.99	0.621
2014	0.542	0.108	3.78	0.604
2015	0.500	0.104	3.34	0.555
2016	0.542	0.108	3.78	0.604
2017	0.442	0.079	4.48	0.488
2018	0.433	0.246	1.79	0.475
2019	0.408	0.079	3.98	0.455
2022	0.442	0.067	6.34	0.499
2023	0.342	0.162	2.02	0.379

**Nota:** Elaboración propia

### Interpretación de la tabla N° 31:

Del 2012 al 2023 se observa una disminución sostenida en la velocidad media del viento y en el parámetro de escala  $c$ , junto con un aumento de la variabilidad en años específicos como 2018 y 2023. Los valores altos del parámetro de forma  $k$  en 2012, 2013 y 2022 indican vientos más estables y predecibles, mientras que los valores bajos en 2018 y 2023 reflejan mayor inestabilidad. En conjunto, 2012 fue el año con mayor regularidad y 2023 el más desfavorable, posiblemente por influencia de factores climáticos y urbanísticos.

### Estructura de la tabla de frecuencias de velocidades para la Distribución de Weibull:

- La velocidad ( $\bar{v}$ ) se tiene los intervalos que esta: 0,1 a 0,9 m/s
- La frecuencia ( $f$ ) absoluta de ocurrencia
- La frecuencia relativa  $f_r = \frac{f}{N}$

Donde  $N=120$

- Frecuencia acumulada es:  $F(v) = \sum f_r$
- Función de distribución acumulada  $F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$  linealización de Weibull

Despejamos el termino exponencial tendríamos:

$$1 - F(v) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Aplicamos logaritmo natural dos veces

$$\ln(-\ln(1 - F(v))) = k \ln(v) - k \ln(c)$$

la ecuación linealizada es:

$$y = kX - k \ln(c)$$

Esta ecuación lineal de tipo:  $y = mx + b$

Donde:

$$Y = \ln(-\ln(1 - F(v)))$$

$$X = \ln(v)$$

La pendiente  $m=k$

Intercepto  $b = -k \ln(c)$

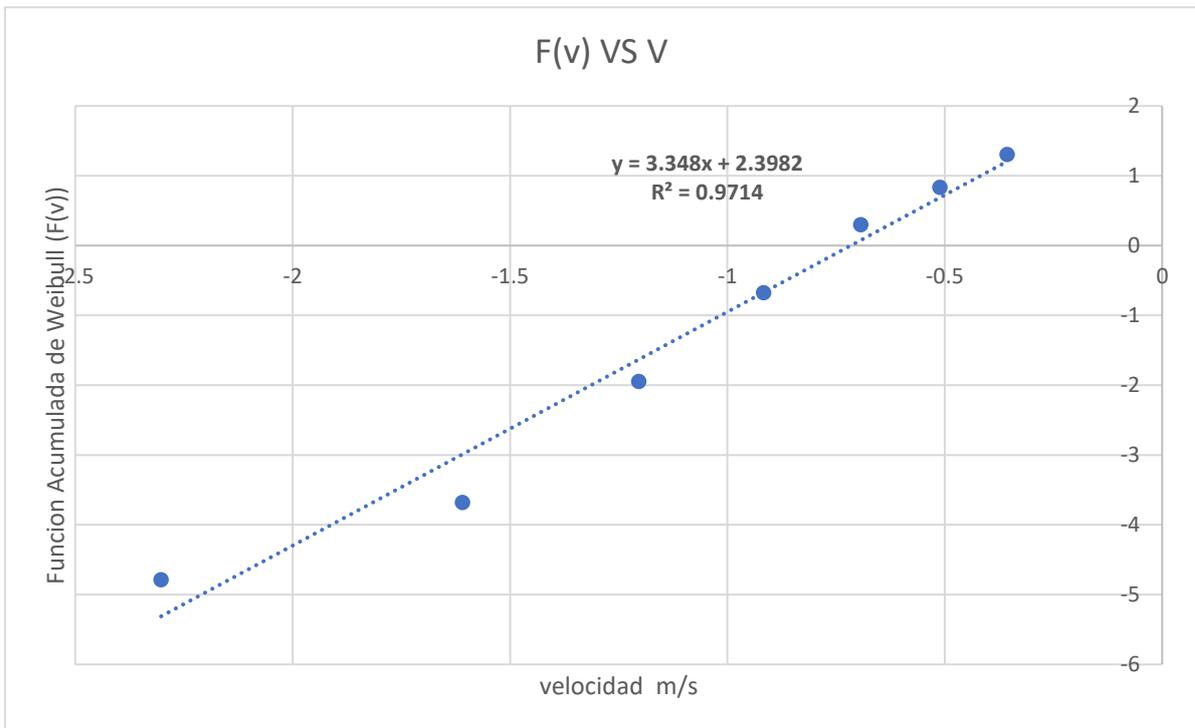
Se graficará  $Y$  vs  $X$ , la pendiente será  $k$  y la ordenada del origen será  $-k \ln(c)$  de donde se puede despejar  $c$  tenemos:

$$c = e^{-b/k}$$

Se puede observar en figura N°28

**Figura 28**

*Método Grafico de la Distribución de Weibull*



Nota: Elaboración propia

### **Interpretación de la figura N°28**

La ecuación de la recta  $Y = 3,348 X + 2,3982$  corresponde al ajuste lineal utilizado para estimar los parámetros de la distribución de Weibull. El valor de la pendiente,  $k=3.348$  representa el parámetro de forma e indica que las velocidades del viento están poco dispersas y concentradas en torno a un valor medio. El intercepto, al relacionarse con, permite obtener el parámetro de escala  $c=0,4886$  m/s, que representa la velocidad característica del viento en la zona.

**Tabla 32***Tabla de Frecuencia de Velocidades para la Distribución de Weibull*

Velocidad (m/s)	frecuencias	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	K	C(m/s)
0.1	1	1	0.0083	0.0083	3.348	0.4886
0.2	2	3	0.0167	0.0250	3.348	0.4886
0.3	13	16	0.1083	0.1333	3.348	0.4886
0.4	32	48	0.2667	0.4000	3.348	0.4886
0.5	41	89	0.3417	0.7417	3.348	0.4886
0.6	19	108	0.1583	0.9000	3.348	0.4886
0.7	9	117	0.0750	0.9750	3.348	0.4886
0.8	3	120	0.0250	1.0000	3.348	0.4886
0.9	0	120	0	1.0000	3.348	0.4886

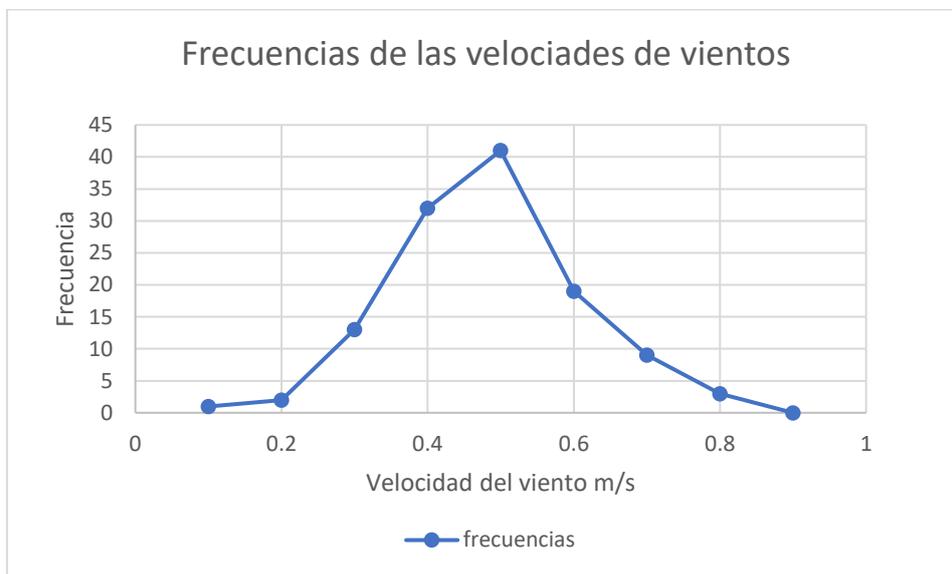
*Nota:* Elaboración propia**Interpretación de la tabla N° 32:**

La tabla de frecuencias muestra la distribución de las velocidades del viento medidas en el observatorio durante el periodo analizado. Se observa que la mayor parte de las observaciones se concentran entre 0.3 m/s y 0.6 m/s, destacando particularmente la clase de 0.5 m/s, que representa el 34.17 % del total de mediciones, seguida por la clase de 0.4 m/s con un 26.67 %. Esto indica que el viento en la zona tiene una velocidad baja a moderada la mayor parte del tiempo. Las clases más altas (0.7 m/s y 0.8 m/s) disminuyen considerablemente en frecuencia, mientras que no se registran velocidades en 0.9 m/s, lo cual refuerza el predominio de vientos suaves. Desde el punto de vista físico, esta distribución indica que el recurso eólico disponible en la zona es limitado, con una baja energía cinética asociada al viento, ya que la energía del viento es proporcional al cubo de la velocidad ( $E \propto v^3$ ). Así, aunque existan vientos constantes, su baja velocidad reduce la posibilidad de generación eficiente de energía eólica sin tecnologías adaptadas a entornos de baja velocidad. Por otro lado, los valores constantes de los parámetros

$k=3,348$  y  $c = 0,4886$  corresponden a los parámetros de la distribución de Weibull, lo que permite modelar estadísticamente la viabilidad del viento en el lugar. Un valor de  $k > 3$  indica una distribución concentrada, lo que significa que las velocidades varían poco alrededor del valor promedio, confirmando una estabilidad en el régimen eólico del sitio de estudio.

### Figura 29

*Grafica de la Frecuencia de las Velocidades de Vientos*



**Nota:** Elaboración propia

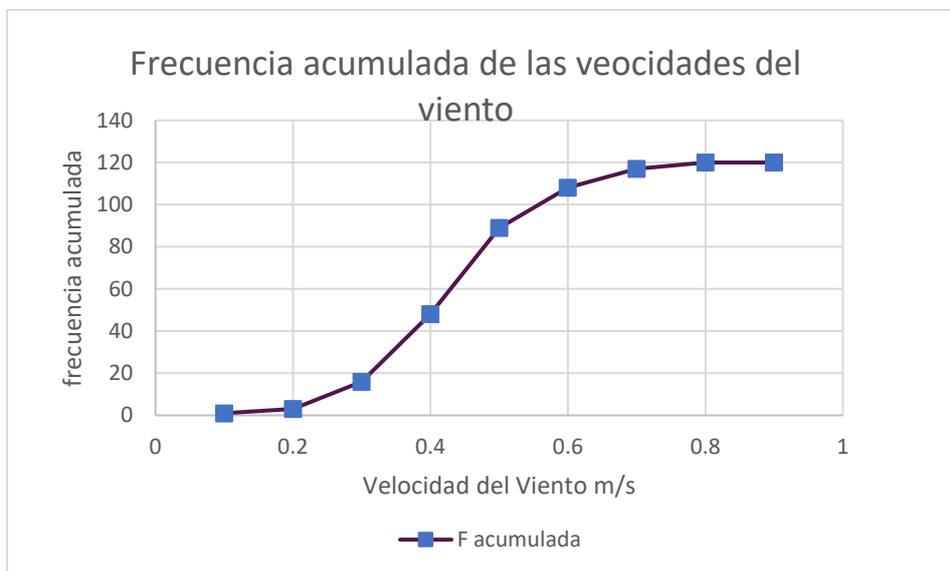
### Interpretación de la figura N° 29:

La figura muestra la distribución de frecuencias de las velocidades del viento registradas en el observatorio durante el periodo de estudio. Se observa una forma asimétrica con un claro pico máximo en 0.5 m/s, donde se alcanza la mayor frecuencia con 41 registros. A partir de esta velocidad, la frecuencia disminuye progresivamente, lo que indica que las velocidades más altas son menos comunes. Esta forma sugiere una distribución concentrada hacia velocidades bajas y moderadas, lo cual es típico en zonas urbanas o semiurbanas con obstáculos que reducen la velocidad del viento.

Físicamente, esta distribución confirma que el recurso eólico en la zona es débil, predominando vientos con baja energía cinética, lo cual limita el potencial para aplicaciones de generación eólica convencional. No obstante, esta información es útil para el diseño de sistemas adaptados a bajas velocidades (por ejemplo, microturbinas de arranque a baja velocidad), así como para comprender la dinámica local del viento y su impacto en aspectos ambientales y de ventilación urbana.

### Figura 30

#### *Frecuencia Acumulada de las Velocidades del Viento*



*Nota:* Elaboración propia

#### **Interpretación de la figura N° 30:**

La figura muestra la frecuencia acumulada de las velocidades del viento registradas en un intervalo comprendido entre 0 y 1 m/s. Se observa que la mayor parte de las observaciones se concentra entre 0.3 m/s y 0.6 m/s, ya que en ese rango la curva presenta un ascenso pronunciado. A partir de 0.7 m/s, la curva se estabiliza, lo que indica que las velocidades superiores a este valor son poco frecuentes o prácticamente inexistentes. Desde un enfoque físico, esta tendencia sugiere que el régimen eólico en la zona de estudio durante el periodo analizado se caracteriza por vientos

predominantemente suaves, lo cual podría deberse a la presencia de obstáculos como edificaciones, vegetación o a condiciones climáticas particulares que limitan el desarrollo de vientos más intensos. En conjunto, esta información es relevante para la caracterización del recurso eólico, ya que permite inferir la disponibilidad y constancia del viento en el sitio analizado

**Tabla 33**

*Valores para la Distribución de Weibull*

$\bar{v}$	f	fr. acumulada	fr. relativa	fr. relativa acumulada	$X=\ln\bar{v}$	$Y=\ln(\ln(1/1-fa))$	k	c	distribución de Weibull	Weibull acumulado
0.1	1	1	0.00833	0.0083	-2.30259	-4.78331	3.348	0.4817	0.2277	0.0029
0.2	2	3	0.01667	0.0250	-1.60944	-3.67625	3.348	0.4817	0.8803	0.0646
0.3	13	16	0.10833	0.1333	-1.20397	-1.94421	3.348	0.4817	1.6064	0.3623
0.4	32	48	0.26667	0.4000	-0.91629	-0.67173	3.348	0.4817	2.3883	0.7682
0.5	41	89	0.34167	0.7417	-0.69315	0.30270	3.348	0.4817	2.4557	0.9606
0.6	19	108	0.15833	0.9000	-0.51083	0.83403	3.348	0.4817	1.6819	0.9975
0.7	9	117	0.07500	0.9750	-0.35667	1.30532	3.348	0.4817	0.8712	0.9990
0.8	3	120	0.02500	1.0000	-0.22314	0	3.348	0.4817	0.3590	1.000
0.9	0	120	0	1.0000	-0.10536	0	3.348	0.4817	0.1107	1.000

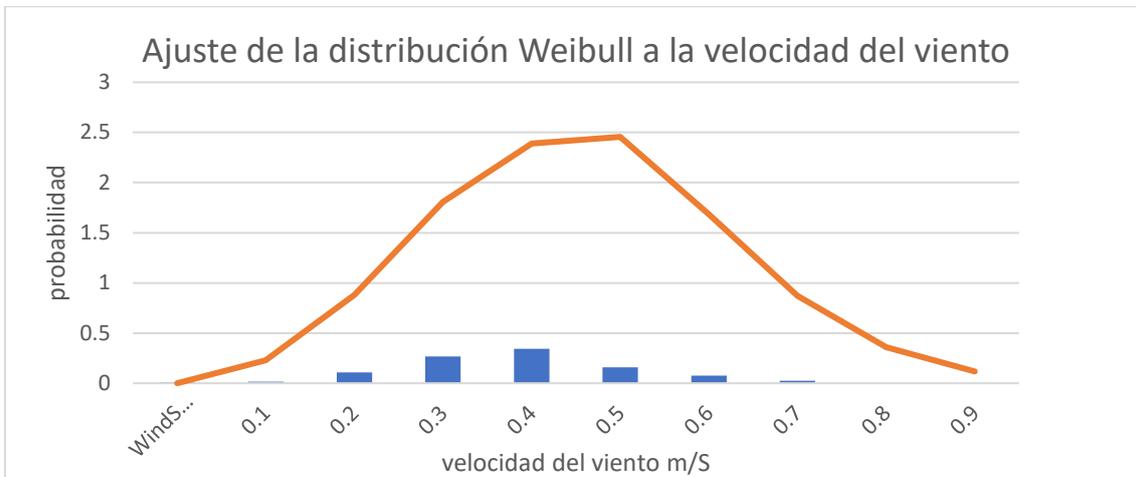
*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la tabla N° 34:**

La mayoría de las velocidades del viento se encuentra entre 0.3 y 0.6 m/s, con un máximo en 0.5 m/s, lo que refuerza el comportamiento típico de vientos suaves y estables en el sitio. El ajuste mediante la distribución de Weibull es adecuado, dado que modela con precisión tanto la frecuencia relativa como la acumulada. La alta concentración de velocidades bajas y el valor de  $k > 3$  confirman que el régimen eólico es estable, pero de baja intensidad, lo cual limita su potencial energético para aplicaciones convencionales, aunque puede ser útil en proyectos adaptados a baja velocidad.

**Figura 31**

*Ajuste de la Distribución de Weibull a la Velocidad del Viento*



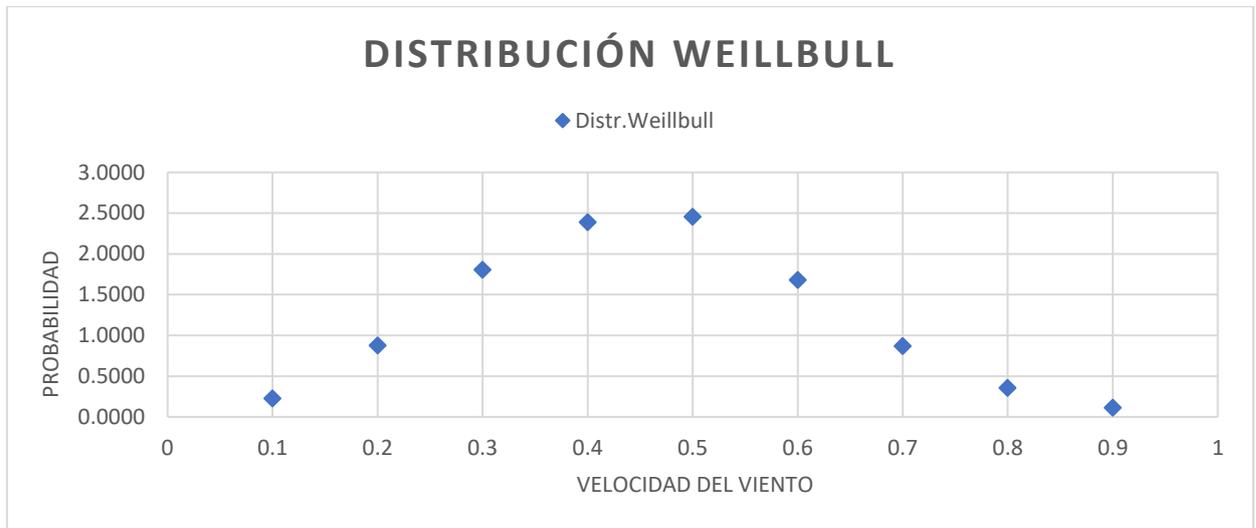
**Nota:** Elaboración propia

**Interpretación de la figura N°31:**

La gráfica muestra el ajuste de la distribución de Weibull a los datos de velocidad del viento registrados. Se observa que las velocidades más representativas se encuentran alrededor de los 0.5 m/s, donde la función de densidad alcanza su valor máximo. Es importante señalar que la función de densidad de probabilidad (PDF) puede tener valores mayores a 1, como se aprecia en el gráfico, sin que ello represente un error. Esto se debe a que la PDF no indica una probabilidad directa, sino la densidad asociada a cada intervalo, y su integral total en todo el dominio es igual a 1. En este caso, el pico elevado se debe a que los datos están concentrados en un rango estrecho de velocidades, lo cual genera una mayor densidad en ese punto específico.

**Figura 32**

*Distribución de Weibull*



*Nota:* Elaboración propia

**Interpretación de la figura N°32:**

La gráfica de la distribución de Weibull muestra cómo se distribuyen las probabilidades de ocurrencia de la velocidad del viento registrada en el observatorio. Se aprecia que los valores más frecuentes se encuentran entre 0,4 m/s y 0,5 m/s, donde la densidad de probabilidad alcanza su valor máximo, aproximadamente 2,5. A medida que las velocidades del viento se alejan de este rango, tanto hacia valores menores como mayores, la probabilidad disminuye considerablemente, siendo casi nula para velocidades inferiores a 0,2 m/s y superiores a 0,8 m/s. Esta forma asimétrica de la curva es característica de regiones con vientos suaves, lo que indica que el recurso eólico del lugar es limitado. La curva permite caracterizar el recurso eólico como débil, con bajos niveles de energía disponible, lo cual tiene implicancias importantes para su aprovechamiento energético, aunque puede resultar útil para estudios climáticos.

## CONCLUSIONES

- El estudio permitió determinar que el recurso eólico en el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera - Perayoc presenta características variables, con velocidades medias/anuales de 0,4817 m/s y direcciones predominantes del viento de NorNorOeste (NNW) a SurSurEste (SSE) y otras de Este (E) a Oeste (W), una densidad de potencia reducida ( $0,0459 \text{ W/m}^2$ ), de la caracterización mediante análisis estadístico y distribución de Weibull permitió clasificar adecuadamente el recurso, siendo útil para fines académicos y ambientales. Se identificaron patrones estacionales y fluctuaciones interanuales, indicando un potencial moderado para aprovechamiento energético en pequeña escala. Estos resultados contribuyen a la planificación de proyectos de energía eólica en la región y refuerzan la importancia de continuar con el monitoreo para mejorar la precisión de futuros análisis. Se identificó además que el crecimiento de infraestructura cercana afecta los registros por obstrucción del flujo de viento.
- Se verificó una tendencia decreciente de las velocidades del viento durante el periodo 2012–2023, con variaciones mensuales y anuales significativas. Este comportamiento respalda la hipótesis de que el recurso presenta cambios temporales relevantes.
- La densidad del aire, calculada en función de la altitud (3365 y 3376 msnm), mostró una variación mínima, pero suficiente para incidir en el cálculo de la densidad de potencia del viento. Esto confirma la importancia de considerar la altitud en estudios de potencial eólico.
- Las rosas de viento revelaron dos direcciones predominantes constantes a lo largo del periodo: Oeste (W) y Sur-Sureste (SSE), confirmando patrones direccionales estables en la zona de estudio.

- La aplicación de la distribución de Weibull fue adecuada para modelar la variabilidad del recurso eólico. El parámetro de forma  $k = 3,348$  indica una distribución estable y el parámetro de escala  $c = 0,4886$  m/s es coherente con la velocidad promedio general.

## RECOMENDACIONES

- Aunque el recurso eólico local es bajo, se recomienda explorar su integración complementaria con otras fuentes renovables (como solar), especialmente en zonas rurales o periurbanas con mejores condiciones de viento
- Reubicar sensores a mayor altura: Para obtener datos más representativos del potencial eólico real, se recomienda instalar sensores anemométricos a alturas estándar (10 m o más), fuera del efecto directo de edificaciones.
- Realizar campañas de medición en otras áreas menos urbanizadas permitiría comparar resultados y evaluar la variabilidad espacial del viento dentro del entorno universitario.
- Considerar estaciones meteorológicas ubicadas en zonas abiertas, fuera de interferencias urbanas, con el fin de contrastar los datos y evaluar la viabilidad de aplicaciones eólicas en la región.
- Aplicar herramientas de modelado computacional para estimar cómo las edificaciones afectan la dirección y velocidad del viento localmente.

## SUGERENCIAS

- Se sugiere evaluar la posibilidad de reubicar el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera – Perayoc a una zona más abierta y libre de obstáculos significativos, como edificaciones altas o vegetación densa. La ubicación actual, en un entorno urbano densamente edificado, genera distorsiones en la medición del viento debido a efectos de turbulencia, sombra de viento y obstrucción del flujo natural. Una reubicación estratégica permitiría obtener datos más representativos y confiables del comportamiento real del recurso eólico en la región.
- Establecer vínculos con entidades públicas y privadas (como SENAMHI, universidades u ONGs) que trabajen en energías renovables, para acceder a redes de investigación, financiamiento o codesarrolló de proyectos eólicos.
- Impulsar programas de formación y capacitación continua en el manejo de software para análisis eólico, diseño de sistemas de generación renovable, y modelado climático, dirigidos a estudiantes e investigadores.
- Dado que el entorno urbano afecta significativamente las mediciones, sería útil instalar estaciones meteorológicas adicionales en áreas rurales o despejadas cercanas, para comparar la dinámica del viento sin interferencias artificiales.
- Implementar actividades interdisciplinarias entre facultades (Ingeniería, Arquitectura, Física y Medio Ambiente) para el diseño de tecnologías adaptadas a entornos de baja velocidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Anth, J. G. (2010). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons.
- Ayllón, T. (2003). *Elementos de Meteorología y climatología*. México: Trillas.
- Carta Gonzalez, J. A., Calero Perez, R., Colmenar Santos, A., Castro Gil, M. A., & Collado Fernández, E. (2012). *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables*. Madrid: Pearson.
- Castañeda, W. F. (2013). Aplicación de la ecuación de Weibull para determinar potencial eólico en Tunja - Colombia. *XX Simposio peruano de energía solar, Tacna - Perú*.
- Cusco, P. E. (13 de junio de 2013). Obtenido de <https://www.evwind.com/2013/06/14/eólica-en-Perú-proyectos-eólicos-en-úsco/>.
- Cusco, U. N. (2023). *Compendio Estadístico 2015-2023 N°38*. Cusco.
- Decreto Legislativo 1002. (2 de mayo de 2008). *El Peruano*. Obtenido de <https://diariooficial.elperuano.pe/Normas>
- Escoda, A. (2012). *Meteorología y Climatología*. Paraninfo.
- Franco, R. (2022). *Diseño e implementación del sistema de adquisición de datos de un aerogenerador con cargas para el estudio de potencial eólico en la UNSAAC-Cusco*. Cusco: Repositorio de la UNSAAC.
- Gonzales, J. L. (2020). *Proyecto de tesis: Guía para la elaboración*. Arequipa-Perú.
- Grant, H. L. (2012). *Estadística Aplicada a la Investigación Científica*. McGraw- Hill Interamericana.

- Herrera, R. V. (2014). *Evaluación del recurso eólico en la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez*. Chihuahua Mexico.
- Huaman, A. (2023). *Análisis de tendencias de las variables meteorológicas: precipitación, velocidad del viento y temperatura utilizando la distribución de Weibull en la ciudad de Cusco, durante el periodo 2001-2021*. Cusco: Repositorio de la UNSAAC.
- Huanca, E. (2017). *Caracterización de los recursos eólico y solar de la ciudad de Juliaca*. Puno: Repositorio UNAP.
- Llacsahuanga, P. (2018). *Energía Eólica en el Perú: potencial, situación actual y perspectivas*. fondo editorial de la Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga.
- Luis, F. Y. (2000). *Iniciación a la meteorología y climatología*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Malaver, S. T. (2023). *Simulación del rendimiento de una turbina eólica vertical helicoidal darrieus en ambientes urbanos*. Bogota: Fundación Universidad de América .
- Méndez, J. M. (2012). *Energía Eólica*. España: Fundación Confemetal.
- Mori, D. (2018). *Proyecto de viabilidad de climatización y electrificación en viviendas de comunidades rurales en Zonas Alto Andinas(Puno-Perú)*. Puno: Universitat de Barcelona.
- Muniz, J. M. (2012). *Energía Eólica* . Madrid: Fundación Confenetal.
- Muñiz, J. (2012). *Energía Eólica*. Madrid: Fundacion Confenetal.
- Normas Legales. (9 de noviembre de 2012). *El Peruano*, pág. 478291. Obtenido de <https://diariooficial.elperuano.pe/Normas>
- Perú, M. d. (2016). *Atlas Eólico del Perú*. Lima.

- Quiñonez, J. (2019). Caracterización del recurso eólico en la ciudad del Juliaca. *Journal of High Andean Research*, 57 - 68.
- Rubio, B. (2024). *Estudio de Caso: Energía eólica para generación de energía eléctrica a nivel urbano*. Universidad de Guayaquil. Guayaquil - Ecuador: Repositorio Nacional en Ciencia y Tecnología.
- SENAMHI. (2021). *Instalación y Operación de Estaciones*.
- Tito, U. (2021). Estimación del potencial de energía usando la distribución de Weibull para un sitio en la region sur del Perú. *XXVIII Simposio Peruano de energía solar y del ambiente*.
- Torregrosa, J. L. (2011). *Energías Renovables: Conceptos Básicos y Aplicaciones*. Alfaomega .
- Twidell, J. (2008). *Energía Eólica: Principios y Aplicaciones*. Paraninfo.
- Warthon Ascarza, J. L. (2017). *Energía Limpia y Cero Emisión*. Cusco, Cusco: Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.
- Weibull, W. (1951). A statistical distribution funtion of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 293 - 297.
- Yancachajlla, U., & Vilca, O. (2022). Caracterización del viento con la función de Weibull para la zona altoandina Laraqueri- Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinnas*, 190 - 198.

## ANEXOS

### ANEXO 1: Operacionalización de Variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Escala de Medición	Unidad	Fuente
Velocidad del viento	Movimiento del aire por unidad de aire	Valor medio mensual y anual obtenidos desde la estación automática Davis	Cuantitativa continua	m/s	Registro Davis Vantage Pro2
Dirección del viento	Punto cardinal desde donde sopla el viento	Determina a través de la rosa de vientos	Cualitativa nominal	grados sexagesimales	Registro Davis Vantage Pro2
Densidad del aire	Relación entre masa y volumen del aire	Calculada con ecuaciones según su altitud (3365 msnm)	Cuantitativa continua	Kg/m <sup>3</sup>	Cálculo propio
Parámetros de Weibull	Constantes estadísticas de forma(k) escala © que modela la distribución del viento	Estimadas mediante métodos gráficos y ajuste de curva R	Cuantitativa continua		Modelamiento estadístico

## ANEXO 2: Matriz de Consistencia

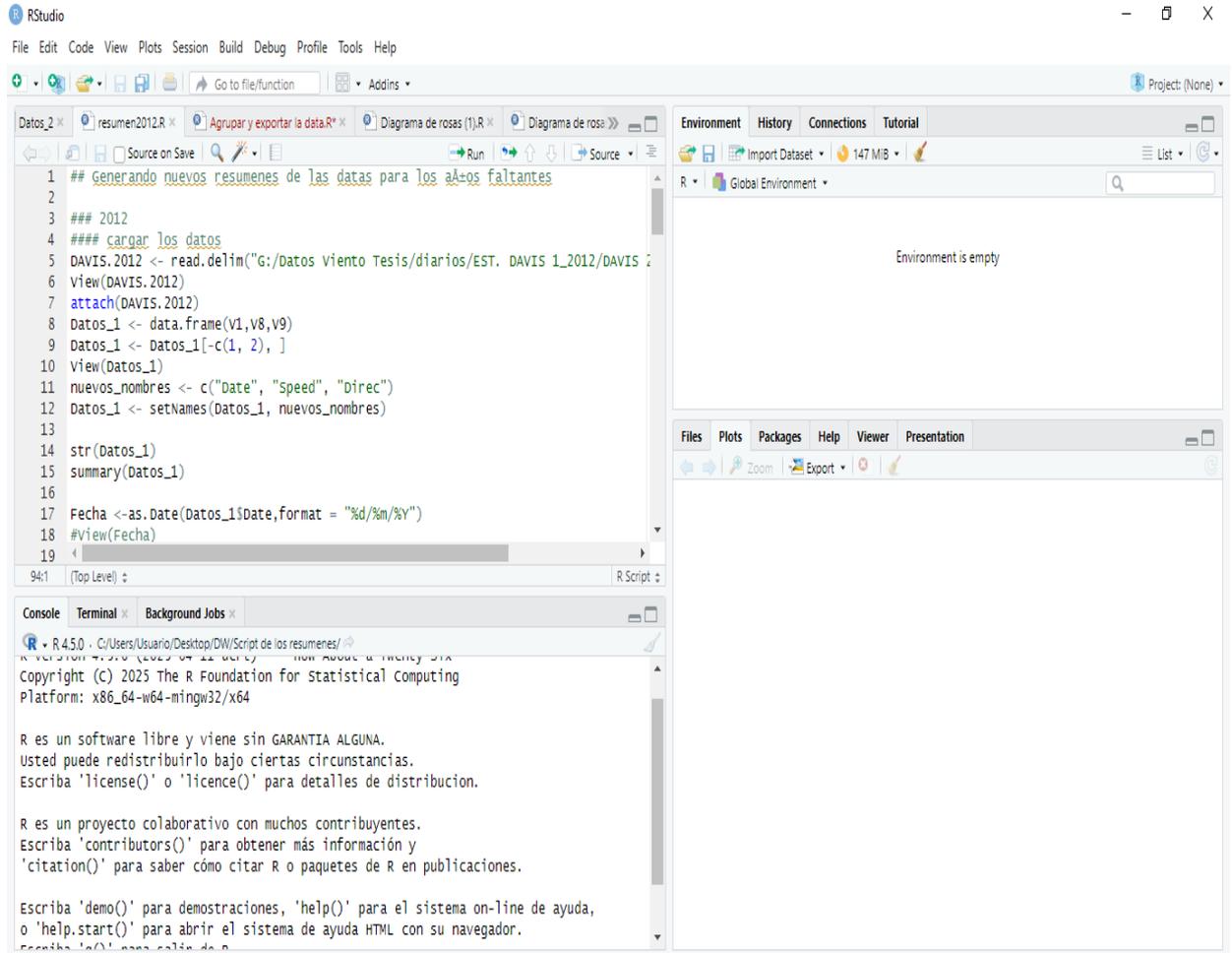
### Título: Caracterización Del Recurso Eólico En El Observatorio Meteorológico Luis Olazo

#### Olivera - Perayoc De La UNSAAC, Cusco: 2012 – 2023

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores
<p><b>Problema General:</b> ¿Cuál es la característica del recurso eólico en el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera – Perayoc, de la Universidad Nacional San Antonio Abad de Cusco (UNSAAC), según los datos registrados durante el periodo 2012 – 2023?</p>	<p><b>Objetivo General:</b> . Caracterizar el recurso eólico en el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera – Perayoc de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), utilizando los datos registrados durante el periodo 2012 - 2023.</p>	<p><b>hipótesis General:</b> El recurso eólico en el Observatorio Meteorológico Luis Olazo Olivera – Perayoc de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), presenta características favorables para su aprovechamiento sostenible.</p>		
<p><b>Problema Especifico</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles son las velocidades promedio mensual y anual del viento a partir de los datos registrados en el Observatorio meteorológicos durante el periodo 2012 -2023?</li> <li>• ¿Cuál es la densidad del aire en función de la altitud del Observatorio?</li> <li>• ¿Cuáles son las gráficas de la rosa de vientos anual utilizando los datos registrados en el Observatorio durante el periodo 2012 - 2023?</li> <li>• ¿Cómo modelar la variabilidad del viento mediante la distribución de Weibull con los datos registrados durante el periodo 2012 - 2023?</li> </ul>	<p><b>Objetivo Especifico</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Determinar las velocidades promedio mensual y anual del viento registradas en el Observatorio durante el periodo 2012 – 2023</li> <li>• Calcular la densidad del aire en función de la altitud del Observatorio Meteorológico durante el periodo 20212 – 2023</li> <li>• Elaborar las gráficas de las rosas de vientos anuales con datos registrados en el Observatorio Meteorológico durante el periodo 2012 – 2023</li> <li>• Modelar la variabilidad del viento utilizando el análisis de distribución de Weibull para vientos con datos registrados en el Observatorio Meteorológico durante el periodo 2012 – 2023</li> </ul>	<p><b>Hipótesis Especificas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Las velocidades promedio del viento, tanto mensuales como anuales, presentan variaciones significativas a lo largo del tiempo.</li> <li>•La densidad del aire, disminuye significativamente con la altitud del observatorio, e influye directamente en el potencial energético del viento.</li> <li>•La rosa de vientos anual identifica claramente direcciones predominantes del viento que pueden ser aprovechadas estratégicamente para la instalación de turbinas .</li> <li>•La distribución de Weibull permite modela eficientemente la variabilidad del viento en la zona, facilitando una caracterización estadística precisa del recurso eólico.</li> </ul>	<p><b>Variable Independiente:</b></p> <p>Tiempo: (Meses y años)</p> <p><b>Variable Dependiente:</b></p> <p>Velocidad del viento.</p> <p><b>Variable: Densidad del aire</b></p> <p><b>Variable: Dirección del viento</b></p>	<p>Velocidad promedio</p> <p>Velocidad máximo y mínimo</p> <p>Desviación estándar Máximos y mínimos.</p> <p>Ecuación de densidad del aire en función a la altitud, comparación con el nivel del mar.</p> <p>Porcentaje de ocurrencia por dirección cardinal frecuencia direccional.</p> <p>Parámetros de forma (k Parámetro de escala (c) y escala R<sup>2</sup> del ajuste</p>

## ANEXO 3: Código R para calcular el promedio de las velocidades

Código en R y RStudio que agrupa datos por meses y años y calcula promedios mensuales y anuales de la velocidad y dirección del viento



# Calcular el promedio mensual de velocidad del viento

```
promedios_mensuales <- datos %>%
```

```
  group_by(anio, mes) %>%
```

```
  summarise(vel_prom = mean(velocidad, na.rm = TRUE))
```

# Mostrar resultados

```

print(promedios_mensu# Calcular el promedio anual

promedios_anuales <- datos %>%

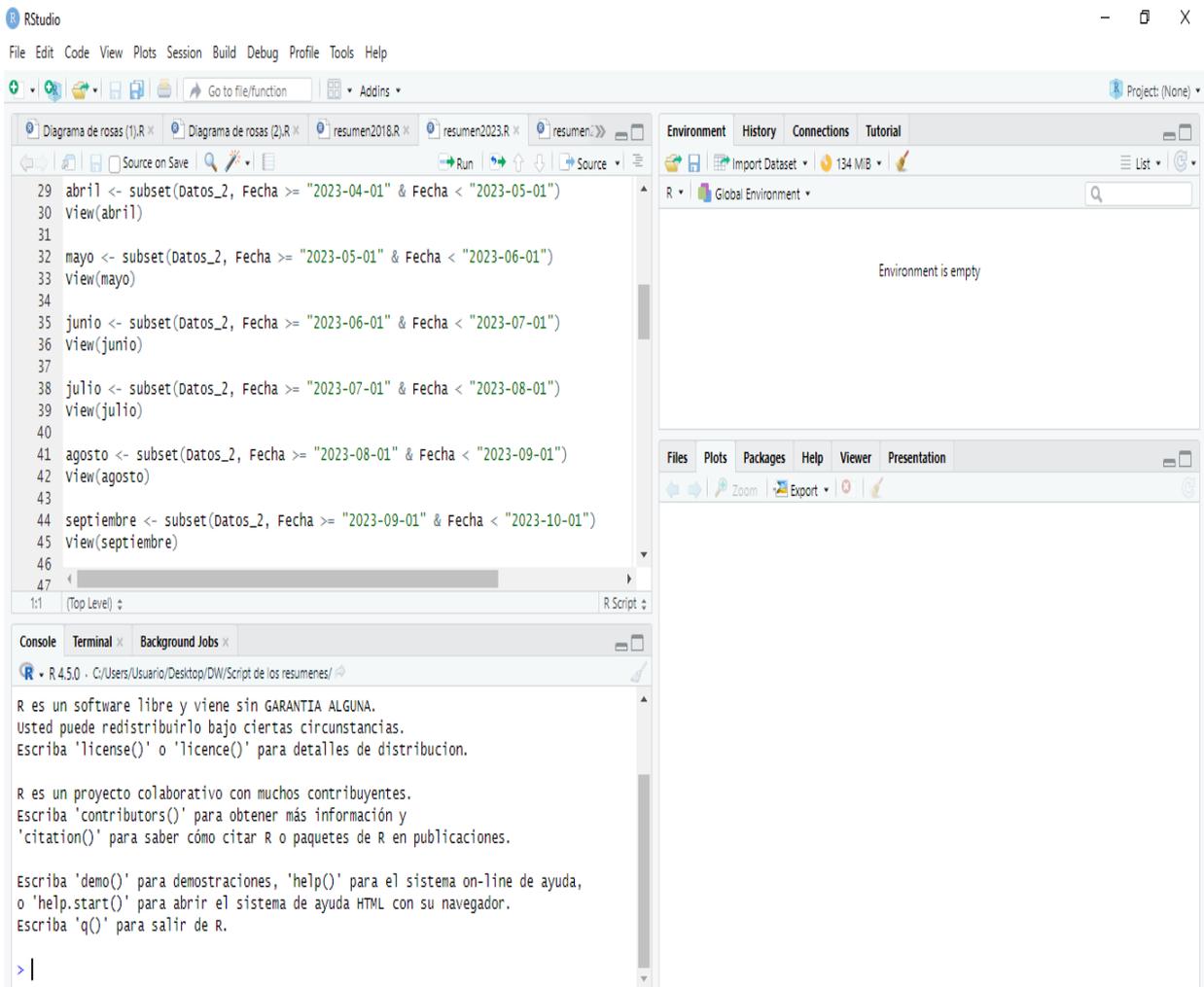
  group_by(anio) %>%

  summarise(vel_prom_anual = mean(velocidad, na.rm = TRUE))

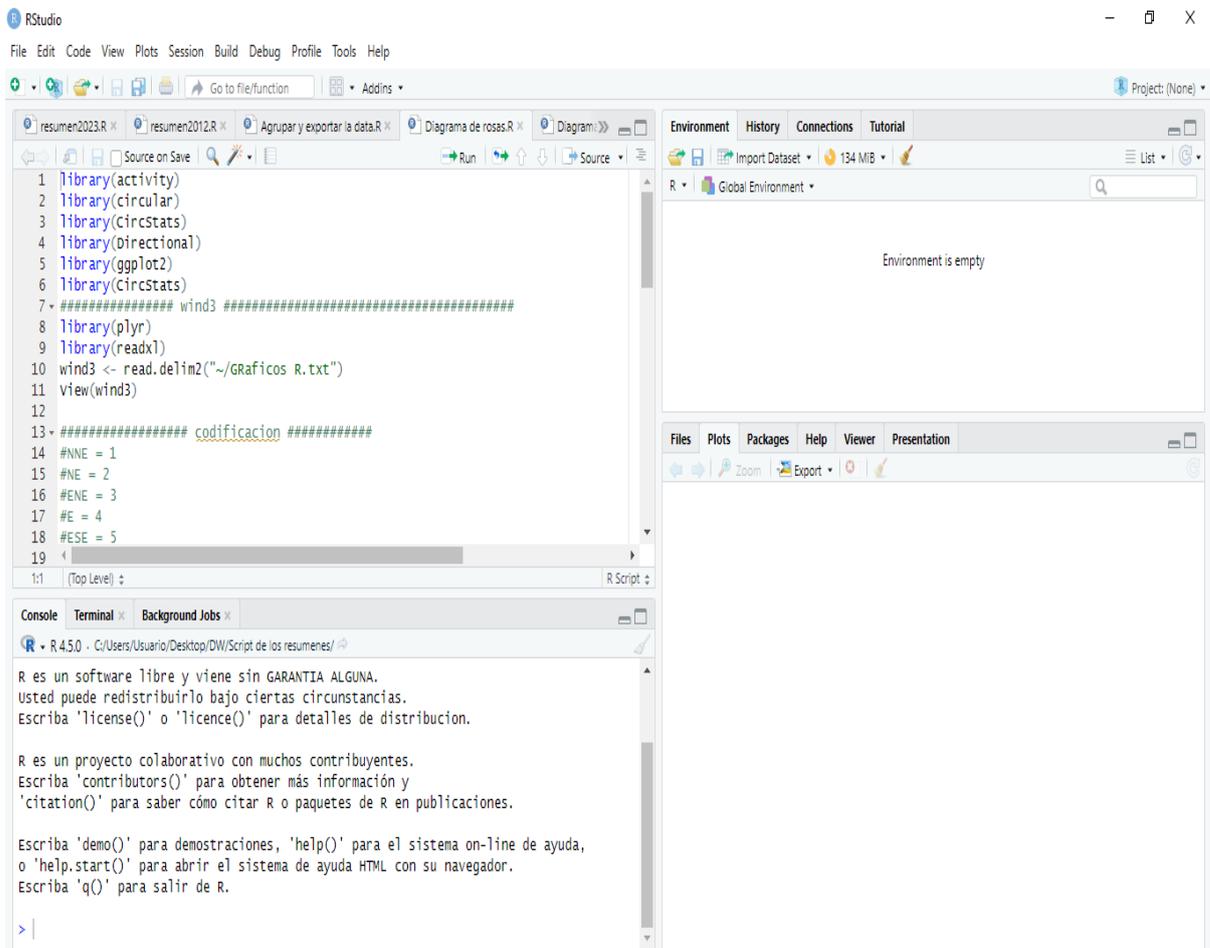
# Mostrar resultados

print(promedios_anuales)

```



## Código en R y RStudio que genera la rosa de los vientos y muestra la frecuencia según dirección y velocidad



**# Generar la rosa de vientos anual**

**windRose(mydata = datos,**

**ws = "velocidad", # variable de velocidad**

**wd = "direccion", # variable de dirección**

**angle = 22.5, # divisiones de dirección (16 sectores)**

**type = "year", # una rosa por cada año**

**paddle = FALSE, # diseño en forma circular**

**key.position = "right",**

**breaks = c(0.1, 0.5, 1, 2, 3),**

**main = "Rosa de Vientos 2012–2023")**