



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA ESTADÍSTICA

**“DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE WEIBULL PARA
EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS EMPLAZAMIENTOS
EÓLICOS EN LA SIERRA ECUATORIANA PROVINCIA DE
CHIMBORAZO.”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN ESTADÍSTICA INFORMÁTICA

AUTORA: DOLORES KATHERINE ESPARZA PIÑAS

DIRECTORA: Ing. NATALIA ALEXANDRA PEREZ LONDO Msc.

Riobamba – Ecuador

2022

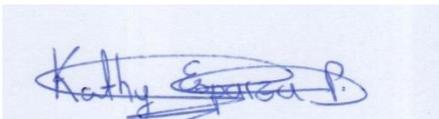
©2022, Dolores Katherine Esparza Piñas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, DOLORES KATHERINE ESPARZA PIÑAS, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 03 de junio de 2022

A handwritten signature in blue ink, reading "Kathy Esparza Piñas", is displayed on a light blue rectangular background.

Dolores Katherine Esparza Piñas

060583405-0

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA ESTADÍSTICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto de Investigación: **DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DE WEIBULL PARA EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS EMPLAZAMIENTOS EÓLICOS EN LA SIERRA ECUATORIANA PROVINCIA DE CHIMBORAZO**, realizado por la señorita: **DOLORES KATHERINE ESPARZA PIÑAS**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, El mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. José Rigoberto Muñoz Cargua Mgs. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-06-03
Ing. Natalia Alexandra Pérez Londo Msc. DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACION		2022-06-03
Ing. Héctor Salomón Mullo Guaminga Msc. MIEMBRO DE TRIBUNAL		2022-06-03

DEDICATORIA

Quiero dedicar este triunfo a mi madre Silvia Piñas quien me ha guiado y brindado su apoyo en este camino, a mi padre Raúl, mi ángel en el cielo que sigue cuidando cada uno de mis pasos y desde ese lugar celebra este triunfo conmigo; a mis hermanas, Daniela y Yadira, ya que son mis mejores amigas; a mi abuelo Vicente, a todos ustedes por ser parte de mi vida.

Dolores

AGRADECIMIENTO

El más sincero de los agradecimientos a Dios, por haberme dado la oportunidad de vivir y llegar a este momento tan importante en mi vida. A mi madre Silvia por todos sus sacrificios que ha hecho durante toda mi vida y en especial en este tiempo que asumió el rol de cabeza de hogar, ser padre y madre y sacarnos adelante a mis hermanas y a mí. A mis hermanas Daniela y Yadira, quienes son el motor de mi vida, y por quienes me esfuerzo cada día, también quiero agradecer al Doctor Rigoberto Muñoz a la ingeniera Natalia Pérez y al ingeniero Héctor Mullo, quienes me han brindado su guía y apoyo. Para finalizar mi agradecimiento a mi ALMA MATER, mi Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

A todos ustedes Dios les pague.

Dolores

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE GRAFICOS	xi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
ABREVIATURAS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	5
1.1. Bases conceptuales	5
1.1.1. <i>Datos Atípicos</i>	5
1.1.1.1. <i>Datos Atípicos Univariantes</i>	5
1.1.2. <i>Análisis estadístico del viento</i>	5
1.1.2.1. <i>Velocidad media</i>	5
1.1.2.2. <i>Desviación estándar</i>	6
1.1.3. <i>Distribución Weibull</i>	6
1.1.4. <i>Modelos de estimación de los parámetros de Weibull</i>	7
1.1.4.1. <i>Estimación por cuadrados mínimos</i>	7
1.1.4.2. <i>Método de máxima verosimilitud</i>	8
1.1.4.3. <i>Método de máxima verosimilitud modificada</i>	9
1.1.4.4. <i>Método empírico</i>	9
1.1.5. <i>Evaluación de la precisión del método</i>	10
1.1.6. <i>Potencial eólico</i>	10
1.2. Bases teóricas	11
1.2.1. <i>Energías renovables</i>	11
1.2.2. <i>Energía eólica</i>	11
1.2.3. <i>Recurso eólico</i>	11
1.2.4. <i>Mapa eólico</i>	12
1.2.5. <i>Tipos de parques eólicos</i>	12
1.2.6. <i>Impacto ambiental</i>	13

1.2.7.	<i>Ventajas de la energía eólica</i>	14
1.2.8.	<i>Desventajas de la energía eólica</i>	14
1.2.9.	<i>Condiciones para la instalación de la energía eólica</i>	15
1.2.10.	<i>Aerogenerador</i>	15
1.2.11.	<i>Energía eléctrica en el Ecuador.</i>	15
1.2.12.	<i>Energía eólica en el Ecuador</i>	17
1.2.13.	<i>Viento</i>	17
1.2.14.	<i>Velocidad del viento</i>	18
1.2.15.	<i>Tipos de viento</i>	18
1.2.15.1.	<i>Vientos planetarios</i>	18
1.2.15.2.	<i>Vientos regionales</i>	18
1.2.16.	<i>Escala Beaufort</i>	19
1.2.17.	<i>Dirección del viento</i>	20
1.2.18.	<i>Instrumentos de medición del viento</i>	21
1.2.19.	<i>Formas de presentación de los datos del viento</i>	22

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	23
2.1.	Tipo y Diseño de la Investigación	23
2.2.	Localización del área de estudio	23
2.3.	Población de estudio	24
2.4.	Recolección de la información	24
2.5.	Operacionalización de las variables	24
2.6.	Análisis Estadístico	25
2.6.1.	<i>Instrumento de procesamiento y análisis de información</i>	25
2.6.2.	<i>Análisis exploratorio</i>	25
2.6.2.1.	<i>Rosa de los vientos</i>	25
2.6.2.2.	<i>Datos atípicos</i>	26
2.6.2.3.	<i>Análisis estadístico del viento</i>	26
2.6.2.4.	<i>Imputación de datos</i>	26
2.6.2.5.	<i>Distribución de Weibull</i>	26

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	27
3.1.	Representación de los datos	27

3.2.	Datos atípicos univariantes	30
3.4.	Distribución de frecuencia	33
3.5.	Distribución de Weibull	39
3.6.	Distribución acumulativa y complementaria de Weibull	40
3.7.	Función de densidad de probabilidad	49
3.8.	Evaluación de parámetros	57
3.9.	Velocidad del viento más probable.....	58
3.10.	Potencial energético.....	58
	CONCLUSIONES.....	60
	RECOMENDACIONES.....	61
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Potencia de centrales de generación con fuentes de energía renovable	16
Tabla 2-1: Escala Beaufort de intensidades de viento.	19
Tabla 3-1: Criterios de apreciación de la intensidad del viento en la escala Beaufort	20
Tabla 4-2: Ubicación de las estaciones meteorológicas de la Provincia de Chimborazo	23
Tabla 5-2. Operacionalización de las variables	24
Tabla 6-3: Estadísticos descriptivos EM Chimborazo	32
Tabla 7-3: Estadísticos descriptivos EM San Juan	32
Tabla 8-3: Distribución de Frecuencias EM. Chimborazo 2018.....	33
Tabla 9-3: Distribución de Frecuencia EM Chimborazo 2019.	34
Tabla 10-3: Distribución de Frecuencia EM Chimborazo 2020.	35
Tabla 11-3: Distribución de Frecuencia EM San Juan 2018.....	36
Tabla 12-3: Distribución de Frecuencia EM San Juan 2019.....	37
Tabla 13-3: Distribución de Frecuencia EM San Juan 2020.....	38
Tabla 14-3: Parámetros distribución de Weibull EM Chimborazo.	39
Tabla 15-3: Parámetros distribución de Weibull EM San Juan.	40
Tabla 16-3: DA y DAC: Cuadrados mínimos. EM Chimborazo.	40
Tabla 17-3: DA y DAC: Máxima verosimilitud EM Chimborazo.....	42
Tabla 18-3: DA y DAC: Método empírico EM Chimborazo.	44
Tabla 19-3: DA y DAC: Cuadrados mínimos EM San Juan.	46
Tabla 20-3: DA y DAC: Máxima verosimilitud EM San Juan.....	47
Tabla 21-3: DA y DAC: Método empírico EM San Juan.....	48
Tabla 22-3: FDP: Cuadrados mínimos EM Chimborazo.....	49
Tabla 23-3: FDP: Máxima verosimilitud EM Chimborazo	51
Tabla 24-3: FDP: Método empírico EM Chimborazo	53
Tabla 25-3: FDP: Cuadrados mínimos EM San Juan	54
Tabla 26-3: FDP: Máxima Verosimilitud EM San Juan.....	55
Tabla 27-3: FDP: Método empírico EM San Juan	56
Tabla 28-3: Evaluación de parámetros EM Chimborazo	57
Tabla 29-3: Evaluación de parámetros EM San Juan	58
Tabla 30-3: Velocidad del viento más probable	58
Tabla 31-3: Densidad de la potencia	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Densidad de probabilidad de viento para distintos valores de k	6
Figura 2-1: Frecuencia relativa acumulada	7
Figura 3-1: Frecuencia relativa acumulada complementaria	7
Figura 4-1: Mapa eólico mundial	12
Figura 5-1: Anemómetro.....	21
Figura 6-1: Veleta.....	21
Figura 7-2: Ubicación de las Estaciones Meteorológicas	24

ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1-3: Rosa de los vientos EM Chimborazo 2018.	27
Gráfico 2-3: Rosa de los vientos EM Chimborazo 2019.	27
Gráfico 3-3: Rosa de los vientos EM Chimborazo 2020.	28
Gráfico 4-2: Rosa de los vientos EM San Juan 2018.	28
Gráfico 5-3: Rosa de los vientos EM San Juan 2019.	29
Gráfico 6-3: Rosa de los vientos EM San Juan 2020.	29
Gráfico 7-3: Visualización de datos anómalos EM Chimborazo.	30
Gráfico 8-3: Base de datos sin datos anómalos EM Chimborazo.	30
Gráfico 9-2: Diagrama de caja Velocidad de viento EM San Juan.	31
Gráfico 10-3: Diagrama de caja Velocidad de viento EM San Juan 2018.	31
Gráfico 11-3: Histograma velocidad del viento EM Chimborazo 2018	34
Gráfico 12-3: Histograma velocidad del viento EM Chimborazo 2019	35
Gráfico 13-3: Histograma velocidad del viento EM Chimborazo 2020	36
Gráfico 14-3: Histograma velocidad del viento EM San Juan 2018.	37
Gráfico 15-3: Histograma velocidad del viento EM San Juan 2019	38
Gráfico 16-3: Histograma velocidad del viento EM San Juan 2020	39
Gráfico 17-3: DA y DAC: Cuadrados mínimos EM Chimborazo	42
Gráfico 18-3: DA y DAC: Máxima verosimilitud EM Chimborazo.	44
Gráfico 19-3: DA y DAC: Método empírico EM Chimborazo.	46
Gráfico 20-3: DA y DAC: Cuadrados mínimos EM San Juan.	47
Gráfico 21-3: DA y DAC: Máxima verosimilitud EM San Juan.	48
Gráfico 22-3: DA y DAC: Método empírico EM San Juan.	49
Gráfico 23-3: FDP: Cuadrados mínimos EM Chimborazo	51
Gráfico 24-3: FDP: Máxima verosimilitud EM Chimborazo	52
Gráfico 25-3: FDP: Método empírico EM Chimborazo	54
Gráfico 26-3: FDP: Cuadrados mínimos EM San Juan	55
Gráfico 27-3: FDP: Cuadrados mínimos EM San Juan	56
Gráfico 28-3: FDP: Método empírico EM San Juan.	57

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1-1): MAD.....	5
Ecuación (2-1): Velocidad Media.....	5
Ecuación (3-1): Desviación Estandar	6
Ecuación (4-1): Función de densidad de probabilidad de Weibull	6
Ecuación (5-1): Distribución Acumulativa.....	6
Ecuación (6-1): Distribución Acumulativa Complementaria.....	6
Ecuación (7-1): Expresión logaritmica	7
Ecuación (8-1): Método cuadrados mínimos, parámetro k	8
Ecuación (9-1): Método cuadrados mínimos, parametro c	8
Ecuación (10-1): Método máxima verosimilitud, parámetro k	8
Ecuación (11-1): Método máxima verosimilitud, parámetro c	8
Ecuación (12-1): Método máxima verosimilitud modificada, parámetro k	9
Ecuación (13-1): Método máxima verosimilitud modificada, parámetro c.....	9
Ecuación (14-1): Método empírico, parámetro k.....	9
Ecuación (15-1): Método empírico, parámetro c	9
Ecuación (16-1): Función gamma	9
Ecuación (17-1): Error cuadrático medio	10
Ecuación (18-1): Error cuadrático medio de la raíz	10
Ecuación (19-1): Error absoluto medio	10
Ecuación (20-1): Potencial eólico.....	10
Ecuación (21-1): Velocidad de viento más probable	10

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: LIBRERÍAS UTILIZADAS

ANEXO B: LECTURAS DE DATOS

ANEXO C: ROSA DE LOS VIENTOS

ANEXO D: CALCULO DATOS ATÍPICOS

ANEXO E: DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA

ANEXO F: MÉTODO DE CUADRADOS MÍNIMOS

ANEXO G: MÉTODO DE MÁXIMA VEROSIMILITUD

ANEXO H: MÉTODO EMPÍRICO

ANEXO I: DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVA Y ACUMULATIVA COMPLEMENTARIA

ANEXO J: FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD

ANEXO K: MSE, RMSE, MAE

ANEXO L: POTENCIAL ENERGÉTICO

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

DA:	Distribución acumulativa
DAC:	Distribución acumulativa complementaria
EM:	Estación Meteorológica
FDP:	Función de densidad de probabilidad
MAE:	Error absoluto medio
MSE:	Error cuadrático medio
RMSE:	Error cuadrático medio de la raíz

RESUMEN

La presente investigación realizó un análisis estadístico probabilístico que permitió detectar los parámetros de la distribución de Weibull para el potencial energético eólico en la provincia de Chimborazo, utilizando los datos monitoreados por el Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, de dos estaciones meteorológicas ubicadas en el canto Riobamba: sector de Lomas de Rasutambo, Zona Pinanquil (El Arenal) y en la parroquia San Juan. Utilizando las variables velocidad (m/s) y dirección del viento en un periodo de tres años (2018-2020), los parámetros (k) y (c) de la distribución Weibull, se calcularon mediante el software estadístico R utilizando tres distintos métodos de estimación: El método de cuadrados mínimos, el método de máxima verosimilitud, y el método empírico; para poder determinar el método más adecuado con el que se determinó el potencial energético eólico para ambas estaciones. El comportamiento de los datos se obtuvo mediante un análisis descriptivo, donde se evidenciaron datos anómalos que fueron separados de la base de datos. La velocidad media anual de la estación Lomas de Rasutambo fue 11.59 m/s, y en la estación San Juan fue 4.10 m/s, con una densidad de potencia de 607.64 w/m², y 26.87 w/m² respectivamente, demostrando que el mejor método de estimación de los parámetros para la primera estación fue el método de cuadrados mínimos y para la segunda estación fue el método empírico. Se concluye que en el sector El Arenal la creación de una central eólica es factible, mientras que en el sector de San Juan no lo es, porque su valor es menor al rango favorable (200 w/m²). Se recomienda el mantenimiento constante de las estaciones meteorológicas para evitar la pérdida de información.

Palabras clave: <DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL>, <ENERGIAS ALTERNATIVAS>, <ENERGÍA EÓLICA>, <POTENCIAL EÓLICO>, <ESTACIONES METEOROLÓGICAS>.



Ing. Leonardo Fabio Medina Ñuste MSc.
1757773294

2031-DBRA-UTP-2022

ABSTRACT

This investigation performed a probabilistic statistical analysis that allowed detecting the parameters of the Weibull distribution for the wind energy potential in the province of Chimborazo, using the data monitored by the Alternative Energies and Environment Group (GEAA) of the Polytechnic of Chimborazo, of two weather stations located in Riobamba canton: Lomas de Rasutambo sector Pinanquil Zone (EL Arenal) and in San Juan Parish. Using the variables, speed (m/s) and direction of the wind in a three-year period (2018-2020), the parameters (k) and (c) of the Weibull distribution were calculated using the statistical software R by three different estimation methods: The method of least squares, the maximum likelihood method, and the empirical method; to decide the most appropriate method with which the wind energy potential was determined for both stations. The behavior of the data was obtained through a descriptive analysis, where anomalous data that were separated from the database were evidence. The annual speed mean of the Lomas de Rasutambo station was 11.59 m/s, and at the San Juan station it was 4.10 m/s, with a power density of 607.64w/m², and 26.87 w/m² respectively, showing that the best parameter estimation method for the former station was the method of least squares and for the latter it was the empirical method. It is concluded that in El Arenal sector the creation of a wind power plant is feasible, while in San Juan is not, because its value is less than the favorable range (200 w/m²). It is recommended constant maintenance of weather stations to avoid loss of information.

Keywords: <WEIBULL DISTRIBUTION>, <ALTERNATIVE ENERGIES>, <WIND ENERGY>, <WIND POTENTIAL>, <WEATHER STATIONS>



Edgar Mesias Jaramillo Moyano
0603497397

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el proceso rápido de contaminación, cambio climático y la disminución de los combustibles fósiles han obligado que la sociedad busque nuevas fuentes de energía, que sean renovables y amigables con el fin de aprovechar recursos ilimitados. Entre las cuales se encuentran: la energía hidroeléctrica, energía solar y la energía eólica.

La energía eólica se produce con la fuerza cinética del viento, por medio de turbinas, el cual hace que se convierta en electricidad, hoy en día, existe un crecimiento sin precedentes debido a los costes competitivos y a los enormes progresos tecnológicos realizados en las turbinas. Dicha energía ha estado presente por mucho tiempo, mediante grabados de civilizaciones antiguas como egipcios, fenicios y romanos, se ha podido conocer sobre el aprovechamiento del viento con fines energéticos, principalmente para la navegación. Años más tarde durante la edad media se empezó a utilizar esta energía para el funcionamiento de maquinarias de industrias como la metalúrgica, textil y maderera, cuyos molinos eran diseñados mediante un eje de rotación vertical.

La sustentabilidad no es un término de moda, al contrario, es un tema ampliamente discutido por varios expertos, los mismos que han expresado su preocupación debido a los cambios de temperatura que el planeta ha experimentado, lo cual ha llevado a buscar opciones que desaceleren el proceso de calentamiento global.

Ecuador a través de los años ha ido realizando diversos estudios para encontrar opciones que disminuyan el CO₂ y el consumo de combustibles, aunque siempre se ha visto enfocada en el uso de recursos tradicionales como la hidroelectricidad. En el año 2007 en la provincia de Galápagos se inauguró el primer parque eólico en la isla San Cristóbal, el cual tuvo una potencia instalada de 2.4 MW y en el año 2011 en la provincial de Loja en el cerro Villonaco se inauguró el segundo parque eólico el cual cuenta con una potencia instalada de 1.5 MW (Zambrano 2015, p. 3). Para el año 2020, el (60.82%) corresponde a centrales con fuentes de energía renovable, mientras que el (39.18%) a centrales con fuentes de energía no renovable, predominando la energía hidráulica con un total de 5.098,75 MW, mientras que la energía eólica tuvo un total de 21.15 MW.

ANTECEDENTES

La energía eólica ha sido utilizada desde la antigüedad, para impulsar los barcos de vela como para hacer funcionar la maquinaria de un molino. El norteamericano Charles F. Brush construyó, en 1887, la primera máquina considerada aerogenerador de electricidad. Y no fue hasta 1957 que el ingeniero danés Johannes Juul fabricara el primero apto para corriente alterna. Pero hubo que esperar a los años 80 del siglo pasado, tras la primera crisis del petróleo, para que este tipo de energía tuviera un verdadero impulso. Ya en el siglo XXI, La energía eólica está creciendo de forma imparable. («Energía eólica» 2013)

En la actualidad existen diversos estudios referentes a la energía eólica, con los parámetros de la distribución Weibull, en el artículo llamado “Analysis of wind power potential by the three-parameter Weibull distribution to install a wind turbine” (Sukkiramathi y Seshaiyah 2020, p. 1) analizo los tres parámetros de la distribución Weibull para estimar el factor de capacidad en diferentes alturas, la cual proporcione información sobre las características del viento en sitios potenciales y ayudo en la elección de turbinas eólicas que sean más adecuadas para la India, ya que la energía eólica es una fuente de energía limpia y ecológica, cada vez se acepta más como una fuente de energía complementaria para asegurar una energía limpia y sostenible para el futuro en la India..

En el artículo “Análisis Comparativo del Modelo de Weibull y Datos Observados del Viento en la Ciudad de Floridablanca, Colombia” (Arroyo, Tuta y Mora 2018, p. 2) el objetivo fue evaluar el recurso eólico en la ciudad de Floridablanca, Colombia, donde se analizó las características del viento con mediciones cada 15 minutos a 30 m de altura en el año 2016, el cual presento un análisis estadístico de las características del viento con el método de la distribución de Weibull de dos parámetros para modelar la velocidad del viento y así determinar el potencial eólico. Esto contribuyo a evaluar el potencial eólico de Floridablanca, Colombia, y se pueden usar, metodológicamente, para cuantificar el potencial eólico con posibilidades de generar potencia eléctrica en cualquier parte del país.

En la investigación “Comparative Study of Different Methods for Estimating Weibull Parameters: A Case Study on Jeju Island, South Korea”, (Kang, Ko y Huh 2018, p. 2) se realizó una investigación con el objetivo de determinar el mejor método para estimar los parámetros de la distribución de Weibull, donde se revisó seis métodos de estimación comúnmente utilizados en muchos campos de la industria de la energía eólica: empírico, momento, gráfico, patrón de energía, máxima verosimilitud y máxima verosimilitud modificada. Reflejando que el método que tuvo un mejor desempeño es el método de momento, mientras que el método que no obtuvo

un buen desempeño fue el método gráfico. x.

En el artículo científico “Determination of weibull parameters and analysis of wind power potential in coastal and non-coastal sites in akwa ibom state”, (Udoakah y Ikafia 2017, p. 2) el objetivo fue realizar un análisis estadístico a través de la distribución Weibull para las ciudades Eket y Uyo, Nigeria, donde se determinó la velocidad del viento mensual y anual, en un periodo de cuatro años (2010 – 2013). Dando como resultado una velocidad del viento de 6.7 m/s y 4.3 m/s y una potencia eólica diaria promedio de 0.91 MW y 0.25 MW respectivamente, evaluando los resultados se determinó que Eket, una zona costera fue viable para la producción de energía eólica comercial en comparación con Uyo, una zona no costera.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Enunciado del problema

La demanda de energía eléctrica va creciendo debido al aumento de la población y de las industrias, por lo que es necesario la producción de mayor cantidad de energía eléctrica. En el Ecuador una parte de la energía eléctrica es generada por centrales hidroeléctricas y otra por centrales térmicas las cuales producen CO₂ que contamina el ambiente en gran medida. Por otra parte, la energía eólica es una fuente de energía renovable que ha ido aumentando en un 8%. En la provincia de Chimborazo, se desea analizar la caracterización del viento y determinar los parámetros; c = parámetro de escala y k = factor de forma, de la distribución Weibull para el potencial energético de los emplazamientos eólicos.

Formulación del problema

¿Cuáles son los parámetros de la distribución de Weibull para el potencial energético de los emplazamientos eólicos, en la Provincia de Chimborazo?

JUSTIFICACIÓN

La energía eólica es una fuente de energía limpia y ecológica y cada vez se acepta como una importante fuente de energía limpia y sostenible. Actualmente la demanda de energía eléctrica de nuestro país es abastecida en un 80% por generación hidroeléctrica y el otro 12% por centrales térmicas, y el 8% con energía renovable. La demanda eléctrica de la provincia de Chimborazo es aproximadamente 50 MW. Siendo el Sistema Nacional de Transmisión quien suministra los restantes 34.1 MW, para satisfacer la demanda total de la provincia.

El presente trabajo realiza un estudio estadístico probabilístico que permite detectar los

parámetros; c = parámetro de escala y k = factor de forma de la distribución Weibull, ya que constituye una fuente de información bastante relevante el saber cómo se distribuyen las características de la velocidad del viento y así evaluar el potencial eólico, en las estaciones meteorológicas Lomas de Rasatumbo y San Juan ubicadas en la provincia de Chimborazo en un período de tres años (2018 – 2020) e implementar un modelo que se ajuste a la realidad. De esta forma se determinará si la construcción de una central eólica es viable o no viable.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo General

- Determinar los parámetros de Weibull para el potencial energético eólico en la provincia de Chimborazo.

Objetivos Específicos

- Definir y depurar la base de datos, con la cual se trabajará para la detección de los parámetros.
- Analizar el potencial energético de los emplazamientos eólicos de la Provincia de Chimborazo.
- Analizar los resultados obtenidos a través del software Rstudio, para obtener un mejor criterio en la interpretación de resultados.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Bases conceptuales

1.1.1. Datos Atípicos

Un outlier es una observación que por ser atípica y / o errónea se desvía decididamente del comportamiento general de los datos experimentales con respecto a los criterios que se van a analizar sobre ellos. (Muñoz, Moreno y Pascual 1990, p. 5).

1.1.1.1. Datos Atípicos Univariantes

Para la detección de datos atípicos univariantes existe una técnica visual que consiste en la realización de la gráfica del diagrama de caja y bigotes, además se conoce que la prueba de MAD es un buen indicador para la detección de datos atípicos.

$$\frac{|x_i - med(x)|}{Meda(x)} > 4.5 \quad (1-1)$$

1.1.2. Análisis estadístico del viento

Se realiza a partir de series de mediciones de la velocidad y dirección del viento en el lugar de estudio. Para obtener una primera aproximación a las bondades del recurso en la zona estudiada, el primer parámetro a ser calculado es la velocidad media.

1.1.2.1. Velocidad media

La velocidad media en un período se calcula como la sumatoria de todas las lecturas realizadas en ese período dividido por la cantidad total de lecturas.

$$V_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (2-1)$$

1.1.2.2. Desviación estándar

La desviación estándar, representa la dispersión de los valores respecto de su media.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - V_m)^2} \quad (3-1)$$

1.1.3. Distribución Weibull

Desarrollada en el año 1951, por el sueco Waloddi Weibull del cual toma su nombre, es una distribución de probabilidad continua frecuentemente usada en análisis meteorológicos en especial en análisis del viento, que nos permite calcular que existan velocidades de viento superiores o menores a una velocidad determinada. (Toure 2005, p. 2). Se requiere el conocimiento de dos parámetros: (k) factor de forma y (c) factor de escala, las cuales se expresan de la siguiente manera: (Manwell 2009, p. 75).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4-1)$$

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (5-1)$$

$$F(v) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (6-1)$$

Donde:

V = velocidad del viento

c = parámetro de escala

k = factor de forma

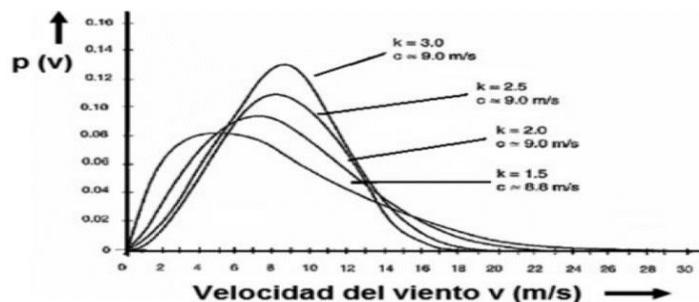


Figura 1-1: Densidad de probabilidad de viento para distintos valores de k

Fuente: Villarrubia López, 2013



Figura 2-1: Frecuencia relativa acumulada

Fuente: Villarrubia López, 2013

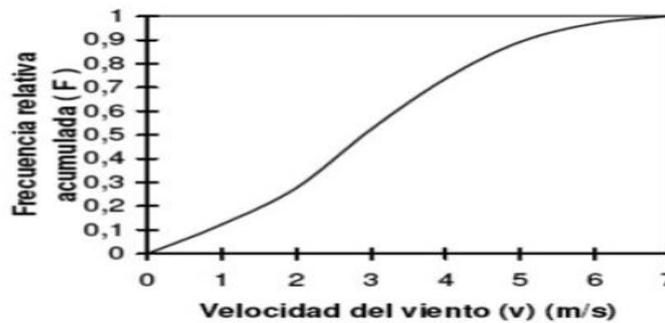


Figura 3-1: Frecuencia relativa acumulada complementaria

Fuente: Villarrubia López, 2013

1.1.4. Modelos de estimación de los parámetros de Weibull

Existen diferentes métodos para la estimación de los parámetros de la distribución de Weibull, parámetro de forma k y parámetro de escala c , los cuales se detallarán a continuación.

1.1.4.1. Estimación por cuadrados mínimos

Teniendo en cuenta que la ecuación (1) es discreta, se requiere de un ajuste para el cálculo de los parámetros k y c de la función de distribución de Weibull. Se linealizó la ecuación (4-1) aplicando dos veces logaritmo natural y se obtuvo la siguiente ecuación (7-1)

$$\ln[-\ln(1 - F(v))] = k \ln v - k \ln c \quad (7-1)$$

Donde:

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

Aplicando logaritmos naturales:

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

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

$$\ln \left[\frac{1}{1 - F(x)} \right] = \left(\frac{v}{c}\right)^k$$

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(x)} \right) \right] = k \ln \left(\frac{v}{c} \right)$$

$$\therefore \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(x)} \right) \right] = k \ln(v) - k \ln(c)$$

$$x = \ln v$$

Una vez calculada la recta por los mínimos cuadrados, su pendiente proporciona el valor del parámetro k ecuación (8-1), mientras el valor del parámetro c se obtiene mediante la ecuación (9-1).

$$A = \frac{\sum f_i x_i y_i - (\sum f_i x_i)(\sum f_i y_i)}{\sum f_i x_i^2 - (\sum f_i x_i)^2} \quad (8-1)$$

$$c = e^{-\left(\frac{B}{A}\right)} \quad (9-1)$$

1.1.4.2. Método de máxima verosimilitud

En este método se utilizan iteraciones numéricas para determinar los parámetros de la distribución de Weibull y son determinados mediante las siguientes ecuaciones. (Ranganathan, Ramanathan y Swaminathan 1991, p. 432)

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^N v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^N v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(v_i)}{N} \right)^{-1} \quad (10-1)$$

$$c = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^k \right)^{1/k} \quad (11-1)$$

Donde:

N: Número de observaciones

v_i : Velocidad del viento promedio registrado en ese intervalo de tiempo

Este método debe resolverse mediante un procedimiento iterativo ($k=2$ es una suposición inicial)

adecuada), después de lo cual la ecuación (5) se puede resolver explícitamente. Se debe tener cuidado de aplicar la ecuación (4) solo a la velocidad del viento distinta de cero (Seguro y Lambert 2000, p. 78).

1.1.4.3. Método de máxima verosimilitud modificada

Cuando los datos de velocidad del viento se encuentran en formato de distribución de frecuencia, los parámetros de Weibull se pueden determinar mediante las expresiones. (Seguro y Lambert 2000, p. 78).

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i) P(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k P(v_i)} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i) P(v_i)}{P(v \geq 0)} \right)^{-1} \quad (12-1)$$

$$c = \left(\frac{1}{P(v \geq 0)} \sum_{i=1}^n v_i^k P(v_i) \right)^{1/k} \quad (13-1)$$

Donde:

v_i : Es la velocidad del viento en el intervalo i .

n : Es el número de casillas.

$P(v_i)$: Es la frecuencia de la velocidad del viento en el intervalo i .

$P(v \geq 0)$: Es la probabilidad de que la velocidad del viento sea igual o superior a cero.

1.1.4.4. Método empírico

El método empírico tiene una solución sencilla, ya que se estima a partir de la velocidad media del viento (V_m) y la desviación estándar (sigma) de los datos del viento. (Islam, Dussadee y Chaichana 2016, p. 3).

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_m} \right)^{-1.086} \quad (14-1)$$

$$c = \frac{V_m}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (15-1)$$

Donde Γ es la función Gamma que esta expresada como:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (16-1)$$

1.1.5. Evaluación de la precisión del método

Es necesario validar el modelo de predicción de la distribución de Weibull para garantizar que el modelo que se está aplicando es efectivo, la cual se evaluara con el criterio del menor error.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_1 - y_1)^2 \quad (17-1)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_1 - y_1)^2 \right]^{1/2} \quad (18-1)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_1 - y_1| \quad (19-1)$$

Donde:

y_i = Es el dato actual

\hat{y}_1 = Dato pronosticado aplicando la distribución Weibull

N = Número de observaciones

1.1.6. Potencial eólico

Para calcular el potencial eólico $P(v)$, se mide en W/m^2 y se define como el flujo de aire o energía cinética del viento por unidad de tiempo (potencia) y unidad de área de una masa de aire que se mueve con rapidez, se aplica la ecuación.

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (20-1)$$

Donde:

ρ = Densidad del aire kg/m^3

v = Velocidad del viento m/s

1.1.7. Velocidad de viento más probable

Es la velocidad de viento más probable que se representa en m/s , utilizando los parámetros de forma (k) y el factor de escala (c).

$$V_{mp} = c \left[\frac{k-1}{k} \right]^{1/k} \quad (21-1)$$

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Energías renovables

Según el Centro de Terminología de Catalunya, la energía renovable es aquella energía que se obtiene de fuentes inagotables o que se pueden renovar. Según el Instituto Catalán de Energía las principales fuentes de energía renovables son la energía hidroeléctrica, la energía eólica, la biomasa, la energía solar, la energía geotérmica y las energías del mar. (Jarauta Rovira 2015, p. 8)

1.2.2. Energía eólica

La energía eólica se aprovecha mediante la transformación de la energía cinética del viento en energía eléctrica a través de aerogeneradores. Se utiliza una hélice para transmitir el movimiento que el viento produce en sus palas al rotor de un alternador. Cuando una instalación eólica necesita producir electricidad para verter a la red de distribuciones se agrupan varios aerogeneradores, y dan lugar a los nominados parques eólicos. Si su objetivo es suministrar electricidad a puntos de consumos aislados se utilizan equipos de pequeñas potencias, en general de varias decenas de kilovatios.

Para ser utilizados con mejor eficiencia en una zona determinada, las características del viento deben cumplir una serie de condiciones relativas a velocidad, continuidad, estabilidad, etc. Un dato de gran importancia es la densidad de la potencia del viento, esto quiere decir el valor máximo de la potencia que se puede conseguir por cada unidad de área de barrido por el viento. En concreto, por debajo de los 50 vatios/m² no tiene interés el emplazamiento de instalaciones eólicas; y solo por encima de los 200 vatios/m² comienzan a resultar automáticamente rentables. (Ortiz Aguirre 2020, p. 26)

1.2.3. Recurso eólico

Se entiende por recurso eólico, la energía del viento presente en un lugar puntual o en un terreno o en el mar, que pueda ser aprovechada en la generación de electricidad. La cuantificación del recurso eólico se realiza registrando la velocidad y dirección del viento, la temperatura y otras variables, a diferentes alturas durante un año como mínimo.

El estudio del recurso eólico del lugar donde se prevé instalar uno o varios aerogeneradores es importante ya que su evaluación correcta determina en gran parte el éxito de un proyecto. (Creus 2009, p. 98)

1.2.4. Mapa eólico

Podemos apreciar en el mapa los vientos predominantes existentes a escala mundial, se puede apreciar de forma visual las zonas de mejores características para la aplicación y uso del viento en el aprovechamiento energético. Las zonas que observamos sombreadas son aquellas en que a velocidad media del viento supera los 5 m/s. (Galdiano Hernández 2011, p. 96)

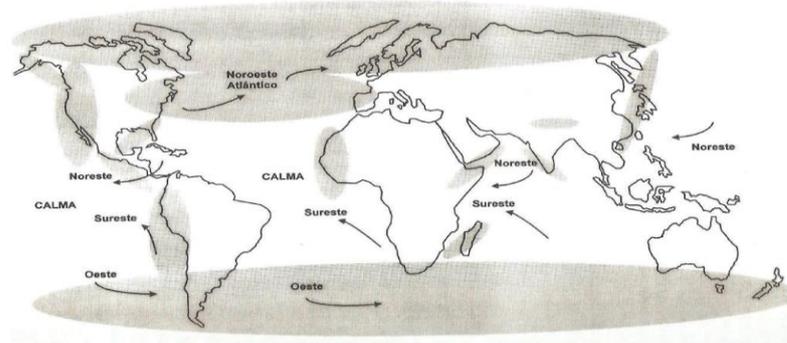


Figura 4-1: Mapa eólico mundial

Fuente: Galdiano Hernández, 2011

1.2.5. Tipos de parques eólicos

Un parque eólico está formado por la agrupación de varios aerogeneradores que gracias a las corrientes de aire se puede transformar en energía eléctrica.

- Parques eólicos offshore: Las tecnologías de generación de energía eléctrica a partir del viento son aquellas que se encuentran ubicadas físicamente, mar adentro, ancladas al fondo marino. En general, son capaces de producir un 50% más de energía que sus pares en tierra logrando obtener en la actualidad hasta 10 MW por generador, por lo que su principal aplicación, es la conexión a la red.
- Parques eólicos onshore: Las instalaciones en tierra de turbinas eólicas en las regiones montañosas, generalmente, se ubican en crestas, casi siempre tres kilómetros o más, tierra adentro desde la costa más cercana. Esto se hace para aprovechar la denominada aceleración topográfica dada cuando el viento acelera sobre una cresta. La velocidad del viento adicional obtenida de esta manera hace una diferencia significativa en la cantidad de energía que se produce. Hay que prestar mucha atención a la posición exacta de las turbinas eólicas, ya que a una diferencia de 30 m a veces puede significar una duplicación de la producción. La tecnología de los aerogeneradores esta apuntada a la construcción de parques a más de 200 m.s.n.m.
- Parques eólicos nearshore: Las instalaciones de turbinas eólicas nearshore están en tierra dentro de los tres kilómetros cercanos a una costa, en el agua adentro de diez kilómetros de

la tierra. Estas áreas sin buenos sitios para la instalación de las turbinas eólicas, debido al viento producido por convección resultante del calentamiento diferencial de la tierra y el mar cada día. Las velocidades del viento en estas zonas comparten la característica de ambas eólicas: Terrestres y marinas, en función de la dirección predominada del viento. (Ortiz Aguirre 2020, p. 39-41)

1.2.6. Impacto ambiental

Los parques eólicos que ocupan grandes extensiones causan impactos ambientales como son: visual, ruido, afectación a la vida animal, caída de rayos.

- Impacto visual: Los aerogeneradores están a una altura del suelo comprendida entre 30 y 50 metros, y disponen de dos a tres palas de 30 a 120 metros de diámetro, que barren una superficie circular de casi $11000 m^2$. Se emplazan en lugares donde la velocidad del viento es alta y constante, es decir en colinas, crestas, altiplanicies, montañas y costas. Su impacto visual es indiscutible, si bien es subjetivo. Este punto depende de la percepción individual con relación a otros elementos del paisaje, la topografía del terreno, la perspectiva, la posibilidad de disparar la vista, la textura y vegetación del terreno, los colores el contraste, las características humanas urbanas o industriales perjudiciales y la separación de los grupos de turbinas.
- Ruido: Las turbinas eólicas producen dos tipos de ruido, mecánico y aerodinámico. La vibración mecánica es producida en la caja de engranajes y en los mecanismos de la transmisión del movimiento de las palas, y presenta distintas tonalidades. El aislamiento de este tipo de ruido es fácil y se logra encerrando los mecanismos en una caja aislante, instalando montajes anti vibratorios y amortiguadores o bien utilizando cajas de engranajes especialmente diseñados para que generen niveles de bajo ruido. El ruido aerodinámico proviene del flujo turbulento del aire al pasar por la superficie de las palas de las turbinas, presentándose en una gama amplia de frecuencia. Sin embargo, el ruido de conmutación está relacionado con los ruidos naturales como el viento soplando a través de los árboles, el ruido aerodinámico se produce en las puntas de las palas y en el borde de fuga de las misas.
- Afección a la vida animal: Puede presentarse en la construcción y en la operación de las turbinas, de modo que es necesaria una planificación cuidadosa para evitar perturbar el hábitat de los animales del entorno, efectuando una valoración ecológica de la flora y fauna.
- Caída de rayos: La descarga de un rayo afecta principalmente a las palas. De aquí que prácticamente todos los aerogeneradores tienen un sistema de protección que dirige el rayo desde la punta de la pala hasta el cubo del rotor, de aquí a la góndola y la torre y después hasta el suelo. (Creus 2009, p. 130)

1.2.7. Ventajas de la energía eólica

La energía eólica tiene muchas ventajas que la hacen una fuente de energía atractiva tanto en gran escala como para pequeñas aplicaciones. Estas ventajas serían:

- **Energía limpia e inagotable:** la energía que es producida por el viento no produce ninguna emisión y no se agota en cierto plazo. Una sola turbina de viento de un megavatio que funcione durante un año puede reemplazar la emisión de más de 1.500 toneladas de dióxido de carbono, 6.5 toneladas de dióxido de sulfuro, 3.2 toneladas de óxidos de nitrógeno y 60 libras de mercurio.
- **Desarrollo económico local:** las plantas eólicas pueden proporcionar un flujo constante de ingresos a los terratenientes que arriendan sus campos para la explotación del viento y un aumento en la recaudación por impuestos territoriales para las comunidades locales.
- **Tecnología modular y escalable:** las aplicaciones eólicas pueden tomar muchas formas, como grandes granjas de viento, generación distribuida, y sistema para uso final. Se pueden utilizar estratégicamente los recursos del viento para ayudar a reducir los riesgos por el aumento en la carga o consumo.
- **Estabilidad del costo de la energía:** la utilización de la energía eólica, a través de la diversificación de las fuentes de energía, reduce la dependencia a los combustibles convencionales que están sujetos a variaciones de precio y volatilidad en su disponibilidad.
- **Reducción en la dependencia de combustibles importados:** La energía eólica no está afectada a la compra de combustibles importados.
- **Su instalación es compatible con otros muchos usos de suelo.** (Galdiano Hernández 2011, p. 96)

1.2.8. Desventajas de la energía eólica

La energía eólica también presenta desventajas que debemos conocer, estos son:

- **No sustituyen totalmente a fuentes de energía no renovables,** necesita apoyo de centrales movidas por otros tipos de energía para estabilizar su producción que sigue las rachas de viento y produce caos en la red de distribución nacional.
- **Los lugares más apropiados para su instalación suelen coincidir con las rutas de las aves migratorias,** o zonas donde las aves aprovechan vientos de ladera, lo que hace que entren en conflicto los aerogeneradores con aves.
- **Dentro del parque eólico se produce contaminación acústica,** esto es debido al ruido que producen. Se ha experimentado recientemente la viabilidad de construir parques eólicos en el mar, no lejos de la costa, pero situadas de tal forma que no indican de forma excesiva sobre el paisaje.

- Impacto paisajista: los aerogeneradores alcanzan alturas de casi cien metros y alteran el paisaje, son muy visibles a grandes distancias. Se tienen que instalar en zonas elevadas o montañosas porque es en estas zonas donde hace más viento para lo que es necesario construir pistas y realizar desmontes, destruyendo la vegetación natural y originando problemas de erosión. También pueden ocasionar incendios ya que atraen los rayos.
- La apertura de pistas y la presencia de operarios en los parques eólicos hace que la presencia humana sea constante y afecta a la fauna que habita estos lugares.(Galdiano Hernández 2011, p. 97,98).

1.2.9. Condiciones para la instalación de la energía eólica

Para un buen rendimiento de los aerogeneradores es necesario hacer un estudio previo del emplazamiento donde estará ubicado, así como cumplir una serie de requisitos. Lo primero que se tiene que hacer es una medición del viento a diferentes alturas y comprobar su dirección y su velocidad. Este primer paso, conocido como la “rosa de los vientos”, deberá de durar como mínimo un año. De esta manera, no solo se podrá conocer cuál será la mejor posición para colocar los aerogeneradores, sino también servirá para corroborar que la ubicación es adecuada para instalar un parque eólico.

Una vez que se ha hecho el estudio del viento, será necesario tener en cuenta algunos aspectos relacionados con el entorno. En este sentido, se debe de respetar la avifauna del entorno, mantener la lejanía de los parques eólicos, instalar los aerogeneradores en el suelo no urbanizable, así como evitar la interferencia con señales electromagnéticas del entorno, como señales generadas por torres de telefonía, radio o televisión.(Twenergy 2019)

1.2.10. Aerogenerador

Un aerogenerador es el dispositivo que transforma la energía cinética contenida en el viento en energía eléctrica en las condiciones idóneas para ser utilizada. El diseño y uso de los mismos es variado, adaptándose a diferentes requerimientos; abarcan un rango muy amplio de dimensiones y tecnologías, pudiendo transformar la energía del viento en energía mecánica para uso directo o posteriormente eléctrica o bien directamente convertir la energía cinética en eléctrica.(Talayero Navales y Telmo Martínez 2017, p. 69)

1.2.11. Energía eléctrica en el Ecuador.

En 2020, la potencia nominal a nivel nacional fue 8.712,29 MW; de los cuales, 5.299,09 MW (60.82%) corresponden a centrales con fuentes de energía renovable y 3.413,21 MW (39.18%) a

centrales con fuentes de energías no renovables.

Las fuentes de energía renovables que aprovecho el país para la generación de electricidad en 2020 fueron: hidráulica, biomasa, fotovoltaica, eólica y biogás.

(Espinoza 2020, p. 27)

Tabla 1-1: Potencia de centrales de generación con fuentes de energía renovable

Tipo Central	Provincia	Potencia Nominal (MW)	Potencia Efectiva (MW)
Biomasa	Cañar	29.80	27.60
	Guayas	114.50	108.80
	Total Biomasa	144.30	136.40
Eólica	Galápagos	4.65	4.65
	Loja	16.50	16.50
	Tota Eólica	21.15	21.15
Hidráulica	Azuay	2.042,49	2.067,39
	Bolívar	8.00	8.00
	Cañar	32.33	32.33
	Carchi	5.82	5.14
	Chimborazo	16.33	16.04
	Cotopaxi	47.39	45.27
	Guayas	213.00	213.00
	Imbabura	75.45	76.61
	Los Ríos	57.57	56.20
	Morona Santiago	138.01	137.52
	Napo	1.557,50	1.532,65
	Pichincha	152.85	150.55
	Sucumbíos	64.30	64.30
	Tungurahua	505.30	476.76
	Zamora Chinchipe	182.40	182.40
Total Hidráulica	5.098,75	5.064,16	
Fotovoltaica	Cotopaxi	2.00	2.00
	El Oro	5.99	5.99
	Galápagos	2.60	2.60
	Guayas	3.98	3.98
	Imbabura	4.00	3.99
	Loja	5.99	5.12
	Manabí	1.50	1.49
	Morona Santiago	0.37	0.37
	Pastaza	0.20	0.20
	Pichincha	1.00	1.00
Total Fotovoltaica	27.63	26.74	
Biogás	Azuay	1.06	1.00
	Pichincha	6.20	5.50

Total Biogás	7.26	6.50
Total, General	5.299,09	5.254,95

Fuente: Atlas Ecuador, 2020.

Realizado por: Esparza, D, 2022.

1.2.12. Energía eólica en el Ecuador

En octubre de 2007 se inauguró el parque eólico de las Galápagos, en la isla San Cristóbal, con una potencia eólica instalada de 2.4 MW y una producción anual estimada de 3.2 GW. El parque eólico se encuentra ubicado en el Cerro El Tropezón, construidos por 3 aerogeneradores de 800 kW. (Burbano y Narváez 2021, p. 31)

El proyecto tiene un financiamiento de 9.755.716,21 USD, está conformado principalmente por donaciones internacionales de la Fundación de las Naciones Unidas (UNF), impuestos a la renta, y con recursos FERUM (Fondo de Electrificación Rural y Urbano Marginal) por intermedio de ELECGALÁPAGOS S.A. (Solís Gallo 2011, p. 7)

La Central Eólica Villonaco de 16.5 MW de potencia se encuentra ubicado en la provincia de Loja. Inicio su construcción en agosto de 2011 y se encuentra operando de forma normal y continua sobre la base de los requerimientos del sistema eléctrico ecuatoriano desde el 2 de enero de 2013, aportando al S.N.I. una energía neta de 643.66 GWh desde su entrada en operación. Villonaco cuenta con 11 aerogeneradores de tipo GW70/1500 de 1.5 MW cada uno, con una velocidad promedio anual de 12.7 m/s a una altitud de 2700 msnm. La central se desarrolla a lo largo de la línea de cumbre del cerro Villonaco con una distancia aproximada de 2 km. (Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables 2019)

1.2.13. Viento

El viento es el aire en movimiento, a escalas globales se debe a las diferencias de temperatura que provoca la radiación solar sobre las distintas partes del globo terrestre. Las diferencias de densidad y presión originadas por estas variaciones de temperatura son la causa del movimiento de las masas de aire. (Villarrubia 2013, p. 32). La velocidad del viento es el resultado de la acción de fuerzas de origen diverso: gravedad, gradiente de presión o fuerza bórica, Coriolis y rozamiento. El gradiente de presión crea el movimiento de las masas de aire. Cuanto mayor sea su valor, también lo será la velocidad del viento. Por lo tanto, cuanto más próximas se encuentren las isobaras, el viento tendrá mayor intensidad. El gradiente horizontal de presiones se determina en los mapas por medio de las isobaras. También se utilizan las isohipsas que son líneas de alturas que tienen la misma presión. (Villarrubia 2013, p. 33)

1.2.14. Velocidad del viento

La velocidad del viento \bar{v} es una magnitud vectorial, aunque el vector velocidad \bar{v} tiene tres componentes en aplicaciones de energía eólica solo se consideran las componentes en el plano horizontal. La velocidad del viento se caracteriza por dos valores: el módulo de la componente de la velocidad en el plano horizontal (denominada velocidad o intensidad del viento) y la dirección de donde sopla. La velocidad del viento se mide en: metros por segundo (m/s), kilómetros por hora (km/h) o nudos.

1.2.15. Tipos de viento

1.2.15.1. Vientos planetarios

Estos vientos suceden debido al movimiento de rotación terrestre, ocupan una gran extensión de la superficie de la tierra. Estos vientos se clasifican en tres partes:

- Vientos alisios comprenden una zona que va desde los trópicos hacia el Ecuador. Al ser su recorrido lo bastante extenso como para atravesar gran cantidad de superficie oceánica, cargan con bastante humedad que resulta en lluvias. El movimiento por el que se rigen es el de rotación de la Tierra, que determina su dirección -constante-, que puede ser noroeste o sudoeste.
- Vientos contralisios también comprenden desde los trópicos, pero, a diferencia de los vientos alisios, los vientos contralisios se dirigen hacia los círculos polares. Estos vientos son cálidos, aunque guardan una gran cantidad de humedad y también provocan lluvias.
- Vientos circumpolares circulan desde los polos de la Tierra, hacia los círculos polares. Esto resulta en que sean vientos muy fríos, que se originan en la inclinación del eje de la Tierra. («Tipos de vientos» 2018).

1.2.15.2. Vientos regionales

Son aquellos en los que su dirección no permanece constante, sino que cambia de acuerdo con las estaciones del año, aunque a veces también pueden cambiar dependiendo el momento del día, y les da la característica de periodicidad.

- Brisas, por ejemplo, llevan como acompañamiento el lugar en el que se originan (oceánicas, continentales, etcétera). Las brisas oceánicas se producen en todas las costas del mundo y se caracterizan por inducir una gran diferencia de temperatura. Las brisas continentales son típicas de regiones más alejadas de las corrientes marinas, y cambian de dirección entre el día y la noche.

- Ciclones, temidos ya por su nombre, se originan en torno a áreas de presión atmosférica baja, lo que atrae vientos con masas de aire más calientes que ascienden al estar en una temperatura más elevada que su entorno. Esto produce vientos arremolinados que, por lo general, son húmedos y cálidos. Existen clasificaciones de ciclones, entre los que destacamos los térmicos y los dinámicos.
- Anticiclones son característicos en áreas de presión atmosférica alta y que expulsan vientos de aire que desciende. De igual manera que los ciclones, estas reacciones pueden darse por cuestiones térmicas o dinámicas, lo que diferencia entre que provoque una catástrofe o no.
- Monzones se observan al cambiar de temperatura más rápido que el agua. Esto se da porque en verano el aire provoca un área de presión atmosférica baja, como resultado del aire que empieza a ascender sobre la superficie terrestre. Esto da origen a la formación de un ciclón estacional que hace que el viento, en verano, sople de sur a norte y llegue con gran cantidad de lluvias. En invierno, los vientos proceden del interior y son secos y fríos. («Tipos de vientos» 2018)

1.2.16. Escala Beaufort

Esta escala tiene un origen marino, fue adoptada oficialmente por el almirantazgo británico en 1848 y aún sigue utilizándose actualmente.

Tabla 2-1: Escala Beaufort de intensidades de viento.

Grados Beaufort	V (km/h)	V(m/s)	V(nudos)	Descripción	Presión sobre superficie plana (N/m ²)	
0	1	0 - 0.4	1	Calma		
1	1 - 5	0.5 - 1.5	1 - 3	Brisa muy ligera	1.3	1 m/s
2	6 - 11	1.6 - 3.4	4 - 6	Brisa ligera	8	2.5 m/s
3	12 - 19	3.5 - 5.5	7 - 10	Pequeña brisa	32	5 m/s
4	20 - 28	5.6 - 8.0	11 - 16	Moderado	64	7 m/s
5	29 - 38	8.1 - 10.9	17 - 21	Fresco	130	10 m/s
6	39 - 49	11.4 - 13.9	22 - 27	Fuerte (Bonancible)	220	13 m/s
7	50 - 61	14.1 - 16.9	28 - 33	Fuerte (Muy fresco)	330	16 m/s
8	62 - 74	17.4 - 20.4	34 - 40	Duro (Golpe de viento)	520	20 m/s
9	75 - 88	20.5 - 23.9	40 - 47	Muy duro	690	23 m/s
10	89 - 102	24.4 - 28.0	48 - 55	Tempestad	950	27 m/s
11	103 - 117	28.4 - 32.5	56 - 63	Fuerte tempestad	1117	30 m/s
12	118 - 133	32.6 - 35.9	64 - 71		1600	35 m/s
13	134 - 149	36.9 - 40.4	72 - 80		2080	40 m/s
14	150 - 166	40.1 - 45.4	81 - 89	Huracán	2650	45 m/s
15	167 - 183	45.1 - 50.0	90 - 99		3250	50 m/s

16	184 - 201	50.1 - 54.0	100 - 108		3650	54 m/s
17	202 - 220	54.1 - 60	109 - 118	Ciclón	4700	60 m/s

Nota: 1 nodo = 1 milla marina/hora = 1852 km/h = 0.5144 m/s

Fuente: Miguel Villarrubia, 2013.

Realizado por: Esparza, D, 2022.

Tabla 3-1: Criterios de apreciación de la intensidad del viento en la escala Beaufort

Grados Beaufort	En el mar	En la tierra
0	Mar en calma.	El humo se eleva verticalmente.
1	Formación de indas con aspecto de escamas, pero sin cresta de espuma.	El viento inicia el humo, pero no hace girar las veletas.
2	Olas muy pequeñas. Crestas sin romper de aspecto vidrioso.	Movimiento de hojas. El aire se siente en el rostro.
3	Pequeñas olas. Se inicia la rotura de crestas. Espuma vidriosa. Aparición de espuma de olas diseminada.	Movimiento continuo de hojas y ramas pequeñas.
4	Alargamiento de olas cortas. Espuma de olas más densa	Se levanta polvo y hojas. Agitación del ramaje.
5	Pronunciamiento de olas moderadas. Formación de ovillos de espuma.	Movimiento de arbustos y pequeño arbolado.
6	Formación de grandes olas y generalización de crestas de espuma blanca. Brumas	Agitación de grandes ramas. Dificultad para usar el paraguas.
7	El mar crece y la espuma de las olas se difumina en huellas.	Movimiento de árboles. Molestias al caminar de cara al viento.
8	Olas muy altas de gran longitud. Las crestas se pulverizan.	Rotura de pequeñas ramas. Dificultad para caminar.
9	Rotura de olas altas. Huellas de espuma muy densas. Reducción de visibilidad por brumas.	Rotura de ramas medias y grandes.
10	Rotura de olas altas con gran violencia. Superficie del agua blanca. Nula visibilidad.	Caída de árboles. Deterioro de tejados y cubiertas.
11 - 17	Enorme oleaje con tempestad muy intensa. Nula visibilidad. Navegación muy peligrosa o imposible.	Destrozos importantes en edificaciones y obras civiles.

Fuente: Miguel Villarrubia, 2013.

Realizado por: Esparza, D, 2022.

1.2.17. Dirección del viento

Para definir las direcciones predominantes del viento, deben instalarse veletas en todos los niveles de niveles de monitorización significativos. La información sobre la frecuencia de la dirección del viento es importante para identificar las formas y orientaciones preferidas del terreno y para optimizar el uso de las paletas. para identificar las formas y orientaciones

preferidas del terreno y para optimizar la disposición de los aerogeneradores dentro de un parque eólico.(Bailey et al. 1997, p. 14)

1.2.18. Instrumentos de medición del viento

El instrumento que mide la velocidad del viento de manera directa en aplicaciones eólicas es normalmente el anemómetro, siendo el más común el anemómetro de cazoletas. Los diseños actuales de este tipo de instrumento tienen tres cazoletas montadas sobre un pequeño eje. El anemómetro de cazoletas emplea su rotación, que varía en proporción a la velocidad del viento, para generar una señal. Para medir el ritmo de rotación de las cazoletas, se pueden emplear contadores mecánicos, variaciones de voltaje, o interruptores fotoeléctricos. Lo que se obtiene entonces es el desplazamiento creado por el flujo del viento y por tanto la distancia.(MEER 2012, p. 7)



Figura 5-1: Anemómetro

Fuente: MEER

Para medir la dirección del viento normalmente se emplea una veleta. Su forma convencional consta de una cola ancha que el viento mantiene a sotavento de un eje de rotación vertical y de un contrapeso que se mantiene a barlovento y que proporciona el equilibrio necesario para que el instrumento gire lo más libremente posible. En la figura 2 podemos observar que el contrapeso tiene una forma que nos apunta la dirección de la que viene el flujo. La señal de la posición de la veleta se obtiene por contactos de cierre de circuito o a través de potenciómetros.



Figura 6-1: Veleta

Fuente: MEER

1.2.19. Formas de presentación de los datos del viento

Existen diversas formas de presentación de los datos del viento, tomando como un periodo de referencia las 8760 horas que equivale a un año o en el caso de un año bisiesto de 8784 horas.

Datos de viento en forma de tablas o series numéricas

- **Valores promedio durante 10 minutos de la velocidad y dirección instantáneas:** constituye series de gran detalle. Con seis datos por hora, por lo tanto, para un año obtenemos 52,560 valores para cada magnitud.
- **Valores medios horarios de la velocidad y dirección:** se elaboran promedios para cada hora de los seis valores horarios indicados en el punto anterior. Por lo tanto, para un año se obtiene 8,760 observaciones tanto para la velocidad como para la dirección del viento.
- **Valores medios trihorarios de la velocidad y dirección:** Estos se forman a partir de la media trihoraria con los valores mencionados anteriormente, (0, 3, 6, ..., 21) horas de cada día. Por lo tanto, para un año se obtiene 2,920 valores observados de la velocidad y dirección del viento.
- **Valores medios:** diarios (365), decenales (36), mensuales (12) y anual (1) de la velocidad y dirección del viento, se obtienen por medio de los promedios mencionados anteriormente.

Representaciones graficas

- La representación gráfica más usada es la denominada rosa de los vientos. Consiste en un diagrama polar en el cual se definen para diferentes direcciones o rumbos distintos valores relacionados con la velocidad y dirección del viento. El número de rumbos, cuyos valores principales se hacen corresponder con los puntos cardinales, suele ser 8, 12 o 16. El porcentaje de calmas se indica en el centro del diagrama. La rosa de los vientos permite representar las direcciones dominantes de los vientos. En general, no coincide la dirección dominante con la mayor intensidad del viento ya que en muchos casos los vientos más intensos no son los que soplan más horas al año procedentes de una determinada dirección. Este es un aspecto importante a tener en cuenta para una correcta colocación de los aerogeneradores. (Villarrubia 2013, p. 53-54)

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Tipo y Diseño de la Investigación

La investigación según:

- La manipulación de las variables es un diseño no experimental, ya que en el estudio los datos se han obtenido a través de los registros anuales de las estaciones meteorológicas que se encuentran en los archivos del Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA).
- Según el modelo de investigación es cuantitativo ya que las variables a analizadas son: Viento y Dirección del viento
- El estudio se encuentra de forma exploratorio puesto que se ha logrado un primer acercamiento a la problemática mediante la búsqueda de artículos relacionados.
- El periodo temporal es longitudinal dado que se manejó datos en un periodo de 3 años, que van desde enero de 2018 hasta diciembre de 2020.
- El método de estudio es inductivo ya que con la información que se obtuvo de las estaciones se pretende determinar los parámetros de forma k y los parámetros de escala c de la distribución Weibull, para la energía eólica.

2.2. Localización del área de estudio

El presente estudio se ejecutó con información presentada por el Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA), de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, con los datos registrados de las estaciones meteorológicas.

Tabla 4-2: Ubicación de las estaciones meteorológicas de la Provincia de Chimborazo

Estación Meteorológica	Ubicación	Altitud (msnm)	Latitud	Longitud
Lomas de Rasutambo	Cantón	4302	1°32'0.43"S	78°52'40.27"O
Zona Pinanquil (El Arenal)	Riobamba			
San Juan	Cantón San Juan	4328	1°37'35"S	78°47'0"O

Fuente: GEAA- ESPOCH

Realizado por: Esparza, D, 2022

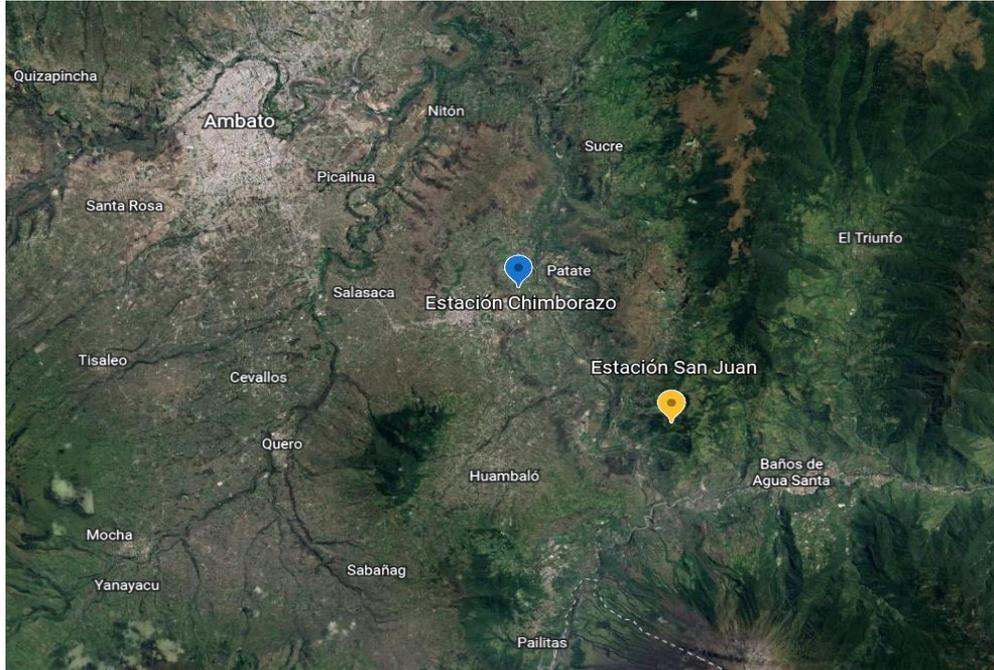


Figura 7-2: Ubicación de las Estaciones Meteorológicas

Fuente: GEAA-ESPOCH

2.3. Población de estudio

La investigación se realizó con los 2.192 datos registrados por día de la variable velocidad y dirección del viento, durante el periodo 2018-2020, de las estaciones meteorológicas Lomas de Rasutambo y la estación San Juan.

2.4. Recolección de la información

La información se obtuvo a través de los registros de las estaciones meteorológicas que son archivadas por el GEAA.

2.5. Operacionalización de las variables

Tabla 5-2. Operacionalización de las variables

Abreviación	Variable	Tipo/Escala
VV	Velocidad del viento	Cuantitativa/Razón
DV	Dirección del viento	Cuantitativa/Razón

Fuente: GEAA-ESPOCH

Elaborado por: Esparza, D, 2022

2.6. Análisis Estadístico

2.6.1. Instrumento de procesamiento y análisis de información

La presente investigación se realizó a través del software estadístico R (4.1.1) mediante su interfaz RStudio para el análisis, donde se hizo uso de las siguientes librerías:

- library(openxlsx)
- library(readr)
- library(readxl)
- library(xlsx)
- library(openair)
- library(fdth)
- library(tsoutliers)
- library(openair)
- library(plyr)

2.6.2. Análisis exploratorio

La matriz de información se obtuvo de los archivos .xlsx: DATOS VIENTO 2018_L3171231-L3180726, DATOS VIENTO 2019_L3181231- L3191271, DATOS METEREOLÓGICOS CHIMBORAZO 2020, correspondientes a la estación meteorológica Lomas de Rasutambo, y los archivos .xlsx: L2180101-L2181212, L218220-L2181231, L2190101-L2191231, L2200101-L2201231, correspondientes a la estación meteorológica San Juan. Se realizó un nuevo archivo de Excel denominados DATOS VIENTO CHIMBORAZO y DATOS VIENTO SAN JUAN, creado así un proyecto en Rstudio con sus respectivos R script para cada estación estudiada.

2.6.2.1. Rosa de los vientos

Consiste en un diagrama polar en el cual se definen para diferentes direcciones o rumbos distintos valores relacionados con la velocidad y dirección del viento. (Villarrubia López 2013). Utilizando la librería “library(openair)” con la función “windrose()” se obtuvo la gráfica de la rosa de los vientos utilizando las variables velocidad y dirección del viento para las estaciones Chimborazo y San Juan en los años 2018, 2019 y 2020.

2.6.2.2. Datos atípicos

La determinación de datos atípicos en meteorología es de fundamental importancia pues permiten observar sucesos importantes del comportamiento de los fenómenos físicos. Para el análisis de datos atípicos se utilizó el diagrama de cajas mediante el código “boxplot()” sin la manipulación de los datos, el cual nos permitió encontrar como resultado una cantidad pequeña de datos atípicos que han sido separados al no encontrar explicaciones, para corroborar estos resultados también se utilizó el código que se encuentra en el anexo D.

2.6.2.3. Análisis estadístico del viento

Para el registro de la velocidad del viento se ha utilizado el código “summary()”, el cual nos muestra los estadísticos descriptivos de la base de datos, la serie temporal para las estaciones estudiadas, en un total de 365 días para los años 2018, 2019 y para el año 2020 de 366 días, dado que fue año bisiesto.

2.6.2.4. Imputación de datos

Los valores faltantes en los conjuntos de datos nos presentan un problema conocido, existe un buen número de paquetes R que ofrecen funciones de imputación. La imputación de series temporales univariadas usando R ofrecen una amplia gama de herramientas para contrarrestar dicho problema.

Se ha utilizado la “library(forecast)”, con la función “na.interpf()” donde cualquier valor faltante es reemplazado por el más reciente y no NA valor anterior, este método supone que el resultado no cambia después del último valor observado.

2.6.2.5. Distribución de Weibull

Para el cálculo de los parámetros de la distribución de Weibull mediante el método de cuadrados mínimos se creó una tabla de frecuencias con el código que se encuentra en el anexo F, en el método de máxima verosimilitud se creó una función propia denominada “maxv()” el cual se puede observar en el anexo G y para el método empírico se utilizó la media y la desviación estándar de cada año con el código que se encuentra en el anexo H.

Para la función de densidad de probabilidad y las distribuciones acumulativas y acumulativas complementarias se utilizaron los códigos que se encuentran en el anexo I y anexo J.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Representación de los datos

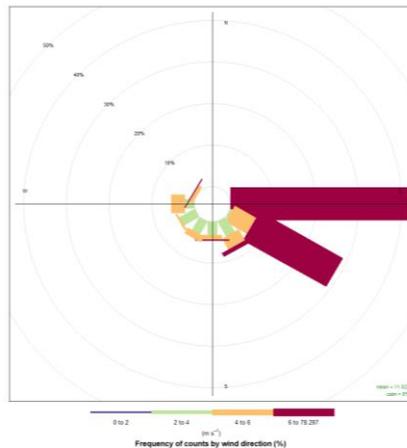


Gráfico 1-3: Rosa de los vientos EM Chimborazo 2018.

Realizado por: Esparza, D, 2022

En el (gráfico 1-3) de la estación meteorológica Chimborazo año 2018 con un total de 365 días, con un valor medio de 11.02 m/s, existió una mayor velocidad del viento en un intervalo de 6 a 78.28 m/s en dirección al este, sureste, sur y noreste, una velocidad media de 4 a 6 m/s con dirección sureste, sur, suroeste, oeste y noreste y una velocidad mínima en el intervalo de 2 a 4 m/s con dirección sureste, sur, suroeste y oeste.

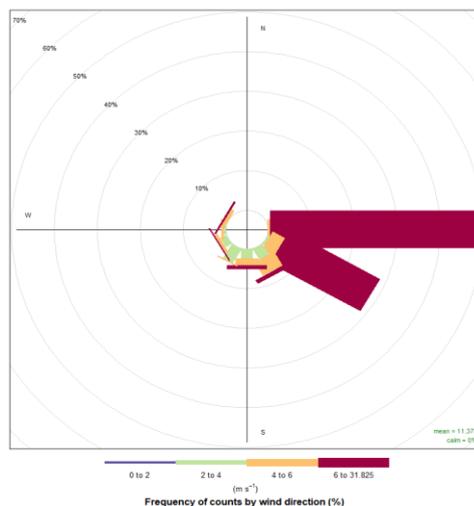


Gráfico 2-3: Rosa de los vientos EM Chimborazo 2019.

Realizado por: Esparza, D, 2022

Para el año 2019 con un total de 365 días en la estación meteorológica Chimborazo (gráfico 2-3), con un valor medio de 11.37 m/s, existió una mayor velocidad de viento en el intervalo de 6 a 31.85 m/s con dirección al este, sureste, sur, suroeste y noroeste, una velocidad media en el intervalo de 4 a 6 m/s en dirección al sureste, sur, suroeste y noroeste y una velocidad mínima en el intervalo de 2 a 4 m/s en dirección sureste, sur y suroeste.

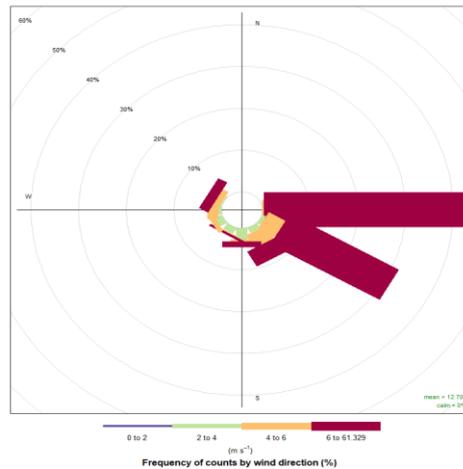


Gráfico 3-3: Rosa de los vientos EM Chimborazo 2020.

Realizado por: Esparza, D, 2022

En el (gráfico 3-3) para la estación meteorológica Chimborazo en el año 2020 con un total de 366 días debido a que fue año bisiesto, con un valor medio de 12.70 m/s, existió un intervalo de velocidades altas en el intervalo de 6 a 61.32 m/s, en dirección al este, sureste, sur, suroeste y noroeste, un intervalo de velocidades medias de 4 a 6 m/s en dirección sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste y un intervalo de velocidades mínimas de 2 a 4 m/s en dirección sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste.

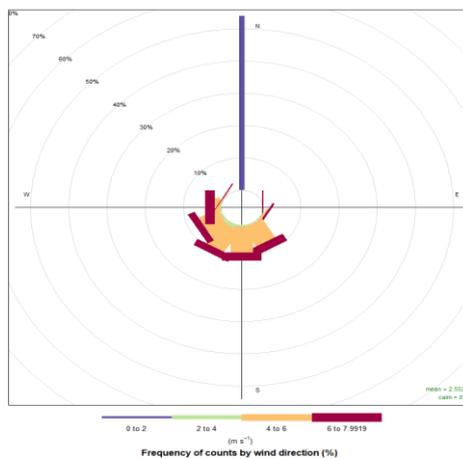


Gráfico 4-2: Rosa de los vientos EM San Juan 2018.

Realizado por: Esparza, D, 2022

En el (gráfico 3-4) que corresponde a la estación meteorológica San Juan del año 2018 habiendo un total de 365 días, con una velocidad media de 2.55 m/s, presentó velocidades de viento mínimas en el intervalo de 0 a 2 m/s con dirección al Norte, los vientos medios en un intervalo de 4 a 6 m/s con dirección sureste, sur, suroeste, oeste, y los vientos máximos en el intervalo de 6 a 7.99 m/s con dirección desde el sureste, sur, suroeste y oeste.

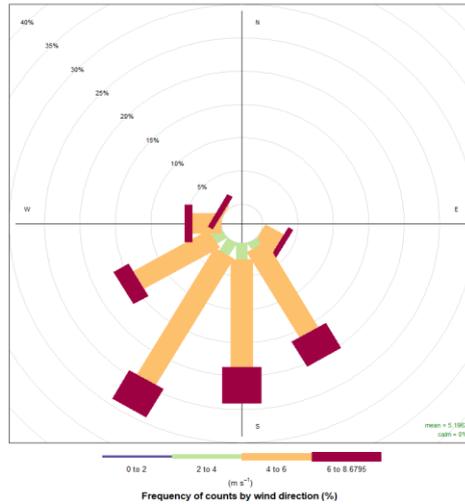


Gráfico 5-3: Rosa de los vientos EM San Juan 2019.

Realizado por: Esparza, D, 2022

Para el año 2019 con un total de 365 días en la estación meteorológica San Juan (gráfico 5-3), con un valor medio de 5.19 m/s, presento velocidades mínimas en el intervalo de 2 a 4 m/s con dirección sureste, sur, suroeste y oeste, las velocidades medias en un intervalo de 4 a 6 m/s, con dirección sureste, sur, suroeste y oeste, y un intervalo de velocidades máximas de 6 a 6.67 m/s, con dirección sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste.

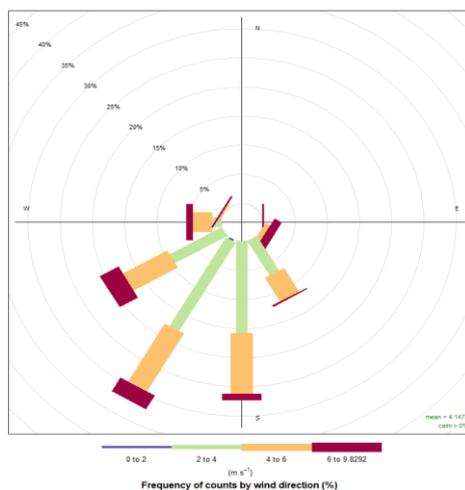


Gráfico 6-3: Rosa de los vientos EM San Juan 2020.

Realizado por: Esparza, D, 2022

En el (gráfico 6-3) para el año 2020 en la estación meteorológica San Juan en un total de 366 días, con una velocidad media de 4.14 m/s, se observó velocidades mínimas en el intervalo de 2 a 4 m/s con dirección sureste, sur, suroeste y oeste, las velocidades medias en un intervalo de 4 a 6 m/s, en dirección sureste, sur, suroeste y oeste, y las velocidades de vientos máximas en el intervalo de 6 a 9.8 m/s con dirección este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste.

3.2. Datos atípicos univariantes

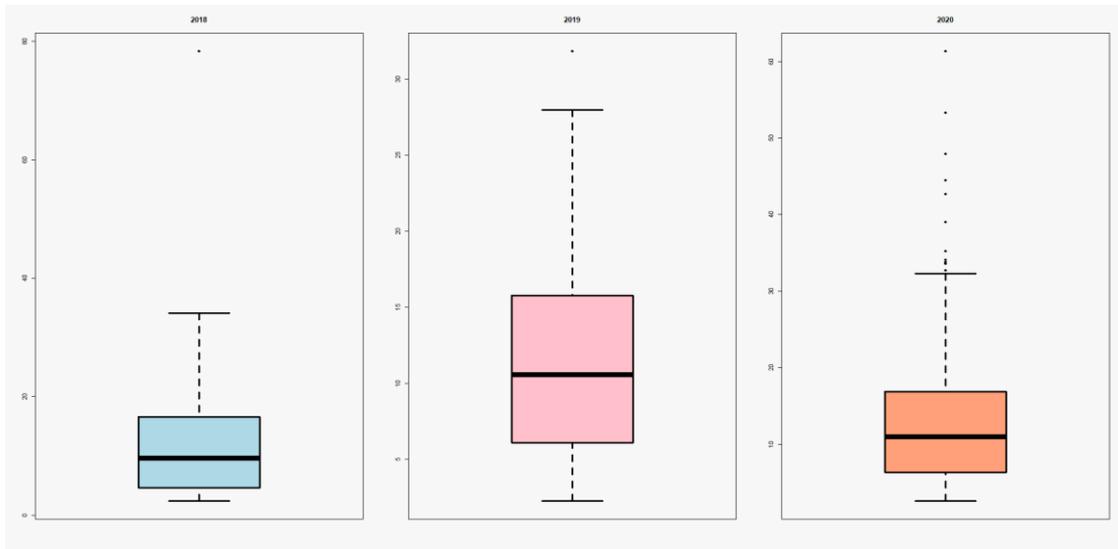


Gráfico 7-3: Visualización de datos anómalos EM Chimborazo.

Realizado por: Esparza, D, 2022

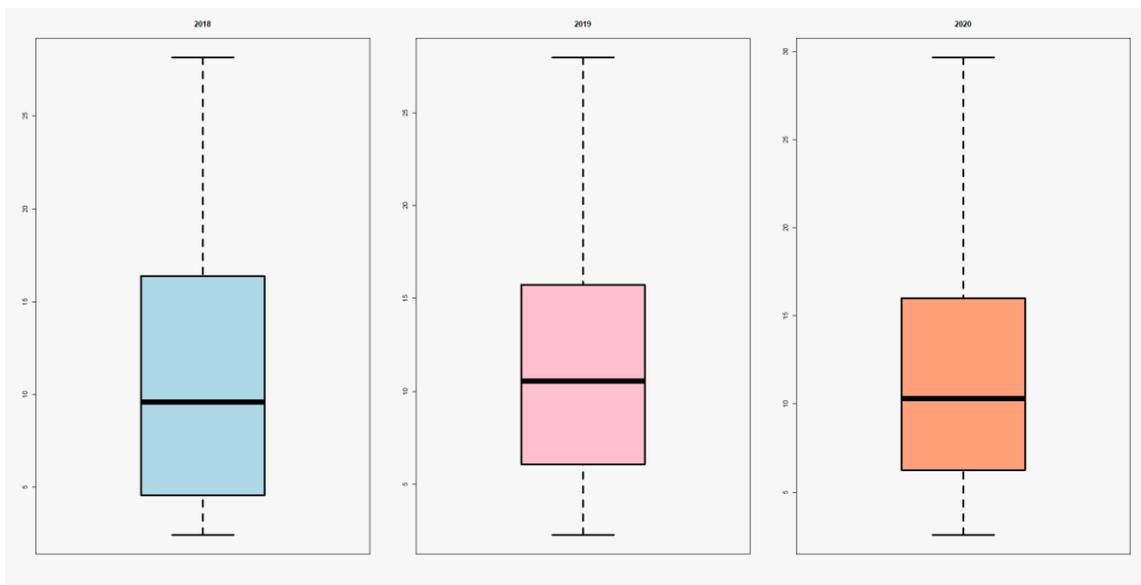


Gráfico 8-3: Base de datos sin datos anómalos EM Chimborazo.

Realizado por: Esparza, D, 2022

Para el año 2018 se observó dos datos anómalos (grafico 7-3) mientras que en el año 2019 se

encontró un dato anómalo y para el año 2020 15 datos anómalos, los cuales han sido separados de la base de datos para estudios posteriores. En el (gráfico 8-3) se visualiza los datos de la velocidad del viento después de aplicar la ecuación MAD, obteniendo una base de datos libre de datos anómalos.

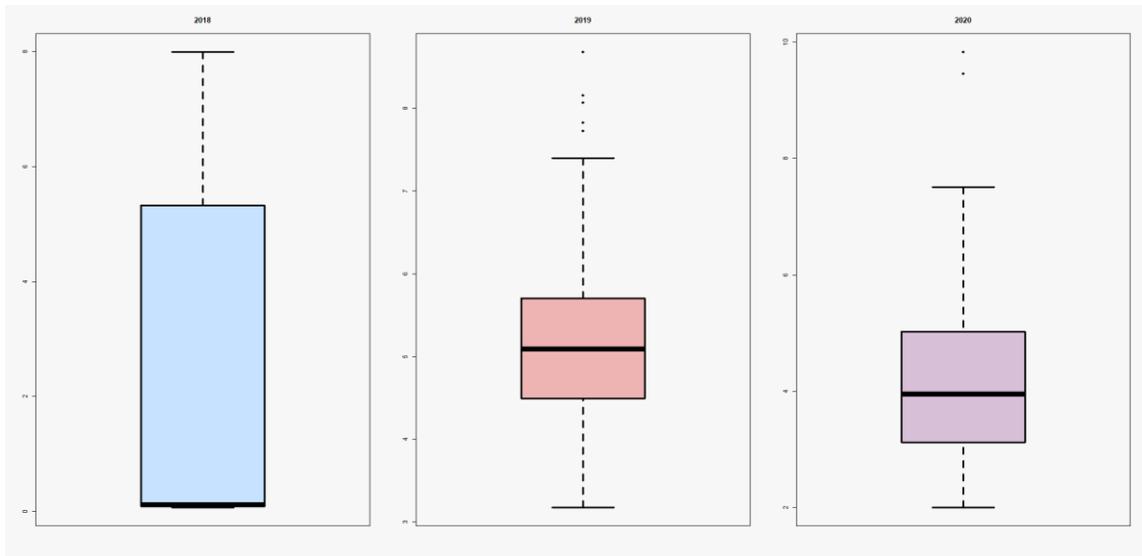


Gráfico 9-2: Diagrama de caja Velocidad de viento EM San Juan.

Realizado por: Esparza, D, 2022

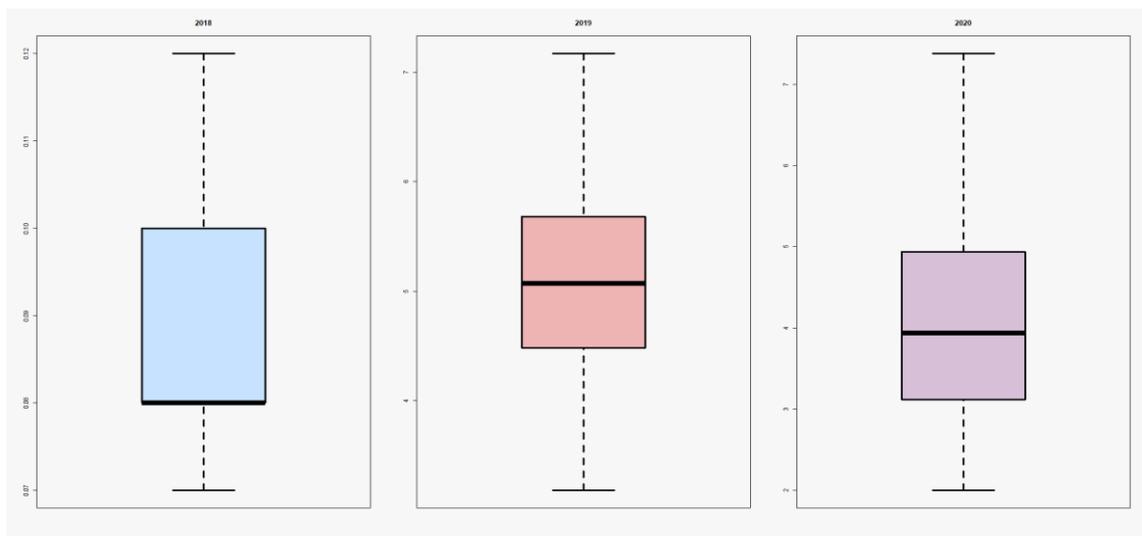


Gráfico 10-3: Diagrama de caja Velocidad de viento EM San Juan 2018.

Realizado por: Esparza, D, 2022

Para el año 2018 se observó dos datos anómalos (gráfico 10-3) mientras que en el año 2019 se encontró un dato anómalo y para el año 2020 15 datos anómalos, los cuales han sido separados de la base de datos para estudios posteriores. En el (gráfico 8-3) se visualiza los datos de la velocidad del viento después de aplicar la ecuación MAD, obteniendo una base de datos libre de datos anómalos.

3.3. Análisis estadístico del viento

Tabla 6-3: Estadísticos descriptivos EM Chimborazo

Descriptivos	AÑO	AÑO	AÑO
	2018	2019	2020
Mínimo (m/s)	2.42	2.62	2.57
Primer Cuartil (m/s)	4.62	6.10	6.33
Mediana (m/s)	9.63	10.57	10.98
Media (m/s)	11.02	11.37	12.70
Tercer cuartil (m/s)	16.63	15.77	16.85
Máximo	78.28	31.82	61.32

Realizado por: Esparza, D, 2022

De acuerdo con la (Tabla 6-3) de la estación meteorológica Chimborazo se obtuvo los estadísticos descriptivos, de los cuales se puede decir lo siguiente:

Año 2018, se obtuvo un valor mínimo de 2.42 m/s, un pico máximo de 78.28 m/s y una velocidad media de 11.02.

Año 2019, se tuvo un valor mínimo de 2.62 m/s, un pico máximo de 31.82 m/s y una velocidad media de 11.37 m/s.

Año 2020, se obtuvo un valor mínimo de 2.57 m/s, un pico máximo de 61.32 m/s, y una velocidad promedio de 12.70 m/s.

Tabla 7-3: Estadísticos descriptivos EM San Juan

Descriptivos	AÑO	AÑO	AÑO
	2018	2019	2020
Mínimo (m/s)	0.06	3.17	1.99
Primer Cuartil (m/s)	0.08	4.49	3.12
Mediana (m/s)	0.11	5.09	3.94
Media (m/s)	2.55	5.19	4.14
Tercer cuartil (m/s)	5.32	5.70	5.00
Máximo	7.99	8.67	9.82

Realizado por: Esparza, D, 2022

De acuerdo con la (Tabla 7-3) de la estación meteorológica San Juan se obtuvo los estadísticos descriptivos, de los cuales se puede decir lo siguiente:

Año 2018, se obtuvo un valor mínimo de 0.06 m/s, un pico máximo de 7.99 m/s y una velocidad media de 2.55 m/s.

Año 2019, se tuvo un valor mínimo de 3.17 m/s, un pico máximo de 8.67 m/s y una velocidad media de 5.19 m/s.

Año 2020, se obtuvo un valor mínimo de 1.99 m/s, un pico máximo de 9.82 m/s, y una velocidad promedio de 4.14 m/s.

3.4. Distribución de frecuencia

En cuanto a la creación de las tablas de distribución de frecuencias para la estación meteorológica Chimborazo se ha establecido que los límites de clase empiece con el valor de la velocidad mínima 2 m/s con una anchura de 1 m/s, hasta llegar al valor de la velocidad media más alta.

En las **Tablas 8-3, 9-3 y 10-3** se encuentran la distribución de frecuencias para los años estudiados, los cuales posteriormente los representaremos en histogramas, donde el eje X representa la velocidad del viento en m/s y el eje Y son los porcentajes de medición de la velocidad correspondiente a cada año.

Tabla 8-3: Distribución de Frecuencias EM. Chimborazo 2018.

Class limits	f	rf	rf(%)	cf	cf(%)
[2,3)	10	0.03	2.75	10	2.75
[3,4)	55	0.15	15.15	65	17.91
[4,5)	34	0.09	9.37	99	27.27
[5,6)	25	0.07	6.89	124	34.16
[6,7)	14	0.04	3.86	138	38.02
[7,8)	16	0.04	4.41	154	42.42
[8,9)	17	0.05	4.68	171	47.11
[9,10)	18	0.05	4.96	189	52.07
[10,11)	23	0.06	6.34	212	58.40
[11,12)	12	0.03	3.31	224	61.71
[12,13)	11	0.03	3.03	235	64.74
[13,14)	9	0.02	2.48	244	67.22
[14,15)	12	0.03	3.31	256	70.52
[15,16)	14	0.04	3.86	270	74.38
[16,17)	13	0.04	3.58	283	77.96
[17,18)	15	0.04	4.13	298	82.09
[18,19)	11	0.03	3.03	309	85.12
[19,20)	17	0.05	4.68	326	89.81
[20,21)	13	0.04	3.58	339	93.39
[21,22)	4	0.01	1.10	343	94.49
[22,23)	2	0.01	0.55	345	95.04
[23,24)	11	0.03	3.03	356	98.07
[24,25)	4	0.01	1.10	360	99.17
[25,26)	0	0.00	0.00	360	99.17
[26,27)	1	0.00	0.28	361	99.45
[27,28)	1	0.00	0.28	362	99.72
[28,29)	1	0.00	0.28	363	100.00

Realizado por: Esparza, D, 2022

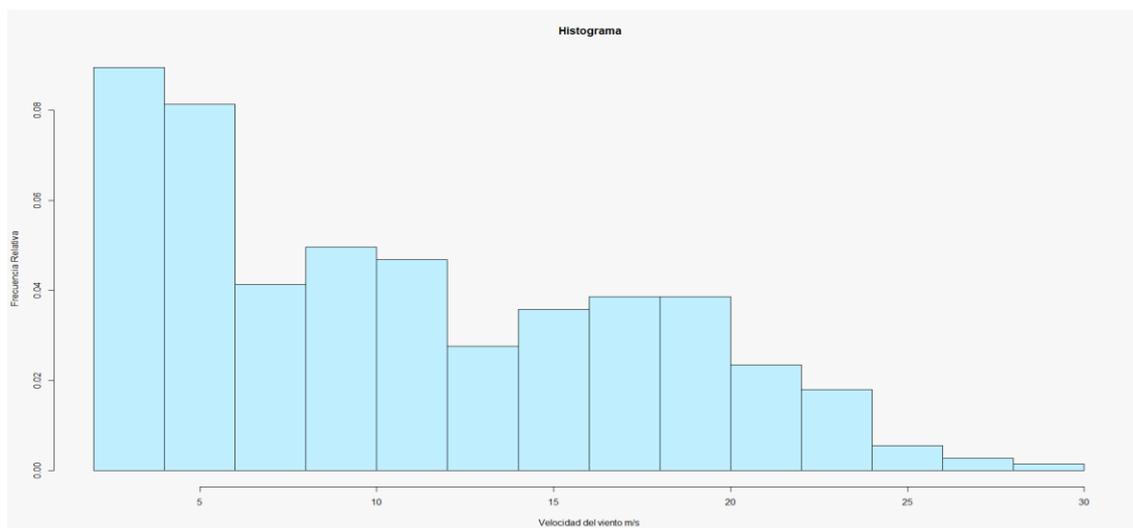


Gráfico 11-3: Histograma velocidad del viento EM Chimborazo 2018

Realizado por: Esparza, D, 2022

En la Gráfica (11-3) se visualizó que la velocidad del viento más bajo es de alrededor de 2 m/s y el más alto es de aproximadamente 29 m/s. La frecuencia de clase más alta va de 3 m/s hasta 4 m/s.

Tabla 9-3: Distribución de Frecuencia EM Chimborazo 2019.

Class limits	f	rf	rf(%)	cf	cf(%)
[2,3)	10	0.03	2.75	10	2.75
[3,4)	35	0.10	9.62	45	12.36
[4,5)	30	0.08	8.24	75	20.60
[5,6)	14	0.04	3.85	89	24.45
[6,7)	18	0.05	4.95	107	29.40
[7,8)	24	0.07	6.59	131	35.99
[8,9)	22	0.06	6.04	153	42.03
[9,10)	19	0.05	5.22	172	47.25
[10,11)	23	0.06	6.32	195	53.57
[11,12)	20	0.05	5.49	215	59.07
[12,13)	23	0.06	6.32	238	65.38
[13,14)	13	0.04	3.57	251	68.96
[14,15)	14	0.04	3.85	265	72.80
[15,16)	12	0.03	3.30	277	76.10
[16,17)	10	0.03	2.75	287	78.85
[17,18)	8	0.02	2.20	295	81.04
[18,19)	13	0.04	3.57	308	84.62
[19,20)	12	0.03	3.30	320	87.91
[20,21)	14	0.04	3.85	334	91.76
[21,22)	13	0.04	3.57	347	95.33
[22,23)	7	0.02	1.92	354	97.25
[23,24)	2	0.01	0.55	356	97.80
[24,25)	0	0.00	0.00	356	97.80

[25,26)	1	0.00	0.27	357	98.08
[26,27)	4	0.01	1.10	361	99.18
[27,28)	3	0.01	0.82	364	100.00

Realizado por: Esparza, D, 2022

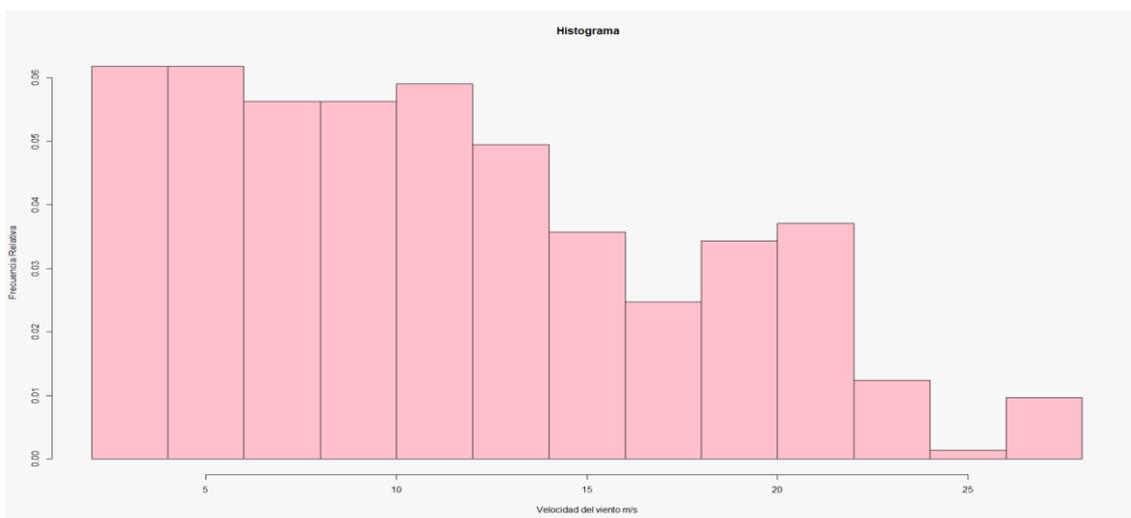


Gráfico 12-3: Histograma velocidad del viento EM Chimborazo 2019

Realizado por: Esparza, D, 2022

Determinando en la gráfica (12-3) **que** la velocidad del viento más bajo es de alrededor de 2 m/s y el más alto es de aproximadamente 28 m/s. La frecuencia de clase más alta va de 3 m/s hasta 4 m/s.

Tabla 10-3: Distribución de Frecuencia EM Chimborazo 2020.

Class limits	f	rf	rf(%)	cf	cf(%)
[2,3)	5	0.01	1.42	5	1.42
[3,4)	28	0.08	7.98	33	9.40
[4,5)	30	0.09	8.55	63	17.95
[5,6)	19	0.05	5.41	82	23.36
[6,7)	27	0.08	7.69	109	31.05
[7,8)	18	0.05	5.13	127	36.18
[8,9)	21	0.06	5.98	148	42.17
[9,10)	26	0.07	7.41	174	49.57
[10,11)	9	0.03	2.56	183	52.14
[11,12)	13	0.04	3.70	196	55.84
[12,13)	15	0.04	4.27	211	60.11
[13,14)	16	0.05	4.56	227	64.67
[14,15)	22	0.06	6.27	249	70.94
[15,16)	14	0.04	3.99	263	74.93
[16,17)	16	0.05	4.56	279	79.49
[17,18)	16	0.05	4.56	295	84.05
[18,19)	5	0.01	1.42	300	85.47
[19,20)	12	0.03	3.42	312	88.89
[20,21)	9	0.03	2.56	321	91.45

[21,22)	4	0.01	1.14	325	92.59
[22,23)	7	0.02	1.99	332	94.59
[23,24)	0	0.00	0.00	332	94.59
[24,25)	3	0.01	0.85	335	95.44
[25,26)	6	0.02	1.71	341	97.15
[26,27)	3	0.01	0.85	344	98.01
[27,28)	2	0.01	0.57	346	98.58
[28,29)	1	0.00	0.28	347	98.86
[29,30)	4	0.01	1.14	351	100.00

Realizado por: Esparza, D, 2022

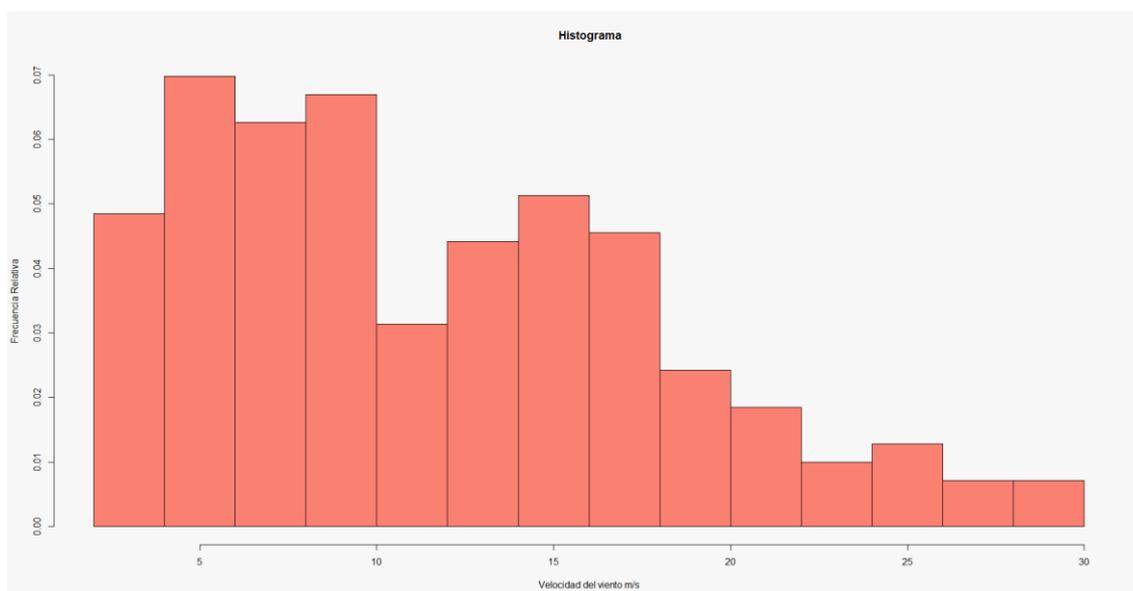


Gráfico 13-3: Histograma velocidad del viento EM Chimborazo 2020

Realizado por: Esparza, D, 2022

En el gráfico (13-3) se visualizó que la velocidad del viento más bajo es de alrededor de 2 m/s y el más alto es de aproximadamente 30 m/s. La frecuencia de clase más alta va de 4 m/s hasta 5 m/s.

En el caso de la estación meteorológica San Juan la anchura para el límite de clase varía debido a la naturaleza de sus datos, para cada año,

En la **Tabla 11-3**, correspondiente al año 2018 el límite de clase tiene una anchura de 0.00577, en la **Tabla 12-3** correspondiente al año 2019 el límite de clase tiene una anchura de 0.47 y en la **Tabla 13-3** correspondiente al año 2020 el límite de clase tiene una anchura de 0.5,

Tabla 11-3: Distribución de Frecuencia EM San Juan 2018

Class limits f	rf	rf(%)	rf(%)	cf(cf(%))
[0.0693,0.07507)	15	0.08	7.54	15	7.54
[0.07507,0.08083)	90	0.45	45.23	105	52.76
[0.08083,0.0866)	0	0.00	0.00	105	52.76
[0.0866,0.09237)	41	0.21	20.60	146	73.37

[0.09237,0.09813)	0	0.00	0.00	146	73.37
[0.09813,0.1039)	18	0.09	9.05	164	82.41
[0.1039,0.1097)	0	0.00	0.00	164	82.41
[0.1097,0.1154)	27	0.14	13.57	191	95.98
[0.1154,0.1212)	8	0.04	4.02	199	100.00

Realizado por: Esparza, D, 2022

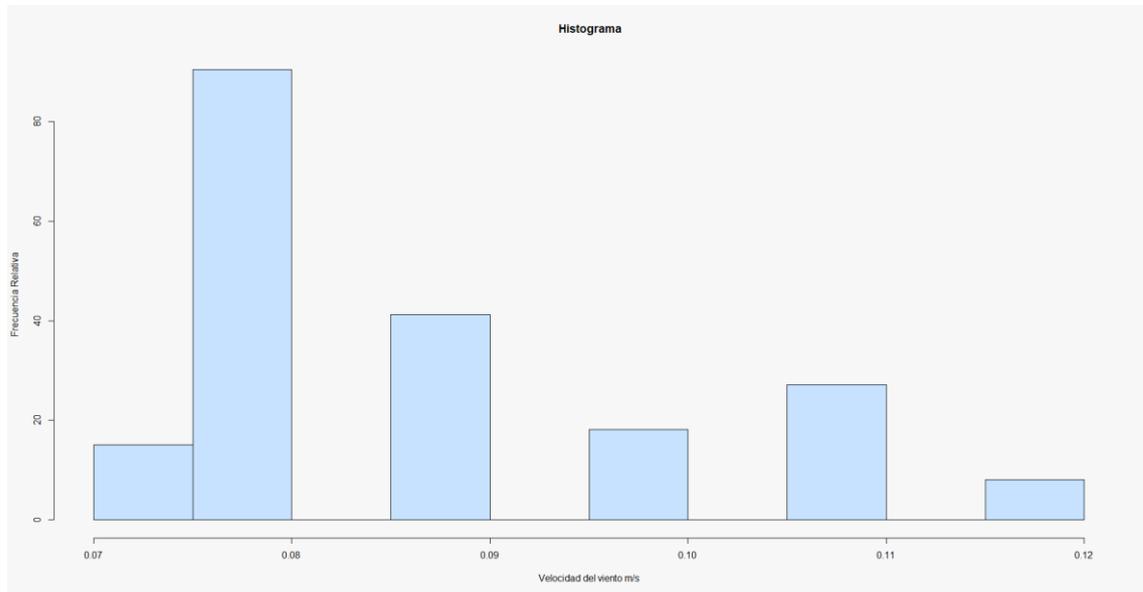


Gráfico 14-3: Histograma velocidad del viento EM San Juan 2018

Realizado por: Esparza, D, 2022

En el Gráfico (14-3) se puede observar que los datos de la velocidad del viento se encuentran demasiado dispersos, debido a la eliminación de los datos atípicos, también se observa que la velocidad del viento más bajo es de alrededor de 0.06 m/s y el más alto es de aproximadamente 0.12 m/s. La frecuencia de clase más alta va de 0.07 m/s hasta 0.08 m/s.

Tabla 12-3: Distribución de Frecuencia EM San Juan 2019

Class limits	F	rf	rf(%)	cf	cf(%)
[3.148,3.558)	5	0.01	1.40	5	1.40
[3.558,3.967)	16	0.04	4.48	21	5.88
[3.967,4.376)	46	0.13	12.89	67	18.77
[4.376,4.786)	70	0.20	19.61	137	38.38
[4.786,5.195)	60	0.17	16.81	197	55.18
[5.195,5.604)	57	0.16	15.97	254	71.15
[5.604,6.014)	38	0.11	10.64	292	81.79
[6.014,6.423)	28	0.08	7.84	320	89.64
[6.423,6.832)	28	0.08	7.84	348	97.48
[6.832,7.242)	9	0.03	2.52	357	100.00

Realizado por: Esparza, D, 2022

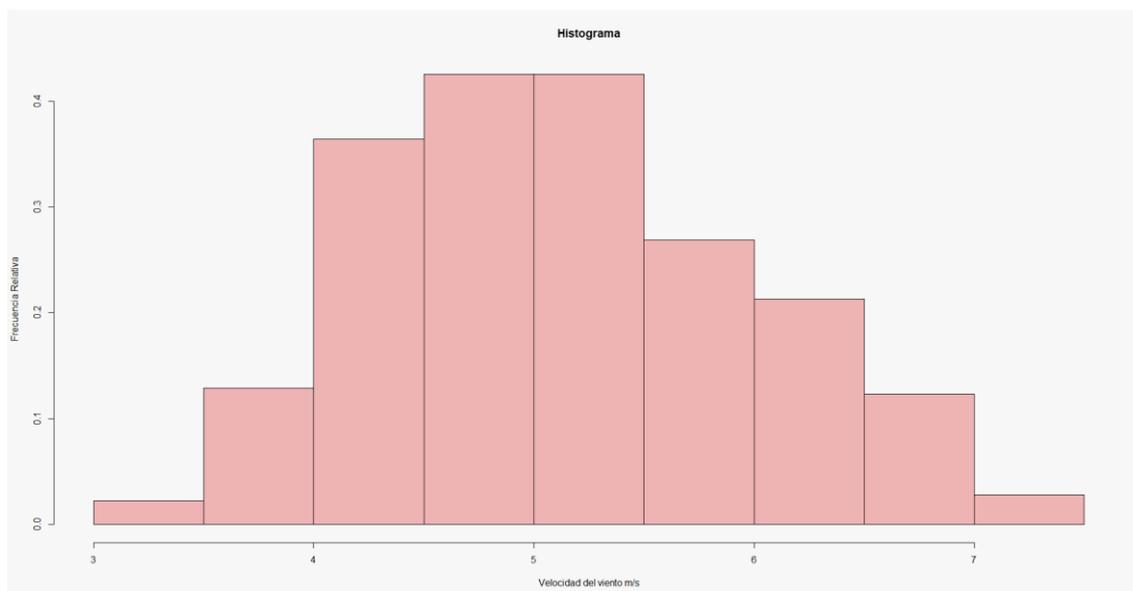


Gráfico 15-3: Histograma velocidad del viento EM San Juan 2019

Realizado por: Esparza, D, 2022

En el Gráfico (15-3) se observa que la velocidad del viento más bajo es de alrededor de 3.14 m/s y el más alto es de aproximadamente 7.24 m/s. La frecuencia de clase más alta va de 4.3 m/s hasta 4.7 m/s.

Tabla 13-3: Distribución de Frecuencia EM San Juan 2020

Class limits	F	rf	rf(%)	cf	cf(%)
[1.98,2.527)	29	0.08	7.99	29	7.99
[2.527,3.075)	58	0.16	15.98	87	23.97
[3.075,3.622)	57	0.16	15.70	144	39.67
[3.622,4.17)	52	0.14	14.33	196	53.99
[4.17,4.717)	53	0.15	14.60	249	68.60
[4.717,5.264)	44	0.12	12.12	293	80.72
[5.264,5.812)	31	0.09	8.54	324	89.26
[5.812,6.359)	19	0.05	5.23	343	94.49
[6.359,6.906)	15	0.04	4.13	358	98.62
[6.906,7.454)	5	0.01	1.38	363	100.00

Realizado por: Esparza, D, 2022

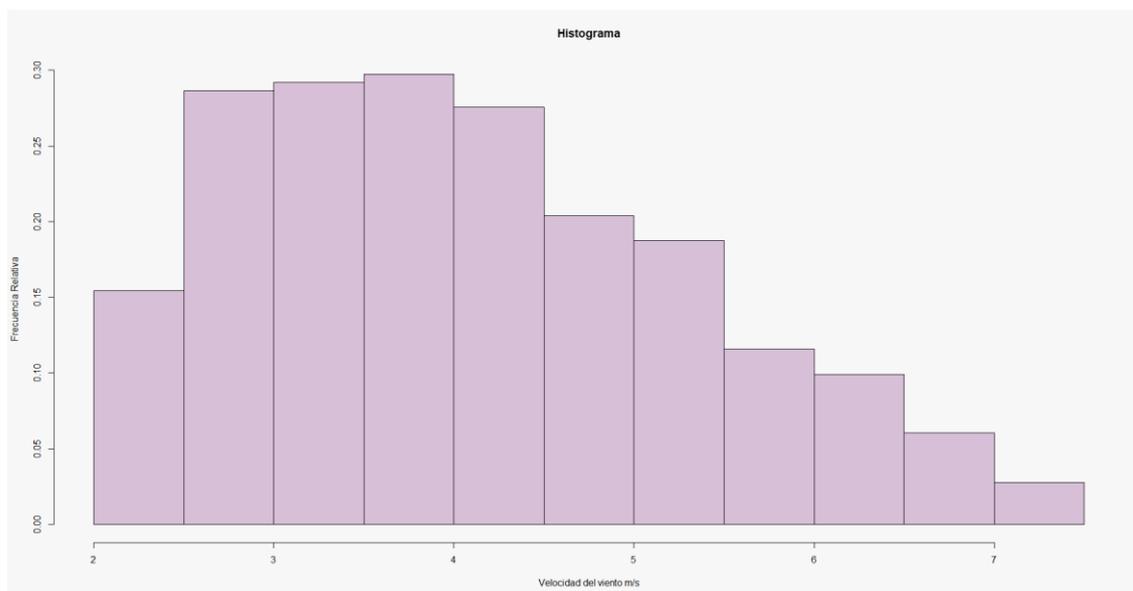


Gráfico 16-3: Histograma velocidad del viento EM San Juan 2020

Realizado por: Esparza, D, 2022

En el Gráfico (16-3) se observa que la velocidad del viento más bajo es de alrededor de 1.9 m/s y el más alto es de aproximadamente 7.4 m/s. La frecuencia de clase más alta va de 2.5 m/s hasta 3.0 m/s.

3.5. Distribución de Weibull

Utilizando los métodos de estimación de la distribución de Weibull se procede a calcular los parámetros de forma (k) y los parámetros de escala (c) para ambas estaciones.

Tabla 14-3: Parámetros distribución de Weibull EM Chimborazo.

MÉTODO DE ESTIMACIÓN	AÑO 2018		AÑO 2019		AÑO 2020	
	k	c	k	c	k	C
M1: Cuadrados Mínimos	1.16	12.85	1.47	13.10	1.51	13.31
M2: Máxima Verosimilitud	1.62	12.56	1.90	12.89	1.85	13.25
M3: Empírico	1.73	11.99	1.91	13.04	1.89	13.30

Realizado por: Esparza, D, 2022

Los parámetros de la distribución de Weibull en la estación meteorológica de Chimborazo fue de 1.16 para los cuadrados mínimos (parámetros de forma k) y 12.85 (parámetro de escala c) para el 2018, en el año 2019 el valor de los cuadrados mínimos para los parámetros de forma k fue de 1.47 y para los parámetros de escala c fe de 13.10, mientras que en el año 2020 los valores en los cuadrados mínimos fueron de 1.51 y 13.31 para los parámetros de forma y

parámetros de escala c respectivamente, como se observa en la **Tabla 14-3**.

En el método de máxima verosimilitud el valor del parámetro de forma k para el año 2018 fue de 1.62, mientras que el valor en el parámetro de escala c fue de 12.56, en el año 2019 se observó un valor 1.90 (k) y 12.89 (c), para el año 2020 el valor de (k) y el valor de (c) fueron 1.85 y 13.25 respectivamente.

En el método empírico los valores del parámetro de forma (k) y el parámetro de escala (c) para los años 2018, 2019 y 2020 fueron 1.73, 11.99, 1.91, 13.04, 1.89 y 13.30.

Tabla 15-3: Parámetros distribución de Weibull EM San Juan.

MÉTODO DE ESTIMACIÓN	AÑO 2018		AÑO 2019		AÑO 2020	
	k	c	k	c	k	c
M1: Cuadrados Mínimos	-0.76	0.09	2.09	5.82	1.18	5.11
M2: Máxima Verosimilitud	23.01	0.08	18.32	5.20	5.74	4.29
M3: Empírico	7.92	0.11	6.99	6.51	3.66	4.67

Realizado por: Esparza, D, 2022

En la estación meteorológica San Juan mediante el método de cuadrados mínimos se obtuvo un parámetro de forma k y un parámetro de escala c para los años 2018, 2019 y 2020 de -0.76, 0.09, 2.09, 5.82, 1.18, 5.11.

Utilizando el método de máxima verosimilitud el parámetro de forma (k) fue de 23.01 y 0.08 para el parámetro de escala (c) en el año 2018, en el año 2019 el parámetro de forma (k) y el parámetro de escala (c) fueron de 18.32 y 5.20, para el año 2020 sus valores fueron de 5.74 y 4.29 para los parámetros (k) y (c) equitativamente.

En el método empírico los valores del parámetro de forma (k) y el parámetro de escala (c) para los años 2018, 2019 y 2020 fueron 7.92, 0.11, 6.99, 6.51, 3.66 y 4.67, como se representa en la **Tabla 15-3**.

3.6. Distribución acumulativa y complementaria de Weibull

Tabla 16-3: DA y DAC: Cuadrados mínimos. EM Chimborazo.

Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria	Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria	Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria
2018		2019		2020	
0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
5.03	94.96	2.23	97.76	1.95	98.04
10.90	89.09	6.08	93.91	5.49	94.50
16.87	83.12	10.78	89.21	9.92	90.07
22.74	77.25	15.99	84.00	14.92	85.07

28.41	71.58	21.49	78.50	20.27	79.72
33.84	66.16	27.13	72.86	25.82	68.56
38.97	61.02	32.77	67.22	31.43	62.99
43.82	56.17	38.33	61.66	37.00	57.55
48.37	51.62	43.72	56.27	42.44	52.30
52.62	47.37	48.89	51.10	52.70	47.29
56.58	43.41	53.81	46.18	57.44	42.55
60.27	39.72	58.43	41.50	61.88	38.11
63.68	36.31	62.76	37.23	66.01	33.98
66.84	33.15	66.76	33.23	69.83	30.16
69.75	30.24	70.46	29.53	73.32	26.67
72.44	27.55	73.84	26.15	76.51	23.48
74.91	25.08	76.91	23.08	79.39	20.60
77.18	22.81	79.90	20.29	81.99	18.00
79.26	20.73	82.21	17.78	84.32	15.67
81.17	18.82	84.47	15.52	86.40	13.59
82.91	17.08	86.48	13.51	88.25	11.74
84.51	15.48	88.26	11.73	89.88	10.11
85.96	14.03	89.85	10.14	91.31	8.68
87.29	12.70	91.24	8.75	92.56	7.43
88.50	11.49	92.47	7.52	93.66	6.33
89.60	10.39	93.54	6.45	94.61	5.38
90.60	9.39	94.48	5.51	95.43	4.56
91.51	8.48	95.29	4.70	96.14	3.85
92.34	7.65	95.99	4.00	96.75	3.24
93.09	6.90	96.60	3.39	97.27	2.72
94.39	6.22	97.12	2.87	97.71	2.28
94.94	5.60	97.57	2.42	98.09	1.90
95.45	5.05	97.96	2.03	98.41	1.58
95.90	4.54	98.28	1.71	98.68	1.31
96.32	4.09	98.56	1.43	98.90	1.09
96.69	3.67	98.80	1.19	99.09	0.90
97.02	3.30	99.00	0.99	99.25	0.74
97.33	2.97	99.16	0.83	99.39	0.60
97.60	2.66	99.31	0.68	99.50	0.49
97.85	2.39	99.42	0.57	99.59	0.40
98.07	2.14	99.52	0.47	99.66	0.33
98.27	1.92	99.61	0.39	99.72	0.27
98.42	1.72	99.68	0.31	99.78	0.21
98.61	1.54	99.73	0.26	99.82	0.17
98.75	1.38	99.78	0.21	99.85	0.14
98.88	1.24	99.82	0.17	99.88	0.11
99.00	1.11	99.85	0.14	99.90	0.09
99.11	0.99	99.90	0.09	99.92	0.07

Realizado por: Esparza, D, 2022

Se calculó los valores de la DA y DAC con los parámetros de forma (k) y de escala (c) mediante el método de mínimos cuadrados **Tabla 16-3**, para los años 2018,2019 y 2020, obteniendo que la probabilidad de tener una velocidad del viento mayor o igual a 0 m/s es de 100%, mientras que la probabilidad de tener una velocidad de viento menor o igual a 0 m/s es del 0%, respectivamente. Representando las probabilidades en el grafico (17-3) que a medida que se aumenta la velocidad su distribución acumulativa complementaria va decreciendo, caso contrario la distribución acumulativa va creciendo. Al analizar los resultados obtenidos en la investigación de Silva y Valarezo observamos que las gráficas se asemejan. (Silva y Valarezo [sin fecha], p. 45).

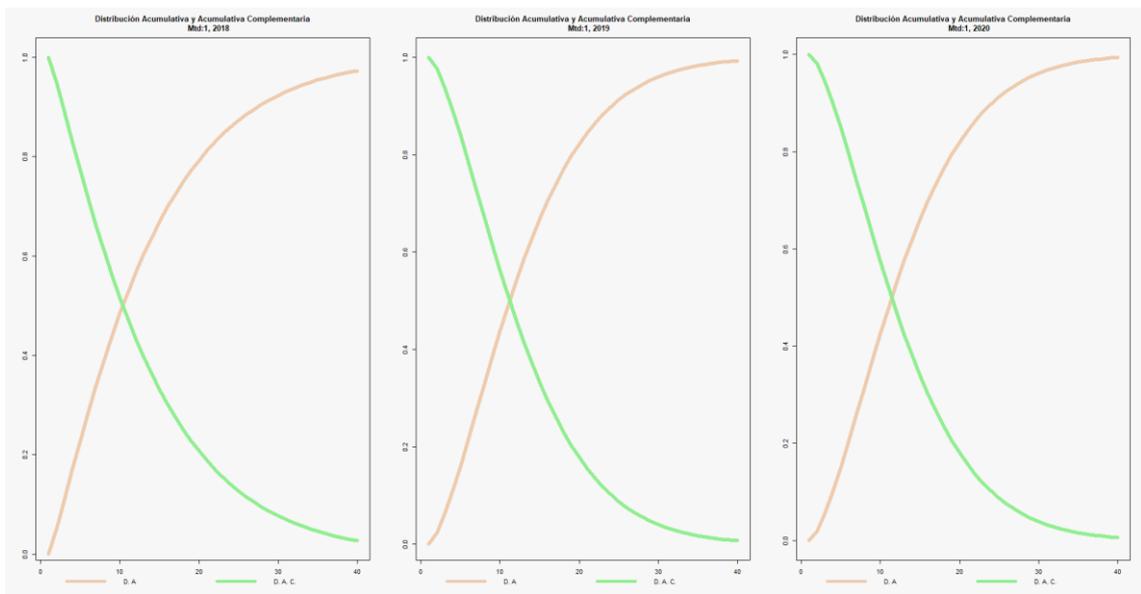


Gráfico 17-3: DA y DAC: Cuadrados mínimos EM Chimborazo

Realizado por: Esparza, D, 2022

Tabla 17-3: DA y DAC: Máxima verosimilitud EM Chimborazo.

Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria	Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria	Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria
2018		2019		2020	
0.000000	100.0000000	0.0000000	1.000000e+02	0.0000000	1.000000e+02
1.644527	98.35547294	0.7741639	9.922584e+01	0.8357559	9.916424e+01
4.969179	95.03082117	2.8588625	9.714114e+01	2.9802504	9.701975e+01
9.362709	90.63729085	6.0745288	9.392547e+01	6.2049621	9.379504e+01
14.501018	85.49898198	10.2598021	8.974020e+01	10.3333769	8.966662e+01
20.139513	79.86048681	15.2454088	8.475459e+01	15.1948906	8.480511e+01
26.078271	73.92172920	20.8549075	7.914509e+01	20.6205005	7.937950e+01
32.150516	67.84948350	26.9098837	7.309012e+01	26.4450104	7.355499e+01
38.217579	61.78242149	33.2361510	6.676385e+01	32.5108439	6.748916e+01
44.165974	55.83402567	39.6697159	6.033028e+01	38.6719527	6.132805e+01
49.905182	50.09481831	46.0618922	5.393811e+01	44.7971823	5.520282e+01

55.365562	44.63443765	52.2832299	4.771677e+01	50.7728026	4.922720e+01
60.496257	39.50374313	58.2261089	4.177389e+01	56.5040883	4.349591e+01
65.263015	34.73698540	63.8059834	3.619402e+01	61.9159455	3.808405e+01
69.645986	30.35401432	68.9613713	3.103863e+01	66.9526598	3.304734e+01
73.637525	26.36247450	73.6527574	2.634724e+01	71.5768888	2.842311e+01
77.240066	22.75993358	77.8606318	2.213937e+01	75.7680567	2.423194e+01
80.464107	19.53589344	81.5829092	1.841709e+01	79.5203175	2.047968e+01
83.326356	16.67364424	84.8319748	1.516803e+01	82.8402564	1.715974e+01
85.848067	14.15193265	87.6315848	1.236842e+01	85.7444826	1.425552e+01
88.053573	11.94642685	90.0138198	9.986180e+00	88.2572500	1.174275e+01
89.969029	10.03097145	92.0162474	7.983753e+00	90.4082126	9.591787e+00
91.621366	8.37863445	93.6794057	6.320594e+00	92.2303965	7.769603e+00
93.037445	6.96255520	95.0446803	4.955320e+00	93.7584421	6.241558e+00
94.243392	5.75660818	96.1526015	3.847399e+00	95.0271432	4.972857e+00
95.264100	4.73590046	97.0415631	2.958437e+00	96.0702900	3.929710e+00
96.122877	3.87712346	97.7469324	2.253068e+00	96.9198038	3.080196e+00
96.841220	3.15877993	98.3005074	1.699493e+00	97.6051388	2.394861e+00
97.438693	2.56130712	98.7302648	1.269735e+00	98.1529177	1.847082e+00
97.932884	2.06711612	99.0603395	9.396605e-01	98.5867627	1.413237e+00
98.339434	1.66056561	99.3111777	6.888223e-01	98.9272830	1.072717e+00
98.672114	1.32788637	99.4998091	5.001909e-01	99.1921811	8.078189e-01
98.942929	1.05707085	99.6401925	3.598075e-01	99.3964427	6.035573e-01
99.162260	0.83773976	99.7435968	2.564032e-01	99.5525805	4.474195e-01
99.339004	0.66099554	99.8189878	1.810122e-01	99.6709068	3.290932e-01
99.480729	0.51927083	99.8733994	1.266006e-01	99.7598151	2.401849e-01
99.593822	0.40617769	99.9122759	8.772413e-02	99.8260558	1.739442e-01
99.683638	0.31636242	99.9397761	6.022390e-02	99.8749954	1.250046e-01
99.754631	0.24536896	99.9590366	4.096343e-02	99.9108529	8.914707e-02
99.810487	0.18951288	99.9723935	2.760654e-02	99.9369091	6.309094e-02
99.854233	0.14576728	99.9815657	1.843429e-02	99.9556883	4.431170e-02
99.888339	0.11166082	99.9878031	1.219691e-02	99.9691131	3.088688e-02
99.914812	0.08518785	99.9920036	7.996352e-03	99.9786329	2.136712e-02
99.935270	0.06473016	99.9948053	5.194722e-03	99.9853295	1.467054e-02
99.951010	0.04898954	99.9966560	3.344031e-03	99.9900026	9.997371e-03
99.963070	0.03693030	99.9978668	2.133168e-03	99.9932380	6.762021e-03
99.972269	0.02773063	99.9986515	1.348451e-03	99.9954603	4.539720e-03
99.979258	0.02074188	99.9991553	8.447144e-04	99.9969748	3.025200e-03
99.984545	0.01545475	99.9994756	5.243934e-04	99.9979989	2.001069e-03
99.988529	0.01147134	99.9996774	3.226157e-04	99.9986861	1.313902e-03

Realizado por: Esparza, D, 2022

Se calculó los valores de la DA. y DAC. con los parámetros de forma (k) y de escala (c) mediante el método de máxima verosimilitud **Tabla 17-3**, para los años 2018,2019 y 2020, obteniendo que la probabilidad de tener una velocidad del viento mayor o igual a 0 m/s es de 100%, mientras que la probabilidad de tener una velocidad de viento menor o igual a 0 m/s es

del 0%, respectivamente. Representando las probabilidades en el grafico (18-3) que a medida que se aumenta la velocidad su distribución acumulativa complementaria va disminuyendo, caso contrario la distribución acumulativa va incrementándose.

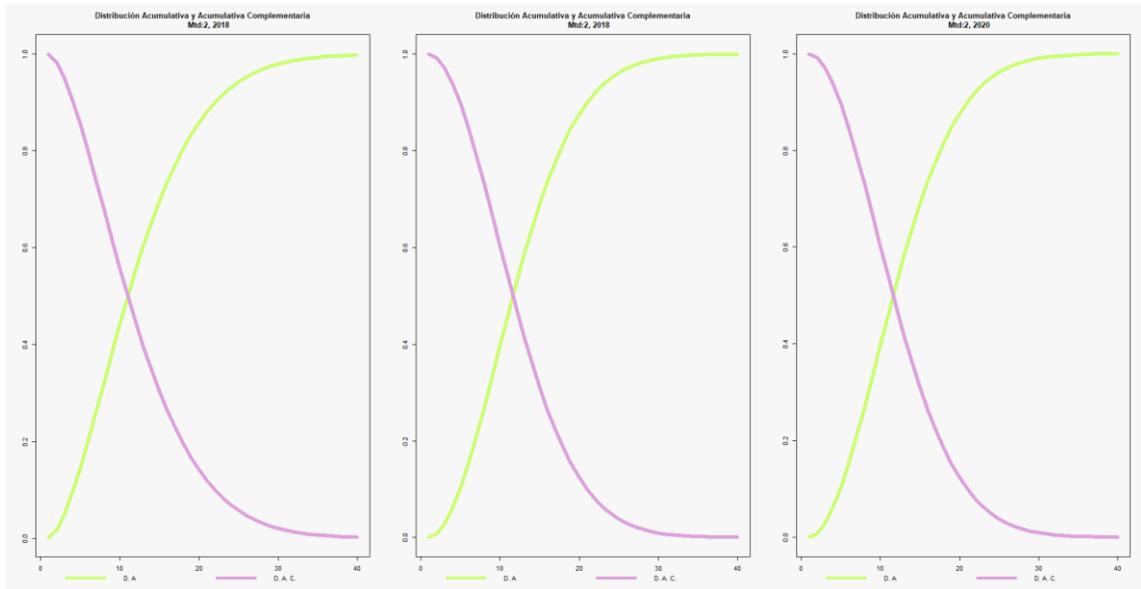


Gráfico 18-3: DA y DAC: Máxima verosimilitud EM Chimborazo.

Realizado por: Esparza, D, 2022

Tabla 18-3: DA y DAC: Método empírico EM Chimborazo.

Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria	Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria	Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria
2018		2019		2020	
0.000000	1.000000e+02	0.000000	1.000000e+02	0.000000	1.000000e+02
1.838098	9.816190e+01	1.040867	9.895913e+01	1.067732	9.893227e+01
6.002011	9.399799e+01	3.876408	9.612359e+01	3.905230	9.609477e+01
11.772063	8.822794e+01	8.244187	9.175581e+01	8.220471	9.177953e+01
18.658352	8.134165e+01	13.876248	8.612375e+01	13.741708	8.625829e+01
26.241267	7.375873e+01	20.480868	7.951913e+01	20.185354	7.981465e+01
34.155324	6.584468e+01	27.754533	7.224547e+01	27.263198	7.273680e+01
42.090027	5.790997e+01	35.398182	6.460182e+01	34.695118	6.530488e+01
49.792474	5.020753e+01	43.132866	5.686713e+01	42.221717	5.777828e+01
57.067976	4.293202e+01	50.712697	4.928730e+01	49.614810	5.038519e+01
63.777892	3.622211e+01	57.934022	4.206598e+01	56.684811	4.331519e+01
69.834914	3.016509e+01	64.640440	3.535956e+01	63.284705	3.671530e+01
75.196462	2.480354e+01	70.723824	2.927618e+01	69.310743	3.068926e+01
79.856941	2.014306e+01	76.121867	2.387813e+01	74.700310	2.529969e+01
83.839604	1.616040e+01	80.812972	1.918703e+01	79.427578	2.057242e+01
87.188647	1.281135e+01	84.809371	1.519063e+01	83.497692	1.650231e+01
89.961999	1.003800e+01	88.149383	1.185062e+01	86.940185	1.305982e+01
92.225113	7.774887e+00	90.889606	9.110394e+00	89.802275	1.019773e+01
94.045925	5.954075e+00	93.097664	6.902336e+00	92.142550	7.857450e+00
95.490989	4.509011e+00	94.845964	5.154036e+00	94.025415	5.974585e+00

96.622751	3.377249e+00	96.206682	3.793318e+00	95.516520	4.483480e+00
97.497791	2.502209e+00	97.248067	2.751933e+00	96.679253	3.320747e+00
98.165901	1.834099e+00	98.031986	1.968014e+00	97.572276	2.427724e+00
98.669800	1.330200e+00	98.612559	1.387441e+00	98.247999	1.752001e+00
99.045316	9.546838e-01	99.035685	9.643146e-01	98.751847	1.248153e+00
99.321889	6.781113e-01	99.339211	6.607893e-01	99.122140	8.778603e-01
99.523252	4.767481e-01	99.553555	4.464448e-01	99.390418	6.095816e-01
99.668205	3.317945e-01	99.702592	2.974081e-01	99.582063	4.179368e-01
99.771395	2.286046e-01	99.804639	1.953606e-01	99.717067	2.829334e-01
99.844053	1.559471e-01	99.873457	1.265432e-01	99.810864	1.891361e-01
99.894662	1.053383e-01	99.919170	8.083050e-02	99.875146	1.248538e-01
99.929539	7.046108e-02	99.949083	5.091711e-02	99.918607	8.139292e-02
99.953323	4.667699e-02	99.968368	3.163153e-02	99.947598	5.240201e-02
99.969375	3.062540e-02	99.980620	1.938031e-02	99.966680	3.331996e-02
99.980097	1.990304e-02	99.988289	1.171116e-02	99.979075	2.092542e-02
99.987187	1.281293e-02	99.993020	6.979964e-03	99.987020	1.298000e-02
99.991829	8.171452e-03	99.995897	4.103310e-03	99.992047	7.952839e-03
99.994837	5.163001e-03	99.997621	2.379344e-03	99.995187	4.813196e-03
99.996768	3.232111e-03	99.998639	1.360929e-03	99.997122	2.877560e-03
99.997995	2.004838e-03	99.999232	7.678594e-04	99.998301	1.699456e-03
99.998768	1.232277e-03	99.999573	4.273748e-04	99.999008	9.915288e-04
99.999249	7.505841e-04	99.999765	2.346547e-04	99.999428	5.715114e-04
99.999547	4.530833e-04	99.999873	1.271027e-04	99.999675	3.254488e-04
99.999729	2.710622e-04	99.999932	6.791991e-05	99.999817	1.831018e-04
99.999839	1.607296e-04	99.999964	3.580697e-05	99.999898	1.017812e-04
99.999906	9.446740e-05	99.999981	1.862419e-05	99.999944	5.590120e-05
99.999945	5.503638e-05	99.999990	9.557342e-06	99.999970	3.033652e-05
99.999968	3.178493e-05	99.999995	4.839022e-06	99.999984	1.626723e-05
99.999982	1.819775e-05	99.999998	2.417403e-06	99.999991	8.619401e-06
99.999990	1.032904e-05	99.999999	1.191575e-06	99.999995	4.513026e-06

Realizado por: Esparza, D, 2022

Se calculó los valores de la DA. y DAC. con los parámetros de forma (k) y de escala (c) mediante el método de empírico **Tabla 18-3**, para los años 2018,2019 y 2020, obteniendo que la probabilidad de tener una velocidad del viento mayor o igual a 0 m/s es de 100%, mientras que la probabilidad de tener una velocidad de viento menor o igual a 0 m/s es del 0%, respectivamente. Representando las probabilidades en el grafico (19-3) que a medida que se aumenta la velocidad su distribución acumulativa complementaria va decreciendo, caso contrario la distribución acumulativa va creciendo.

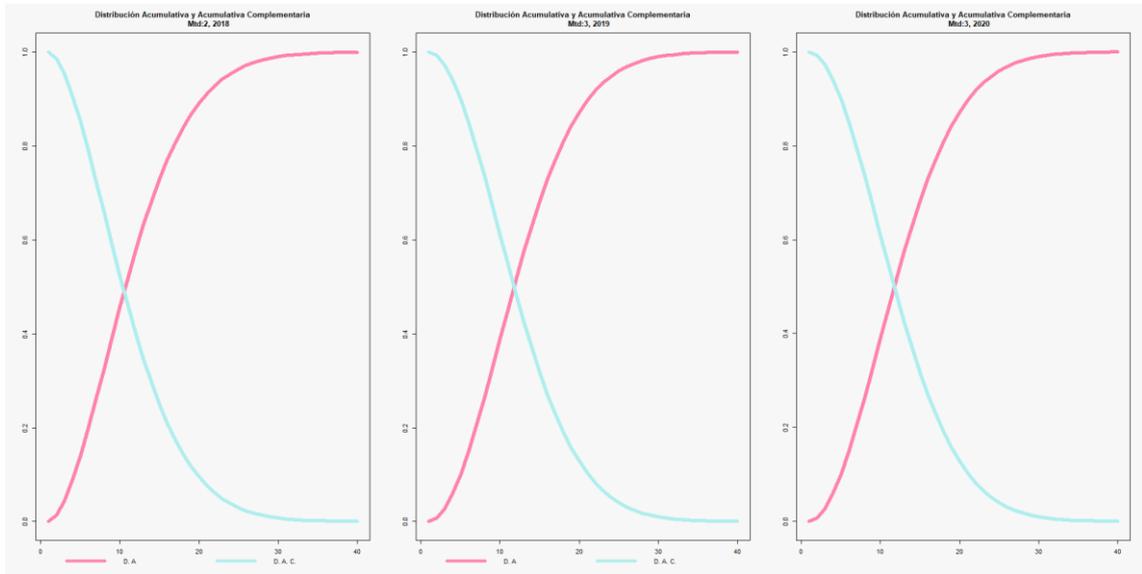


Gráfico 19-3: DA y DAC: Método empírico EM Chimborazo.

Realizado por: Esparza, D, 2022

Tabla 19-3: DA y DAC: Cuadrados mínimos EM San Juan.

Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria	Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria
2019		2020	
0.000000	100.00000000	0.00000	100.000000
2.447746	97.55225402	13.39876	86.601240
10.062988	89.93701243	27.95533	72.044673
21.984428	78.01557219	41.19260	58.807400
36.486145	63.51385548	52.63700	47.362998
1.559848	48.44015184	62.25455	37.745452
65.440793	34.55920686	70.18203	29.817966
76.963275	23.03672511	76.62193	23.378066
85.667303	14.33269727	81.79272	18.207277
91.684436	8.31556355	85.90432	14.095678
95.504679	4.49532112	89.14652	10.853480
97.737350	2.26265049	91.68451	8.315493
98.940327	1.05967319	93.65832	6.341681
99.538516	0.46148445	95.18435	4.815651
99.813222	0.18677779	96.35785	3.642147
99.929782	0.07021751	97.25581	2.744188
99.975492	0.02450762	97.93978	2.060222

Realizado por: Esparza, D 2022

Una vez obtenido los valores de los parámetros de Weibull (k) y (c) mediante el método de cuadrados mínimos **Tabla 19-3** para los años 2019 y 2020, se calculó la DA. y DAC. Obteniendo que la probabilidad de tener una velocidad del viento mayor o igual a 0 m/s es de 100%, mientras que la probabilidad de tener una velocidad de viento menor o igual a 0 m/s es del 0%, respectivamente para cada año. Representando las probabilidades en el grafico (20-3)

observando que a medida que se aumenta la velocidad su distribución acumulativa complementaria decrece, mientras que la distribución acumulativa crece.

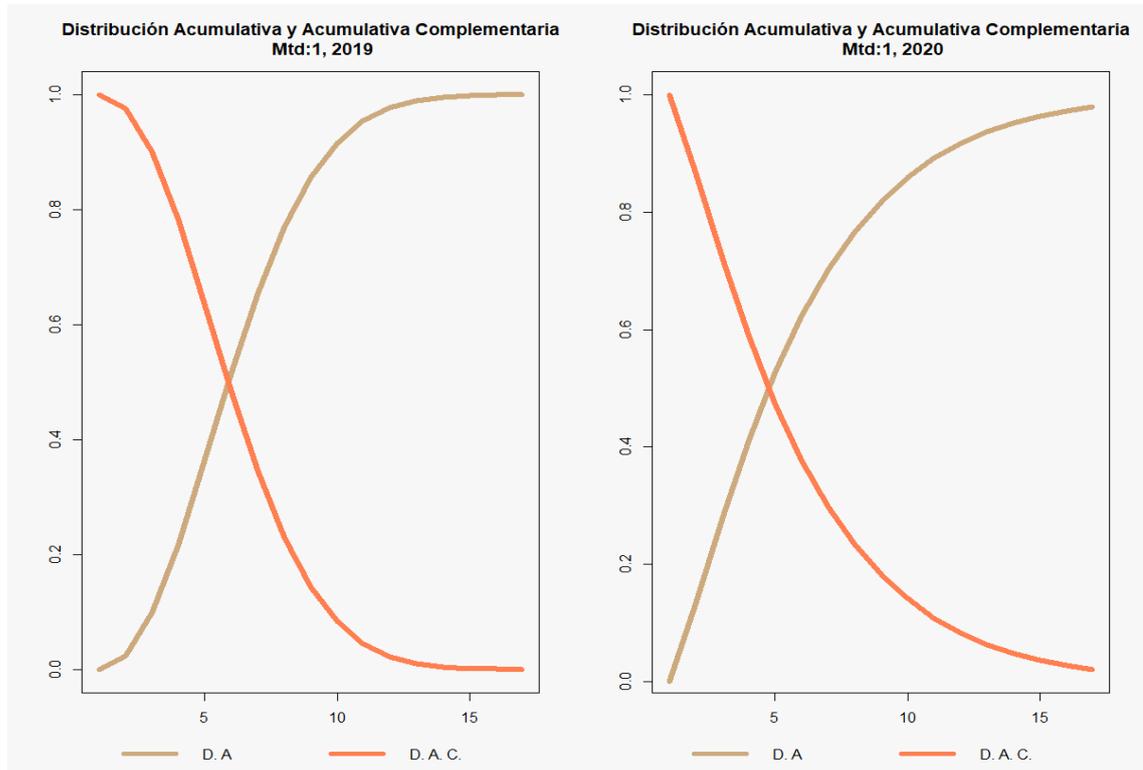


Gráfico 20-3: DA y DAC: Cuadrados mínimos EM San Juan.

Realizado por: Esparza, D, 2022

Tabla 20-3: DA y DAC: Máxima verosimilitud EM San Juan.

Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria	Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria
2019		2020	
0.000000e+00	1.000000e+02	0.00000000	1.000000e+02
7.638334e-12	1.000000e+02	0.01803295	9.997658e+01
2.498551e-06	1.000000e+02	0.95923903	9.875580e+01
4.204080e-03	9.999580e+01	9.40812902	8.795519e+01
8.142983e-01	9.918570e+01	40.25866489	5.121469e+01
3.858226e+01	6.141774e+01	84.34467462	8.993200e+00
9.999989e+01	1.059386e-04	99.49112987	1.049590e-01
1.000000e+02	2.256267e-99	99.99972195	6.070731e-06

Realizado por: Esparza, D, 2022

Una vez obtenido los valores de los parámetros de Weibull (k) y (c) mediante el método de máxima verosimilitud **Tabla 20-3** para los años 2019 y 2020 se calculó la DA. y DAC. Dando como resultado, la probabilidad de tener una velocidad del viento mayor o igual a 0 m/s es de 100%, mientras que la probabilidad de tener una velocidad de viento menor o igual a 0 m/s es del 0%, respectivamente para cada año. Representando las probabilidades en el grafico (21-3)

observando que a medida que se aumenta la velocidad su distribución acumulativa complementaria decrece, mientras que la distribución acumulativa crece.

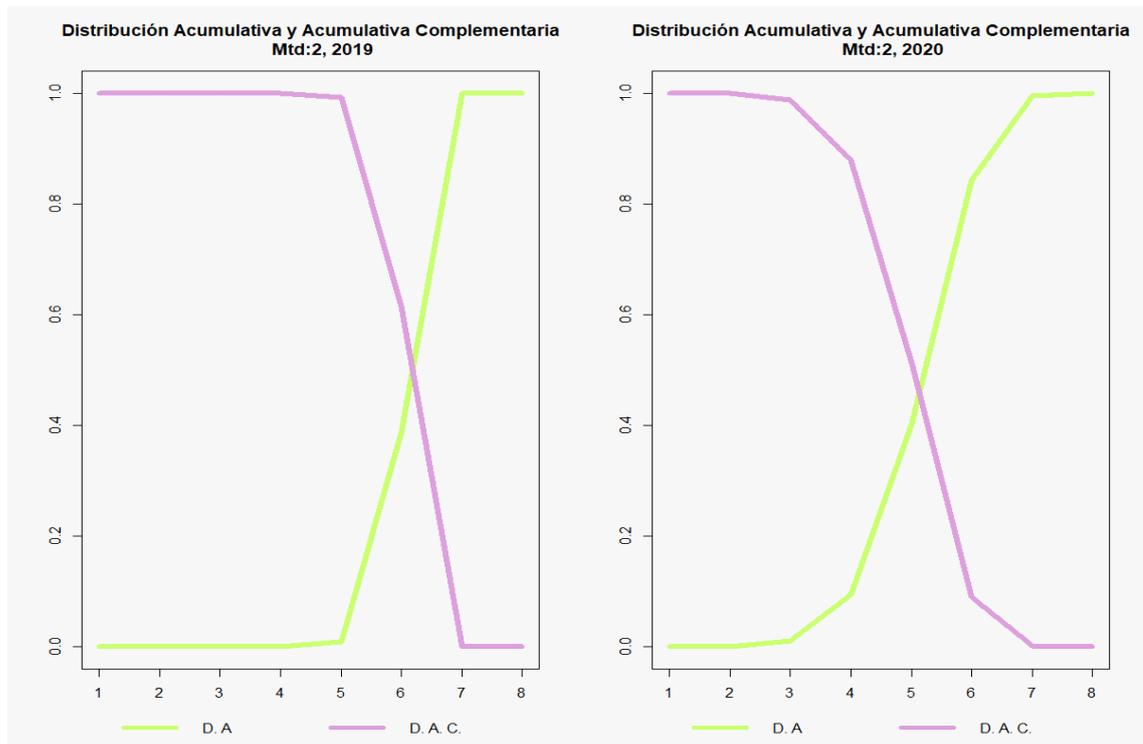


Gráfico 21-3 DA y DAC: Máxima verosimilitud EM San Juan.

Realizado por: Esparza, D, 2022

Tabla 21-3: DA y DAC: Método empírico EM San Juan.

Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria	Distribución acumulativa	Distribución acumulativa complementaria
2019		2020	
0.000000e+00	1.000000e+02	0.000000	1.000000e+02
2.012141e-04	9.999980e+01	0.351417	9.964858e+01
2.573622e-02	9.997426e+01	4.358908	9.564109e+01
4.386603e-01	9.956134e+01	17.859899	8.214010e+01
3.239010e+00	9.676099e+01	43.119896	5.688010e+01
1.452733e+01	8.547267e+01	72.126270	2.787373e+01
4.301448e+01	5.698552e+01	91.715386	8.284614e+00
8.087581e+01	1.912419e+01	98.747870	1.252130e+00
9.851827e+01	1.481729e+00	99.920967	7.903277e-02
9.999326e+01	6.737751e-03	99.998322	1.677689e-03

Realizado por: Esparza, D, 2022

Una vez obtenido los valores de los parámetros de Weibull (k) y (c) mediante el método empírico **Tabla 21-3** para los años 2019 y 2020, se calculó la DA. y DAC. Como resultado la probabilidad de tener una velocidad del viento mayor o igual a 0 m/s es de 100%, mientras que la probabilidad de tener una velocidad de viento menor o igual a 0 m/s es del 0%,

respectivamente para cada año. Representando las probabilidades en el gráfico (22-3) observando que a medida que se aumenta la velocidad su distribución acumulativa complementaria decrece, mientras que la distribución acumulativa incrementando.

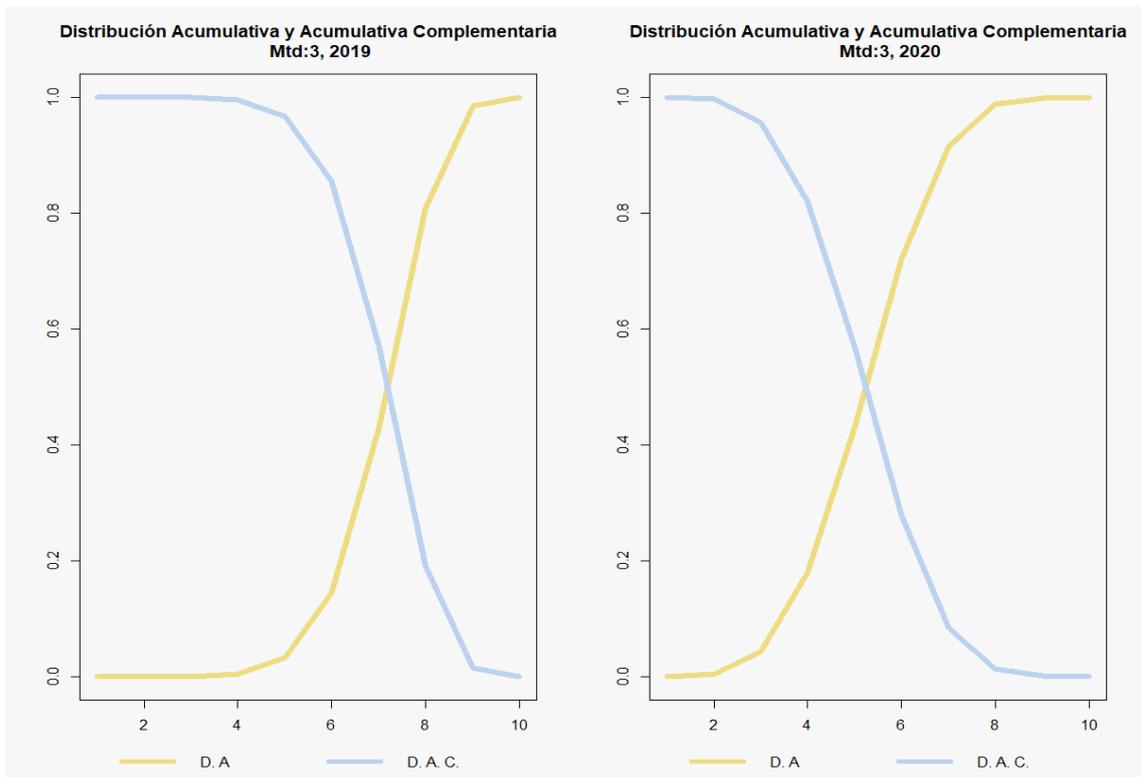


Gráfico 22-3: DA y DAC: Método empírico EM San Juan.

Realizado por: Esparza, D, 2022

3.7. Función de densidad de probabilidad

Aplicando la ecuación (16-1) de la FDP de Weibull, se calcula para los tres métodos aplicados con sus respectivos parámetros de forma (k) y parámetros de escala (c), para la estación meteorológica Chimborazo y San Juan en los años 2018, 2019, 2020, mostrando sus resultados en las siguientes tablas.

En el caso de la estación meteorológica San Juan año 2018 su FDP no fue calculado debido a las incoherencias que presenta dicho año.

Tabla 22-3: FDP: Cuadrados mínimos EM Chimborazo
Función de densidad de probabilidad

Año 2018	Año 2019	Año 2020
0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000
0.0569127831	0.0325810385	0.0293662100
0.0596714818	0.0434140773	0.0404747767
0.0594127161	0.0499447692	0.0475545805
0.0578239555	0.0538698909	0.0521005156

0.0555301886	0.0559331981	0.0547758557
0.0528472531	0.0565841035	0.0559891897
0.0499601894	0.0561416597	0.0560382150
0.0469865574	0.0548528640	0.0551601697
0.0440045177	0.0529179153	0.0535530311
0.0410672408	0.0505027951	0.0513855865
0.0382111118	0.0477463341	0.0488027653
0.0354607790	0.0447646714	0.0459288268
0.0328324516	0.0416544056	0.0428695564
0.0303361556	0.0384950539	0.0397140097
0.0279773334	0.0353511235	0.0365360558
0.0257580098	0.0322739442	0.0333958365
0.0236776623	0.0293033366	0.0303411843
0.0217338800	0.0264691473	0.0274090092
0.0199228692	0.0237926669	0.0246266466
0.0182398450	0.0212879324	0.0220131534
0.0166793359	0.0189629174	0.0195805347
0.0152354222	0.0168206068	0.0173348904
0.0139019215	0.0148599602	0.0152774688
0.0126725333	0.0130767622	0.0134056206
0.0115409517	0.0114643677	0.0117136512
0.0105009509	0.0100143429	0.0101935687
0.0095464507	0.0087170128	0.0088357309
0.0086715651	0.0075619187	0.0076293969
0.0078706371	0.0065381969	0.0065631870
0.0071382630	0.0056348844	0.0056254611
0.0064693080	0.0048411611	0.0048046209
0.0058589146	0.0041465369	0.0040893472
0.0053025060	0.0035409898	0.0034687777
0.0047957849	0.0030150644	0.0029326362
0.0043347289	0.0025599358	0.0024713191
0.0039155836	0.0021674459	0.0020759469
0.0035348535	0.0018301167	0.0017383881
0.0031892917	0.0015411463	0.0014512597
0.0028758886	0.0012943910	0.0012079110
0.0025918603	0.0010843376	0.0010023940
0.0023346357	0.0009060678	0.0008294243
0.0021018447	0.0007552188	0.0006843370
0.0018913058	0.0006279410	0.0005630377
0.0017010139	0.0005208537	0.0004619525
0.0015291287	0.0004310027	0.0003779784
0.0013739632	0.0003558172	0.0003084348
0.0012339730	0.0002930703	0.0002510165
0.0011077458	0.0002408400	0.0002037507
0.0009939914	0.0001974746	0.0001649563

Realizado por: Esparza, D, 2022.

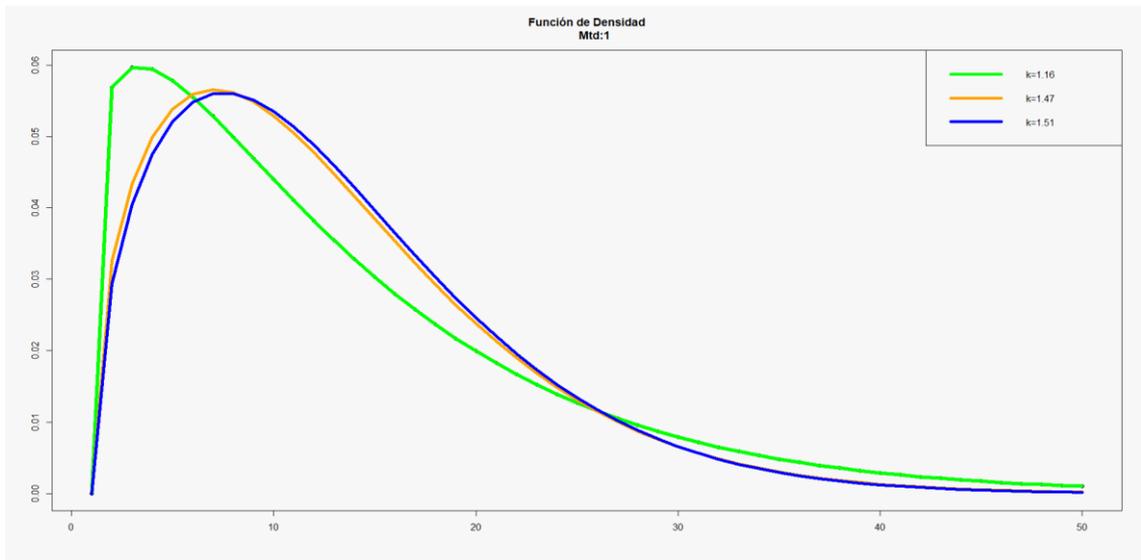


Gráfico 23-3: FDP: Cuadrados mínimos EM Chimborazo

Realizado por: Esparza, D, 2022

Se analizó el gráfico (23-3) que está representado con un conjunto de gráficos de la FDP de Weibull para los años 2018, 2019 y 2020 de la estación meteorológica Chimborazo para distintos valores del parámetro k mediante el método de mínimos cuadrados obteniendo valores de 1.16, 1.47 y 1.51 para los años correspondientes, donde observamos la influencia de los parámetros en la curva.

Tabla 23-3: FDP: Máxima verosimilitud EM Chimborazo
Función de densidad de probabilidad

Año 2018	Año 2019	Año 2020
0.000000	0.000000	0.000000
2,64E+04	1,47E+04	1,54E+04
3,92E+04	2,68E+04	2,72E+04
4,81E+04	3,73E+04	3,71E+04
5,42E+04	4,61E+04	4,52E+04
5,82E+04	5,33E+04	5,17E+04
6,03E+04	5,86E+04	5,65E+04
6,09E+04	6,22E+04	5,97E+04
6,02E+04	6,41E+04	6,14E+04
5,86E+04	6,44E+04	6,16E+04
5,61E+04	6,33E+04	6,07E+04
5,30E+04	6,10E+04	5,87E+04
4,95E+04	5,77E+04	5,58E+04
4,58E+04	5,38E+04	5,23E+04
4,19E+04	4,93E+04	4,84E+04
3,80E+04	4,45E+04	4,41E+04
3,41E+04	3,96E+04	3,97E+04
3,04E+04	3,48E+04	3,53E+04
2,69E+04	3,02E+04	3,11E+04
2,36E+04	2,59E+04	2,70E+04

2,06E+04	2,19E+04	2,33E+04
1,78E+04	1,83E+04	1,98E+04
1,53E+04	1,51E+04	1,67E+04
1,31E+04	1,23E+04	1,39E+04
1,11E+04	9,92E+03	1,15E+04
9,36E+03	7,92E+03	9,41E+03
7,85E+03	6,24E+03	7,63E+03
6,55E+03	4,87E+03	6,12E+03
5,43E+03	3,76E+03	4,87E+03
4,48E+03	2,87E+03	3,84E+03
3,67E+03	2,17E+03	3,00E+03
3,00E+03	1,62E+03	2,32E+03
2,43E+03	1,20E+03	1,78E+03
1,97E+03	8,81E+02	1,36E+03
1,58E+03	6,39E+02	1,02E+03
1,26E+03	4,59E+02	7,66E+02
1,01E+03	3,26E+02	5,68E+02
7,97E+02	2,29E+02	4,18E+02
6,29E+02	1,60E+02	3,05E+02
4,93E+02	1,10E+02	2,21E+02
3,86E+02	7,53E+01	1,58E+02
3,00E+02	5,09E+01	1,13E+02
2,32E+02	3,41E+01	7,95E+01
1,79E+02	2,26E+01	5,57E+01
1,37E+02	1,49E+01	3,87E+01
1,05E+02	9,69E+00	2,67E+01
8,00E+01	6,25E+00	1,83E+01
6,06E+01	3,99E+00	1,24E+01
4,58E+01	2,52E+00	8,34E+00
3,44E+01	1,58E+00	5,58E+00

Realizado por: Esparza, D, 2022.

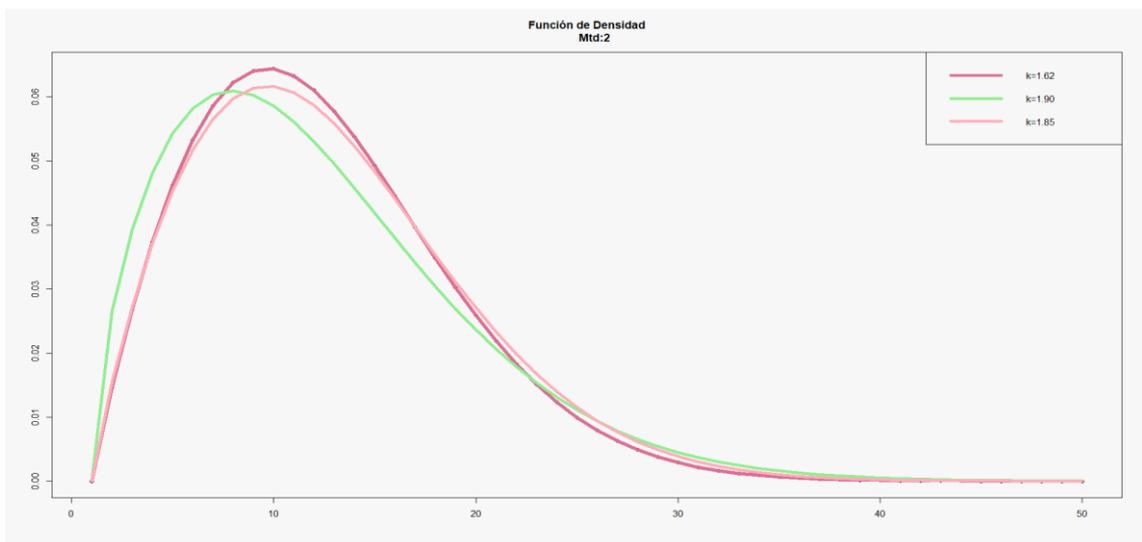


Gráfico 24-3: FDP: Máxima verosimilitud EM Chimborazo

Realizado por: Esparza, D, 2022.

En el gráfico (24-3) que está representado con un conjunto de gráficos de la FDP de Weibull para los años 2018, 2019 y 2020 de la estación meteorológica Chimborazo para distintos valores del parámetro k mediante el método de máxima verosimilitud, obteniendo resultados de 1.62, 1.90 y 1.85 para los años correspondientes, donde observamos la influencia de los parámetros en la curva.

Tabla 24-3: FDP: Método empírico EM Chimborazo
Función de densidad de probabilidad

Año 2018	Año 2019	Año 2020
0.000000	0.000000	0.000000
3,17E+04	1,99E+04	9,86E+03
5,06E+04	3,64E+04	9,73E+06
6,40E+04	5,05E+04	5,33E+08
7,30E+04	6,17E+04	8,87E+09
7,80E+04	6,99E+04	7,63E+10
7,97E+04	7,51E+04	4,29E+11
7,86E+04	7,73E+04	1,80E+12
7,52E+04	7,69E+04	6,04E+12
7,01E+04	7,43E+04	1,71E+13
6,39E+04	6,99E+04	4,20E+13
5,71E+04	6,41E+04	9,23E+13
5,01E+04	5,75E+04	1,84E+14
4,32E+04	5,05E+04	3,38E+14
3,66E+04	4,34E+04	5,75E+14
3,05E+04	3,66E+04	9,19E+14
2,51E+04	3,03E+04	1,39E+15
2,03E+04	2,46E+04	1,98E+15
1,62E+04	1,97E+04	2,71E+15
1,28E+04	1,54E+04	3,53E+15
9,95E+03	1,19E+04	4,42E+15
7,64E+03	9,03E+03	5,33E+15
5,79E+03	6,74E+03	6,20E+15
4,34E+03	4,95E+03	6,98E+15
3,22E+03	3,58E+03	7,61E+15
2,35E+03	2,54E+03	8,04E+15
1,70E+03	1,78E+03	8,26E+15
1,22E+03	1,23E+03	8,26E+15
8,63E+02	8,35E+02	8,04E+15
6,04E+02	5,58E+02	7,63E+15
4,18E+02	3,68E+02	7,07E+15
2,87E+02	2,39E+02	6,39E+15
1,94E+02	1,53E+02	5,65E+15
1,31E+02	9,63E+01	4,89E+15
8,67E+01	5,98E+01	4,13E+15
5,70E+01	3,66E+01	3,43E+15
3,71E+01	2,21E+01	2,78E+15
2,39E+01	1,31E+01	2,21E+15

1,53E+01	7,70E+00	1,73E+15
9,67E+00	4,45E+00	1,32E+15
6,05E+00	2,53E+00	9,93E+14
3,76E+00	1,42E+00	7,33E+14
2,31E+00	7,88E-01	5,31E+14
1,40E+00	4,30E-01	3,78E+14
8,47E-01	2,32E-01	2,64E+14
5,06E-01	1,23E-01	1,82E+14
3,00E-01	6,44E-02	1,23E+14
1,76E-01	3,33E-02	8,16E+13
1,02E-01	1,69E-02	5,34E+13
5,89E-02	8,51E-03	3,43E+13

Realizado por: Esparza, D, 2022

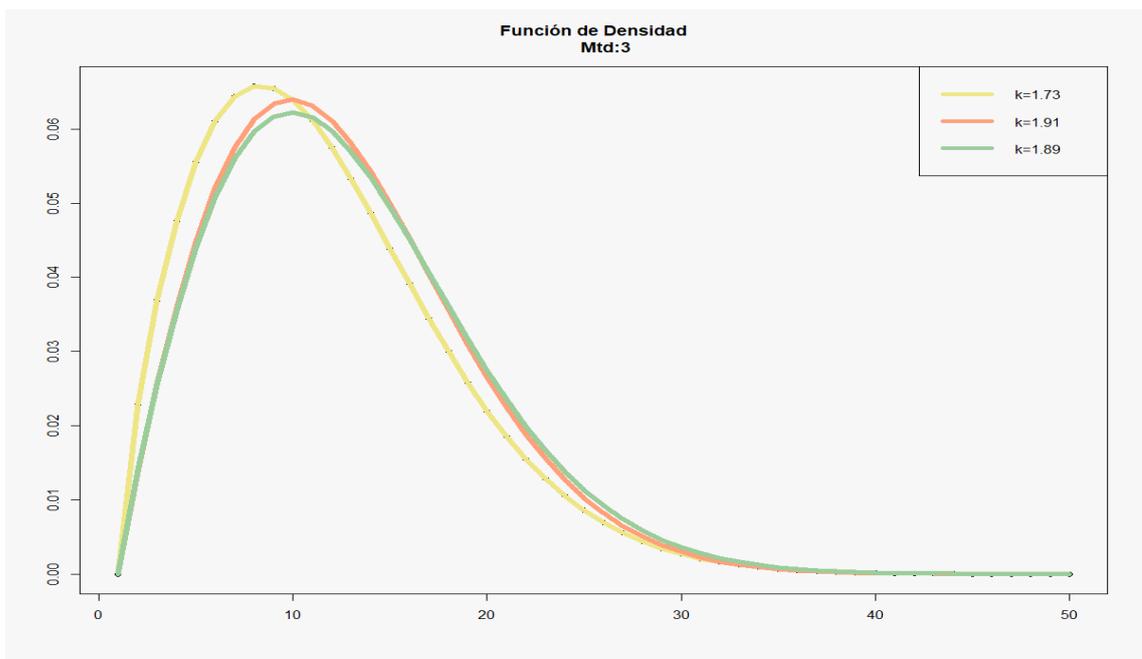


Gráfico 25-3: FDP: Método empírico EM Chimborazo

Realizado por: Esparza, D, 2022

Como resultado de la FDP de Weibull para los años 2018, 2019 y 2020 que está representado en el (grafico 25-3) para los distintos valores del parámetro (k) calculados mediante el método empírico, obteniendo valores de 1.73, 1.91 y 1.89 para los años correspondientes de la estación meteorológica Chimborazo, donde observamos la influencia de los parámetros en la curva.

Tabla 25-3: FDP: Cuadrados mínimos EM San Juan
Función de densidad de Probabilidad

Año 2019	Año 2020
0.00000000	0.000000000
0.22819810	0.148071979
0.22218637	0.140382339
0.20160923	0.123693285
0.17687966	0.105174779

0.15192932	0.087419896
0.12852925	0.071474970
0.10746022	0.057690986
0.08898762	0.046076475
0.07309741	0.036472495
0.05962665	0.028646825
0.04833981	0.022346033
0.03897418	0.017323761
0.03126675	0.013355112
0.02496935	0.010242799
0.01985660	0.007818525
0.01572921	0.005941690

Realizado por: Esparza, D, 2022

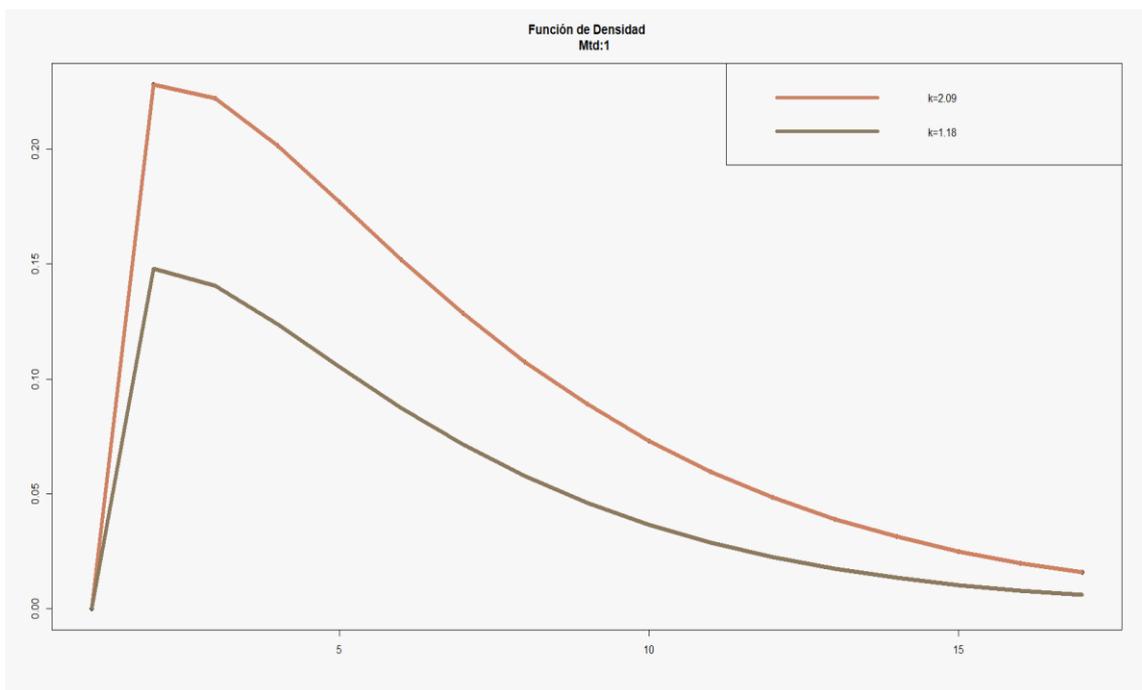


Gráfico 26-3: FDP: Cuadrados mínimos EM San Juan

Realizado por: Esparza, D, 2022

En el gráfico (26-3) que está representado con un conjunto de gráficos de la FDP de Weibull para los años 2019 y 2020 de la estación meteorológica San Juan, para distintos valores del parámetro k mediante el método cuadrados mínimos, obteniendo resultados de 2.09 y 1.18 para los años correspondientes, donde observamos la influencia de los parámetros en la curva.

Tabla 26-3: FDP: Máxima Verosimilitud EM San Juan
Función de densidad de Probabilidad

Año 2019	Año 2020
0.000000	0.000000
1,40E-06	1,34E+03
2,29E-01	3,55E+04
2,57E+02	2,16E+05

3,71E+04	4,92E+05
1,10E+06	2,49E+05
4,45E+01	6,89E+03
1,37E-92	8,27E-01

Realizado por: Esparza, D, 2022

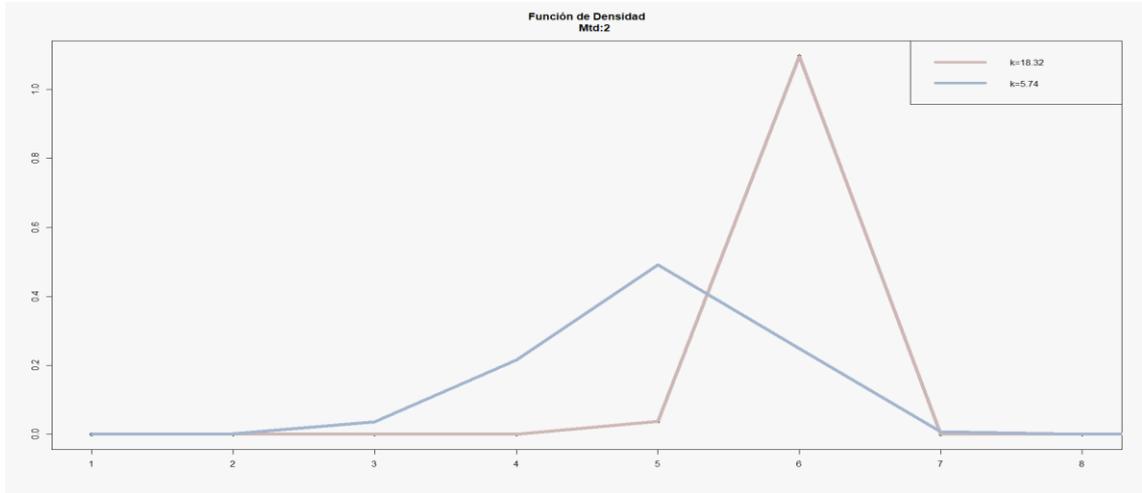


Gráfico 27-3: FDP: Cuadrados mínimos EM San Juan

Realizado por: Esparza, D, 2022

Como resultado de la FDP de Weibull para los años 2019 y 2020 de la estación meteorológica San Juan que está representado en el (grafico 27-3) para los distintos valores del parámetro (k) calculados mediante el método de máxima verosimilitud, obteniendo valores de 18.32, 5.74 para los años correspondientes, donde observamos la influencia de los parámetros en la curva.

Tabla 27-3: FDP: Método empírico EM San Juan
Función de densidad de Probabilidad

Año 2019	Año 2020
0.000000	0.0000000000
1,41E+01	0.0107649841
9,01E+02	0.1321137299
1,02E+04	0.5038165592
5,57E+04	10.046735704
1,88E+05	11.182.971105
3,74E+05	0.6497565107
3,16E+05	0.1730863911
5,46E+04	0.0178497842
5,03E+02	0.0005842565

Realizado por: Esparza, D, 2022

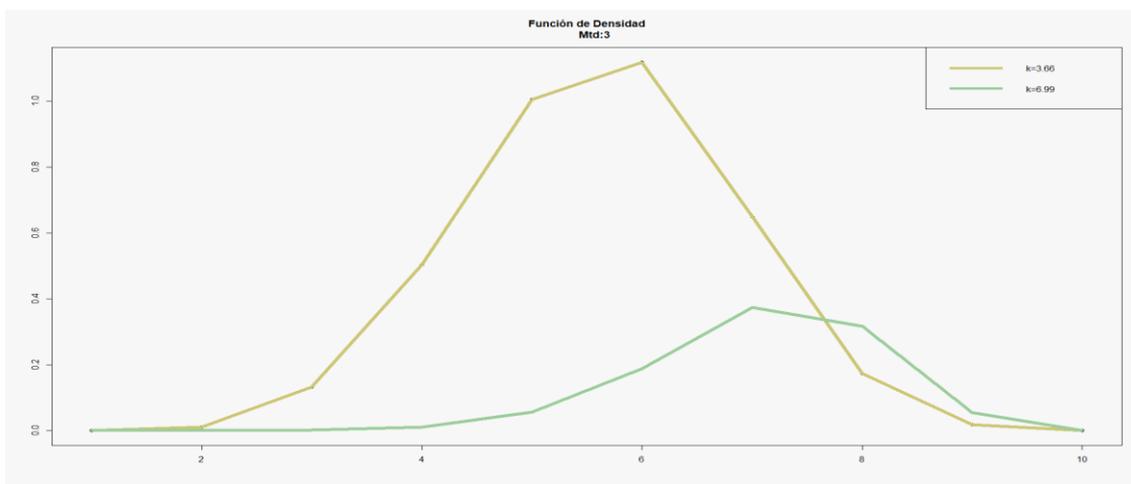


Gráfico 28-3: FDP: Método empírico EM San Juan

Realizado por: Esparza, D, 2022

Se analizó el (gráfico 28-3) que está representado con un conjunto de gráficos de la FDP de Weibull para los años 2019 y 2020 para distintos valores del parámetro k mediante el método empírico obteniendo valores de 3.66 y 6.99 para los años correspondientes, donde observamos la influencia de los parámetros en la curva.

3.8. Evaluación de parámetros

Tabla 28-3: Evaluación de parámetros EM Chimborazo

MÉTODO DE ESTIMACIÓN	AÑO 2018			AÑO 2019			AÑO 2020		
	MSE	RMSE	MAE	MSE	RMSE	MAE	MSE	RMSE	MAE
M1: Cuadrados Mínimos	0.6201	0.7874	0.7281	0.6446	0.8029	0.7333	0.6427	0.8017	0.7305
M2: Máxima Verosimilitud	0.6608	0.8129	0.6608	0.6524	0.8077	0.7355	0.7009	0.8372	0.7667
M3: Empírico	0.7364	0.8581	0.7939	0.7218	0.8496	0.7791	0.7124	0.8440	0.7751

Realizado por: Esparza, D, 2022

Una vez calculado el error cuadrático medio (MSE), para los tres diferentes métodos en el año 2018, 2019 y 2020 el que presento un menor error es el métodos de cuadrados mínimos obteniendo los valores de 0.6201, 0.6446 y 0.6427 respectivamente, el error cuadrático medio de la raíz (RMSE) el menor error es de 0.7874, 0.8029 y 0.8017 correspondientes a los años 2018, 2019 y 2020 en el método de cuadrados mínimos y el error medio absoluto (MAE) con el menor error es de 0.6608 en el año 2018 con el método de máxima verosimilitud, en el año 2019 un error de 0.7333 en el método de cuadrados mínimos y en el año 2020 un error de 0.7305 en el método de cuadradas mimos, que se pueden visualizar en la **Tabla 28-3**.

Tabla 29-3: Evaluación de parámetros EM San Juan

MÉTODO DE ESTIMACIÓN	AÑO 2018			AÑO 2019			AÑO 2020		
	MSE	RMSE	MAE	MSE	RMSE	MAE	MSE	RMSE	MAE
M1: Cuadrados Mínimos	NAN	NAN	NAN	0.50	0.71	0.61	0.51	0.71	0.63
M2: Máxima Verosimilitud	NAN	NAN	NAN	0.31	0.5597	0.3425	0.2941	0.5423	0.3526
M3: Empírico	NAN	NAN	NAN	0.2112	0.4596	0.2551	0.3296	0.5741	0.4454

Realizado por: Esparza, D, 2022

Basándonos en el error cuadrático medio (MSE), para los tres diferentes métodos en el año 2018, 2019 y 2020 el que presento un menor error es el métodos de cuadrados mínimos obteniendo los valores de 0.6201, 0.6446 y 0.6427 respectivamente, el error cuadrático medio de la raíz (RMSE) el menor error es de 0.7874, 0.8029 y 0.8017 correspondientes a los años 2018, 2019 y 2020 en el método de cuadrados mínimos y el error medio absoluto (MAE) con el menor error es de 0.6608 en el año 2018 con el método de máxima verosimilitud, en el año 2019 un error de 0.7333 en el método de cuadrados mínimos y en el año 2020 un error de 0.7305 en el método de cuadros mimos, que se pueden visualizar en la **Tabla 29-3**.

3.9. Velocidad del viento más probable

Tabla 30-3: Velocidad del viento más probable

Estación	2018	2019	2020
Chimborazo	2.33	6.03	6.48
San Juan	0.10	6.36	7.37

Realizado por: Esparza, D, 2022

Calculando la velocidad del viento más probable en la estación meteorológica Chimborazo para el año 2018 se tiene un viento probable de 2.33 m/s, para el año 2019 de 6.03 m/s y para el año 2020 de 6.48 m/s. En la estación meteorológica San Juan en el año 2018 se obtuvo un viento probable de 0.10 m/s, en el año 2019 de 6.36 m/s y en el año 2020 un viento probable de 7.37 m/s, presentados en la **Tabla 30-3**.

3.10. Potencial energético

Una vez determinado cual es el mejor método para la detección de los parámetros de Weibull procedemos a cálculo de la velocidad del viento más probable y la velocidad del viento que lleva máxima energía.

Tabla 31-3: Densidad de la potencia

Estación	Velocidad del viento (m/s)	Densidad de la Potencia w/m^2
Chimborazo	11.22	607.64
San Juan	4.10	26.87

Realizado por: Esparza, D, 2022

La **Tabla 31-3** presentó los valores de la densidad de potencia para las estaciones estudiadas, en la estación meteorológica Chimborazo la velocidad de viento media fue de 11.59 m/s y su densidad de potencia es de 607.64 w/m^2 , siendo un valor significativo para la realización de un proyecto de energía eólica en la zona Lomas de Rasutambo. Al analizar los resultados hallados en el estudio realizado por Enríquez y Moreno en el año 2015 y 2016 se observó una densidad de potencia por hora de 914.08 w/m^2 (Enríquez-García y Moreno-Avilés 2020, p. 1085). Para la estación meteorológica San Juan la velocidad de viento media es de 4.10 m/s y su densidad de potencia fue de 26.87 w/m^2 siendo un valor muy pequeño comparado con el valor mínimo de densidad de potencia para la generación de energía (200 w/m^2), por lo tanto, no es favorable efectuar un proyecto de parque eólico en la zona de San Juan.

CONCLUSIONES

Al analizar el diagrama de caja para la variable Velocidad del viento, muestra de manera visual y rápida la presencia de datos atípicos, al analizarla mediante el método propuesto MAD para la estación meteorológica de Chimborazo para el año 2018 se obtuvo un total de 0.55%, para el año 2019 0.27%, para el año 2020 4.10%, mientras que para la estación meteorológica San Juan para el año 2018 se obtuvo un total de 45.48%, para el año 2019 2.19% y para el año 2020 0.81%.

Mediante el análisis estadístico, el viento promedio para la estación Meteorológica Chimborazo es de 11.59 m/s el cual se encuentra en una escala de Beaufort de 6 grados lo que se define como un viento fuerte, mientras que el viento promedio para la estación Meteorología San Juan es de 4.10 m/s que se encuentra en una escala de 3 grados lo que se define como una pequeña brisa.

Para la estación meteorológica Chimborazo el parámetro de forma (k) se encuentra en un intervalo de 1.16 a 1.90 m/s, mientras que el parámetro de escala (c) se encuentra en un intervalo de 12.20 a 13.80, a diferencia de la estación meteorológica San Juan el parámetro de forma (k) se encuentra en un intervalo de 23.01 a 2.09 m/s y el parámetro de escala (c) varía de 0.09 a 5.11.

Realizando los cálculos de la distribución Weibull para ambas estaciones, se determina que la estación meteorológica de Chimborazo presenta mejores resultados para el parámetro de forma (k) y parámetros de escala (c), y una densidad de potencia de 607.64 w/m^2 , donde se podría realizar un estudio económico para la creación de un parque eólico en la zona Lomas de Rasutambo.

Los resultados obtenidos se realizaron a través del software estadístico R a través de su interfaz RStudio, mediante un código propio se ha logrado determinar los parámetros de escala c y de forma k de la distribución Weibull.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que las estaciones meteorológicas tengan un mantenimiento constante de sus instrumentos de medición para evitar fallas al momento de la recolección de datos, ya que si los datos presentan falla se corre el riesgo de realizar análisis erróneos.

Si el parámetro de forma k es igual o mayor a 2 se recomienda realizar los calculo mediante la ley de Rayleigh.

Se puede realizar los cálculos de la velocidad del viento con datos tomados en intervalos de minutos y horas, para poder obtener resultados más precisos.

Se recomienda realizar los cálculos de los parámetros de la distribución Weibull con la toma de datos de la velocidad de viento en alturas de 10m, 50m, 80m y 120m, para observar la variación que tienen los parámetros a diferentes alturas.

Es recomendable tener un plan de contingencia para minimizar el impacto ambiental en la construcción de parques eólicos.

Los sensores deben ser ubicados en lugares libres de obstáculos para que permita captar la dirección e intensidad del viento en todas las direcciones.

Se recomienda analizar los cálculos del potencial energético en todas las estaciones meteorológicas de Chimborazo para determinar cuáles son las que presentan un mayor potencial energético para la creación de una central eólica.

BIBLIOGRAFÍA

ARROYO, E.H., TUTA, E.C. y MORA, G.G. "Comparative Analysis of the Weibull Model and Observed Wind Data in the City of Floridablanca, Colombia". *TECCIENCIA* [en línea], 2018, (Colombia) 13(25), pp. 66-70. [Consulta: 30 junio 2022]. ISSN 2422-3670, 1909-3667. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6799763>

BAILEY, B.H., MCDONALD, S.L., BERNADETT, D.W., MARKUS, M.J. y ELSHOLZ, K.V. *Wind resource assessment handbook: Fundamentals for conducting a successful monitoring program.* [en línea]. New York-USA: Cole Boulevard, 1997. [Consulta: 2 septiembre 2021]. Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/486127/>.

BURBANO, V. y NARVÁEZ, R. "Evaluación de la pre factibilidad para la generación de energía eléctrica mediante la sinergia entre las energías eólica y almacenamiento por bombeo de agua en la isla San Cristóbal - Galápagos". *Revista Técnica «energía»* [en línea], 2021, (Ecuador) 17(2), pp. 29-43. [Consulta: 1 febrero 2022]. ISSN 2602-8492. Disponible en: <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/414>.

CREUS, A. *Energías renovables* [en línea]. 2a. ed. Barcelona-España: Cano Pina, 2014. [Consulta: 31 enero 2022]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/43075>.

Energía eólica. *Descubre La Energia* [blog]. [Consulta: 7 enero 2021]. Disponible en: <https://descubrelaenergia.fundaciondescubre.es/sobre-la-energia/fuentes-de-energia/energias-renovables/energia-eolica/>.

ENRÍQUEZ-GARCÍA, L.A. y MORENO-AVILÉS, H.O. "Wind characteristics and wind power available in the andean region of the province of Chimborazo". *Dominio de las ciencias*, vol. 6, no. 3 (2020), (Ecuador) pp. 17.

ESPINOZA, M.D. *Atlas del sector eléctrico ecuatoriano* [en línea]. Guayaquil-Ecuador: MEER, 2020 [Consulta: 15 diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/estadisticas-del-sector-electrico-ecuatoriano-buscar/>

GALDIANO HERNÁNDEZ, M. *APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES.* [en línea]. Barcelona-España: ICB, 2011. [Consulta: 27 enero 2022]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/59559>.

ISLAM, K.D., DUSSADEE, N. y CHAICHANA, T. "An Approach to Determine the Weibull Parameters and Wind Power Analysis of Saint Martin's Island, Bangladesh". *MATEC Web of Conferences*, vol. 70, no. 3(2016) pp. 09004.

JARUTA ROVIRA, L. *Las energías renovables*. [en línea]. Barcelona-España: UOC, 2015. [Consulta: 26 enero 2022]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/57883>.

KANG, D., KO, K. y HUH, J. "Comparative Study of Different Methods for Estimating Weibull Parameters: A Case Study on Jeju Island, South Korea". *Energies*, vol. 11, no. 2 (2018), (South Korea) pp. 356.

MANWELL, J.F. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Washington-USA: John Wiley, 2009, pp. 705.

MEER. *Atlas eólico del Ecuador con fines de generación eléctrica*. Quito-Ecuador: MEER, 2012. pp.55.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES. *CENTRAL EÓLICA "VILLONACO"*. [blog]. [Consulta: 1 febrero 2022]. Disponible en: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/central-eolica-villonaco/>.

MUÑOZ, J., MORENO, J.L. y PASCUAL, A. "Outliers: A Formal Approach". *International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique* [en línea], 1990, (United State of America) 58(3), pp. 215-226. [Consulta: 22 agosto 2021]. ISSN 0306-7734. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/1403805>.

ORTIZ AGUIRRE, I.J. *Los parques eólicos: una mirada desde la administración y gerencia de los proyectos de energía del Ecuador* [en línea]. Quito-Ecuador: Tecnocientífica Americana, 2020 [Consulta: 18 noviembre 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/174267>.

RANGANATHAN, C.R., RAMANATHAN, M. y SWAMINATHAN, K.R. "Estimation of wind power availability in Tamil Nadu". *Renewable Energy* [en línea], 1991 (Holanda) 1(3) pp. 429-434. [Consulta: 2 abril 2021] ISSN 0960-1481. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/096014819190053R>.

SEGURO, J.V. y LAMBERT, T.W. "Modern estimation of the parameters of the Weibull

wind speed distribution for wind energy analysis". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 85, no. 1 (2000) pp. 75-84. ISSN 01676105.

SILVA, J.L.N. y VALAREZO, A.F.R. Estudio de viabilidad técnica de parques eólicos en la provincia de Chimborazo (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador. 2017, pp. 98. [Consulta: 18 agosto 2021]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.ed.ec/handle/123456789/6722>.

SOLÍS GALLO, M.C. Análisis de los costos y los beneficios económicos de la sustitución de combustibles fósiles por energía renovable para la generación de electricidad (Trabajo de titulación). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito-Ecuador. 2011 pp. 146. [Consulta: 15 febrero 2022]. Disponible en: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/2961>.

SUKKIRAMATHI, K. y SESHIAIAH, C. "Analysis of wind power potential by the three-parameter Weibull distribution to install a wind turbine". *Energy Exploration & Exploitation*, vol. 38, no. 1 (2020), (India) pp. 158-174.

TALAYERO NAVALES, A.P. y TELMO MARTÍNEZ, E. *ENERGÍA EÓLICA (SERIE ENERGÍAS RENOVABLES)*. [en línea]. Zaragoza-España: Prensas Universitarias, 2017. [Consulta: 1 febrero 2022]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/esPOCH/44857>.

Tipos de vientos. *Nuestroclima* [blog]. [Consulta: 2 septiembre 2021]. Disponible en: <https://nuestroclima.com/tipos-de-vientos/>.

TOURE, S. "Investigations on the Eigen-coordinates method for the 2-parameter weibull distribution of wind speed". *Renewable Energy* [en línea], 2005. (Holanda) 30(4), pp. 11. [Consulta: 2 abril 2021]. ISSN 0960-1481. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148104002964>

TWENERGY. *Energía Eólica: Qué es, Definición y Concepto*. [blog]. [Consulta: 1 febrero 2022]. Disponible en: <https://twenergy.com/energia/energia-eolica/>.

UDOAKAH, Y. y IKAFIA, U. "determination of weibull parameters and analysis of wind power potential in coastal and non-coastal sites in akwa ibom state". *Nigerian Journal of Technology*, vol. 36, no. 3 (2017), (Nigeria) pp. 923-929.

VILLARRUBIA, M. *Ingeniería de la energía eólica: nuevas energías*. México-México:

Alfaomega, 2013 pp. 2078.

ZAMBRANO, C.M.H. Energias Renovables, tendencia en Ecuador (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad Espíritu Santo, Guayaquil-Ecuador. 2015 pp. 1-10.

ANEXOS

ANEXO A: LIBRERÍAS UTILIZADAS

```
library(openxlsx)
library(readr)
library(readxl)
library(xlsx)
library(openair)
library(fdth)
library(tsoutliers)
library(openair)
```

ANEXO B: LECTURAS DE DATOS

```
SJ_2018 <- read.xlsx(xlsxFile = "Datos_Viento_SJ.xlsx", sheet = "2018")
SJ_2019 <- read.xlsx(xlsxFile = "Datos_Viento_SJ.xlsx", sheet = "2019")
SJ_2020 <- read.xlsx(xlsxFile = "Datos_Viento_SJ.xlsx", sheet = "2020")
```

ANEXO C: ROSA DE LOS VIENTOS

```
windRose(mydata = SJ_2018, ws = "VV", wd = "DV")
windRose(mydata = SJ_2019, ws = "VV", wd = "DV")
windRose(mydata = SJ_2020, ws = "VV", wd = "DV")
```

ANEXO D: CALCULO DE LOS DATOS ATÍPICOS

```
#DATOS ATIPICOS 2018
boxplot(SJ_2018$VV, col = "lightblue")
Velocidad_del_Viento_2018<- ts(SJ_2018$VV,frequency = 1 )
str(Velocidad_del_Viento_2018)
plot(Velocidad_del_Viento_2018 )
library(forecast)
datoSJ18 <- na.interp(SJ_2018$VV)
datoSJ18
Velocidad_del_Viento_2018<- ts(datoSJ18,frequency = 1 )
str(Velocidad_del_Viento_2018)
plot(Velocidad_del_Viento_2018 )

v_SJ18<-outliersMAD(datoSJ18)
summary(v_SJ18)
boxplot(v_SJ18, col = "lightblue")

v_SJ18[v_SJ18==0] <- NA
vSJ18<- na.omit(v_SJ18)
summary(vSJ18)
```

ANEXO E: DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA

```
dist18 <- fdt(vSJ18)
hist(vSJ18, freq = F, col = "lightblue", main = " Histograma",
     ylab = "Frecuencia Relativa", xlab = "Velocidad del viento m/s")
```

ANEXO F: MÉTODO DE CUADRADOS MÍNIMOS

```
breaks18 = seq(0.0693, 0.12, by = 0.00577)
v18 <- matrix(c(0.07507, 0.08083, 0.0866, 0.09237, 0.09813, 0.1039, 0.1097, 0.1154), ncol = 1,
byrow = TRUE)
xSJ18<- log(v18)
carb.coutSJ18 =cut(vSJ18, breaks18, right = FALSE)
carb.freqSJ18 = table(carb.coutSJ18)
cbind(carb.freqSJ18)
carb.relfreqSJ18 = carb.freqSJ18/ 199
xxSJ18<- cbind(carb.relfreqSJ18)
cbind(carb.freqSJ18, carb.relfreqSJ18)
car.cumfreqSJ18 = cumsum(carb.relfreqSJ18)
cbind(carb.freqSJ18, carb.relfreqSJ18, car.cumfreqSJ18)
cumfreq0SJ18 = c (0, cumsum(carb.freqSJ18))
ySJ18 <- log(-log(1- car.cumfreqSJ18))
p1SJ18<- xxSJ18*xSJ18
p2SJ18<- xxSJ18*(xSJ18)^2
p3SJ18<- xxSJ18*ySJ18
p4SJ18<- xxSJ18*xSJ18*ySJ18
s1SJ18<- sum(p1SJ18)
s2SJ18<- sum(p2SJ18)
s3SJ18<- sum(p3SJ18)
s4SJ18<- sum(p4SJ18)
caSJ18<- (s3SJ18-(s1SJ18*s3SJ18))/(s2SJ18-(s1SJ18)^2)
cbSJ18<- s3SJ18-caSJ18*s1SJ18
pcSJ18<- exp(-cbSJ18/caSJ18)
```

ANEXO G: MÉTODO DE MÁXIMA VEROSIMILITUD

```
maxv<- function(dato){
  a<- dato^2
  b<- log(dato)
  c<- a*b
  d<- sum(c)
  f<- sum(a)
  g<- sum(b)
  h<- d/f
  i<- g/NROW(dato)
  factork<- (h-i)^-1
  factorc<- ((1/NROW(dato))*f)^(1/2)
  data.frame(factork, factorc)
}
mverSJ18<- maxv(vSJ18)
```

ANEXO H: MÉTODO EMPÍRICO

```
media_SJ18 <- mean(vSJ18)
d2SJ18 <- (vSJ18-media_SJ18)^2
sd2SJ18 <- sum(d2SJ18)
nSJ18 <- length(vSJ18)
varianzaSJ18 <- sd2SJ18/(nSJ18-1)
desviacionSJ18 <- sqrt(varianzaSJ18)
M3K_SJ18 <- (desviacionSJ18/media_SJ18)^-1.086
M3C_SJ18 <- (media_SJ18/(1.9190*(1+(1/M3K_SJ18))))
```

ANEXO I: DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVA Y ACUMULATIVA COMPLEMENTARIA

```
dacumu_SJ19 <- 1-exp(-(vi_SJ/pcSJ19)^caSJ19)
dacucom_SJ19 <- exp(-(vi_SJ/pcSJ19)^caSJ19)
plot(dacumu_SJ19)
par(bg = "#f7f7f7")
plot(dacucom_SJ19, main = "Distribución Acumulativa y Acumulativa Complementaria
  Mtd:1, 2019",
  ylab = "",
  xlab = "" )
lines(dacumu_SJ19, lwd=6, col="burlywood3")
lines(dacucom_SJ19, lwd= 6, col= "coral")
legend(x = "bottom",
  inset = c(0,-0.15),
  legend = c("D. A","D. A. C."),
  bty = "n",
  lty = c(1, 1),
  col = c("burlywood3", "coral"),
  lwd = 5,
  xpd = TRUE,
  horiz = TRUE)
```

ANEXO J: FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD

```
fdpw_SJ19 <- (caSJ19/pcSJ19)*(vi_SJ/pcSJ19)^(caSJ19-1)*exp(-(vi_SJ/pcSJ19)^caSJ19)
fdpw_SJ20 <- (caSJ20/pcSJ20)*(vi_SJ/pcSJ20)^(caSJ20-1)*exp(-(vi_SJ/pcSJ20)^caSJ20)
data.frame(fdpw_SJ19)
par(bg = "#f7f7f7")
plot(fdpw_SJ19, main = "Función de Densidad
  Mtd:1",
  ylab = "",
  xlab = "")
lines(fdpw_SJ19, lwd=6, col= "#CD8162")
lines(fdpw_SJ20, lwd=6, col= "#8B795E")
legend(x = "topright", # Posición
  legend = c("k=2.09","k=1.18"),
  lty = c(1, 1),
  col = c("#CD8162", "#8B795E"),
  lwd = 5)
```

ANEXO K: MSE, RMSE, MAE

```
mseM2_SJ19 <- mean ((fdpwM2_SJ19 - dacumuM2_SJ19 ) ^ 2)
rmseM2_SJ19 <- sqrt (mseM2_SJ19)
maeM2_SJ19 <- mean (abs((fdpwM2_SJ19 - dacumuM2_SJ19 )))
```

ANEXO L: POTENCIAL ENERGÉTICO

```
p<-0.7504
PE<- (1/2)*p*(11.59)^3
```