

DEPÓSITO LEGAL ZU2020000153

ISSN 0041-8811

E-ISSN 2665-0428

# Revista de la Universidad del Zulia

Fundada en 1947  
por el Dr. Jesús Enrique Lossada



**Ciencias del**  
**Agro,**  
**Ingeniería**  
**y Tecnología**

**Año 15 N° 42**

**Enero - Abril 2024**

**Tercera Época**

**Maracaibo-Venezuela**

## Estudio del comportamiento del viento en zonas Alto Andinas, Chimborazo - Ecuador

Carmen Elena Mantilla-Cabrera\*  
Ruth Genoveva Barba-Vera\*\*  
Vanessa Belén Morales-León\*\*\*  
Alex Fabián Inca-Falconí\*\*\*\*

### RESUMEN

El objetivo de esta investigación es analizar, desde el punto de vista estadístico, el comportamiento estocástico del viento tanto en magnitud como dirección y diagnosticar la viabilidad técnica de los emplazamientos ubicados en zonas altas andinas ecuatoriales de la Provincia de Chimborazo, a alturas comprendidas entre 2900 msnm y 4300 msnm. El análisis se orientó hacia la descripción de las variaciones de la velocidad y de dirección de viento para los periodos 2015, 2016 y 2017, utilizando datos meteorológicos de las estaciones automáticas “Chingazo y Chimborazo”. En cuanto a los resultados, se obtuvo valores medios anuales de velocidad de 6,23 m/s y 10,74 m/s para cada emplazamiento respectivo, también se observó que el 74.11 % de las velocidades muestreadas de la estación meteorológica Chingazo fueron mayores a 3 m/s con un máximo de 20 m/s; y, en el emplazamiento Chimborazo, el porcentaje de velocidades mayor a 3 m/s fue de 88.85% con una velocidad máxima de 31 m/s. En el caso del emplazamiento Chimborazo, la dirección predominante del viento fue Este\_Sur\_Este (ESE) con un 35.33%; y, para el emplazamiento Chingazo, la dirección predominante fue Este\_Norte\_Este (ENE) con un 32.43%, con resultados significativamente mayores que los requerimientos exigidos para la factibilidad técnica de implementar parques eólicos. Como conclusión, se puede afirmar que el análisis estadístico realizado en los emplazamientos es considerados factibles para implementar parques eólicos en zonas altas andinas ecuatoriales de la Provincia de Chimborazo a altitudes entre los 2900 msnm y 4300 msnm.

**PALABRAS CLAVE:** Comportamiento de vientos, zonas Alto Andinas, Análisis Estadístico, Chimborazo, Velocidad y Dirección.

\*Docente en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5422-7073>. E-mail: carmen.mantilla@esPOCH.edu.ec

\*\*Técnico Docente en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0272-171X>. E-mail: ruth.barba@esPOCH.edu.ec

\*\*\*Docente en la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo – Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8047-1966>. E-mail: vanessa.moralesl@esPOCH.edu.ec

\*\*\*\* Docente en la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo – Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3312-6692>. E-mail: alex.inca@esPOCH.edu.ec

Recibido: 02/10/2023

Aceptado: 30/11/2023

## Wind Behavior Study in High Andean Zones, Chimborazo - Ecuador

### ABSTRACT

This research aims to conduct a statistical analysis of wind behavior, both in terms of magnitude and direction, in equatorial high Andean zones within the Province of Chimborazo, spanning altitudes between 2900 meters above sea level (masl) and 4300 masl. The study utilizes meteorological data from the "Chingazo" and "Chimborazo" automatic weather stations for the years 2015, 2016, and 2017. The analysis reveals that the annual average wind speeds at the respective sites are 6.23 meters per second (m/s) and 10.74 m/s. Notably, 74.11% of the recorded wind speeds at the Chingazo station exceeded 3 m/s, with a maximum speed of 20 m/s. Meanwhile, at the Chimborazo site, 88.85% of the observed wind speeds exceeded 3 m/s, with a peak speed of 31 m/s. Furthermore, the predominant wind direction at the Chimborazo site is East\_South\_East (ESE), accounting for 35.33% of the data, while at the Chingazo site, it is East\_North\_East (ENE), representing 32.43% of the dataset. These findings exceed the minimum requirements for the technical feasibility of establishing wind farms. In conclusion, the statistical analysis conducted on these equatorial high Andean sites in the Chimborazo Province, spanning altitudes from 2900 masl to 4300 masl, supports the feasibility of implementing wind farms in these regions.

KEY WORDS: Wind behavior, High Andean zones, Statistical Analysis, Chimborazo, Speed and Direction.

### Introducción

El estudio de procesos estocásticos es una opción para trazar la factibilidad de ciertos proyectos o acciones, en el entendido que se trata de un ordenamiento cronológico y análisis de series temporales con un cierto grado de seguridad. Al vincularse con fenómenos de carácter meteorológico o ambiental, lo que se busca es disipar, en cierta medida, la incertidumbre propia del comportamiento de la naturaleza, con la finalidad de apoyar las actividades humanas. Según lo planteado por Pacheco (2020), el análisis estocástico es una vía alternativa para estudiar el comportamiento de algunos fenómenos, estimando el grado de error en la predicción.

En ese sentido, es importante considerar esta forma de análisis cuando de procesos naturales se trata, pues, se sabe que la dinámica ambiental tiene sus propios itinerarios y la forma en que se producen poseen un alto grado de aleatoriedad. De hecho, investigar acerca

de los vientos, su magnitud, dirección y velocidad, es parte de una antigua preocupación del ser humano. Los pueblos griegos y romanos ya presentaban iniciativas para desentrañar los misterios que encierran los procesos eólicos, en cuanto a su relación con el ser humano, sus posibles beneficios y las posibilidades de ser usados para mejorar la calidad de vida (Bustamante et al., 2015).

Ahora bien, algunos investigadores (Martínez y Garbi, 2020; Andrades y Múñes, 2012), afirman que en diferentes puntos de la superficie terrestre hay variación en la presión, debido a que el sol calienta la superficie del suelo, la masa de aire no permanece en reposo se desplaza constantemente, provocando aceleraciones en el movimiento del aire de la zona de mayor presión hacia la de menor, dando lugar al viento que se define por su velocidad y dirección. Así, las líneas que unen puntos de igual presión, y el viento predominante se denominan isobaras, estas se relacionan con la fuerza horizontal de presión y la fuerza de Coriolis de fundamental importancia en el comportamiento del viento en latitudes templadas y frías en niveles de altura, como ocurre en la región de Chimborazo, Ecuador.

Precisamente, al reflexionar sobre las características ambientales de la región en la que se enfoca el estudio, es preciso tener en cuenta que el viento sobre 100 metros de la superficie del suelo, puede considerarse paralelo a las isobaras, pero, en los niveles más bajos actúa la fricción superficial debida a la rugosidad del suelo, esto disminuye la magnitud del viento y hace que se desvíe hacia presiones bajas (Enríquez y Moreno, 2020). Este dato es fundamental, para poder tener una mejor claridad al momento de interpretar algunas mediciones relativas a la modelación estocástica que pudiese realizarse.

Entonces, las condiciones de viento para un área están definidas por su perfil en esa zona, la velocidad y dirección promedio, la distribución de la velocidad y dirección del viento, y los patrones mensuales de los vientos (Galán et al., 2015). En esta investigación se asume que la estadística permite determinar el comportamiento del viento en una zona con un criterio muy cercano a la realidad y, con ello, modelar y cuantificar la factibilidad de implementar sistemas de generación eólica, estimando la producción anual de energía que se puede llegar a tener en una futura zona de emplazamiento de un parque eólico.

1. Revisión de la Literatura y contextualización del estudio
  - 1.1. En relación a la Energía Eólica y su importancia

La energía puede manifestarse y tiene que ver con diferentes capacidades que se requieren para trabajar, producir movimiento o transformar el entorno. Todos los seres humanos la utilizan diariamente en sus diferentes actividades, incluso para alimentarse, para acudir al trabajos o para recrearse. Ahora bien, desde el punto de vista social, la energía tiene que ver con la posibilidad de construir mejores sociedades mediante el apoyo de ciertas fuentes energéticas que permiten la utilización de herramientas o instrumentos que facilitan ciertas labores o actividades. En ese sentido, una de esas fuentes de energía, utilizadas desde la antigüedad son los vientos.

La navegación parece haber sido la primera de las áreas en la que la energía eólica fue utilizada por el ser humano. Se utilizó para movilizar embarcaciones en algunos lugares de Egipto y China. En Europa, a mediados de la Edad Media, ya los vientos servían para moler granos, aunque en un nivel rudimentario, potenciando, su perspectiva para ser usado más adelante en tareas que facilitarían la vida de las personas. Es el caso que se presenta a principios del siglo XIX, en varios lugares de Norteamérica, con la utilización de los molinos de viento para bombear agua y, en la generación de electricidad para hogares e industrias (Mártil de la Plaza, 2021).

En la actualidad, el crecimiento poblacional y los objetivos de desarrollo tecnológico, industrial económico para mitigar los efectos de la pobreza sobre la humanidad han generado un incremento casi exponencial de la demanda mundial de energía. Para satisfacer esa demanda de energía se utiliza combustibles fósiles que a su vez producen grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, siendo este, uno de los factores preponderantes para el calentamiento global del planeta, por lo que para mitigar el cambio climático se han desarrollado políticas, investigaciones científicas y proyectos tecnológicos de energías alternativas amigables con el ambiente enmarcados en el tratado de Kyoto (Sánchez J. , 2019).

En un marco global en el que se intenta impulsar el uso de energías alternativas, la energía eólica, se ha erigido como una de las mejores opciones con un desarrollo importante en los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), y con mayor o menor grado en algunos países emergentes. De hecho, la eólica forma parte de esas iniciativas energéticas para incrementar el uso de otro tipo de energías cuyo uso ronda “un promedio de 2.3% desde el año 2015, lo cual ha contribuido a que las emisiones globales de carbono asociadas al consumo de energía se mantuvieron estables para el año 2014, al tiempo que la economía mundial creció” (Robles y Rodríguez, 2018:2).

En el contexto latinoamericano, hay un particular interés para potenciar las alternativas para producir y utilizar las energías renovables contando además, con muchas posibilidades y recursos para hacerlo. Tanto a nivel solar como eólica, la mayoría de los países latinoamericanos han adelantado o profundizado proyectos que se encuentran en esa línea de construir un mundo menos contaminado y contaminante en cuanto a la producción y usos de la energía. De acuerdo con la Organización Energy Global Monitor (2023), países como Brasil, Colombia y Chile, se mantienen a la cabeza de los proyectos eólicos y solares más importantes en la región.

### 1.2. Ecuador y sus posibilidades para la energía eólica

Ecuador también ha implementado políticas para la diversificación de la matriz energética con un enfoque especial en la utilización de la energía hidroeléctrica. Según Huera (2019), aunque la principal fuente de energía en el país se corresponde con la que se produce por el uso de los combustibles fósiles, son las opciones acuíferas las que se encuentran con un desarrollo relativamente estable, mientras las otras opciones de producción energética renovable aún es muy incipiente, con poca inversión pública y privada.

En cuanto a la energía eólica las iniciativas ecuatorianas se inscriben en los proyectos para la diversificación energética del país y, se han institucionalizados en los diferentes planes de desarrollo elaborados por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador (MEER) y por la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES), algo que permite una mayor disponibilidad de inversiones a través del presupuesto nacional. Concretamente, Ecuador cuenta con dos parques eólicos, Baltra en Galápagos de capacidad nominal de 2.25 MW y Villonaco en la provincia de Loja de 11.6 MW, por lo que el recurso eólico disponible aún no ha sido explotado ampliamente (Soto, 2017).

En ese orden de ideas, desde hace algún tiempo se han fraguado en el país, varias iniciativas promovidas, tanto por el gobierno como por otras entidades públicas, como las Universidades, para invertir en los estudios necesarios que permitan determinar emplazamientos con alto potencial eólico. Este tipo de procesos implica el desarrollo de análisis de factibilidad tanto técnica como económica, para implementar parques eólicos, con la suficiente rigurosidad y posibilidad de éxito. Se parte del hecho que los mapas

eólicos con escalas espaciales, por la complejidad topográfica del terreno produce grandes distorsiones tanto en la magnitud como en la dirección del viento, que no hace aplicable ya sea software o modelos de viento aplicables a nivel de mar y en zonas planas (Cantero, 2022).

Ecuador se encuentra en una región de características naturales únicas y privilegiadas gracias a su ubicación geográfica, pues le atraviesa la línea ecuatorial. La mayor parte de su territorio se encuentra el hemisferio sur y está ubicado geográficamente al noroeste de América del Sur, de Norte a Sur le cruza la Cordillera de los Andes que evidencia elevaciones máximas de casi 6300 msnm del nevado Chimborazo considerado uno de los puntos más altos de la Tierra (Castro, 2016; Titos et al., 2018). De acuerdo con estos autores, la singularidad de esta zona radica en su cercanía con el Sol, por estar alejada del centro de la Tierra.

Al analizar con mayor profundidad la posición geográfica del país, se evidencian elementos muy interesantes a la luz de esta investigación, puesto que su latitud se aproxima a cero, presenta vientos de montaña por la gradiente de altura y, dado que su topografía es amorfa, es normal que se formen irregularidades con distintas características meteorológicas y climáticas, por lo cual no todas las áreas son aprovechables para el uso del viento, pero existen zonas exclusivas de gran potencial eólico a lo largo de la cordillera de los Andes (Insaurralde y Palese, 2021).

### 1.3. La Región de Chimborazo

Por su parte, la provincia de Chimborazo se encuentra en la zona central del pasillo interandino de Ecuador, con varias de las cumbres más elevadas del país como Chimborazo, Carihuayrazo, Altar, Igualata, Tungurahua, Sangay, entre otros, posee una población total de 509.352 habitantes, su base económica es la agropecuaria, la agroindustria, el comercio y las artesanías. La región presenta un nivel bajo de contaminación, al ser parte de la cordillera de los Andes y según algunos estudios preliminares se ha podido determinar que podía poseer un gran potencial eólico (Sánchez et al., 2018).

La altura que caracteriza esta zona la hace especialmente interesante al momento de generar procesos de investigación que profundicen en sus recursos ambientales para la producción de energías renovables (Haro et al., 2020). A nivel mundial se conocen instalaciones de parques eólicos a alturas máximas de hasta 2750 msnm, los lugares en

estudio se encuentran en la provincia de Chimborazo. La primera estación es la de Chingazo y la segunda Chimborazo; presentan una altura de 2900 y 4300 msnm respectivamente, por estas características estos emplazamientos son únicas a razón de los parques eólicos ya existentes.

Al no existir estudios de comportamiento de viento en zonas altas de Ecuador, el objetivo de la presente investigación es analizar, desde el punto de vista estadístico, el comportamiento estocástico del viento, de su velocidad y dirección para poder determinar la factibilidad técnica de su aprovechamiento en la producción de energía eléctrica en zonas altas andinas ecuatoriales de la provincia de Chimborazo-Ecuador. En general, el artículo se divide en tres secciones, en primer lugar se realiza esta descripción teórico contextual, seguidamente se expone la metodología utilizada para finalmente presentar los resultados obtenidos en la investigación.

## 2. Materiales y Métodos

Metodológicamente es importante la descripción de los sitios de estudio, los cuales se encuentran ubicados en la provincia de Chimborazo, aproximadamente a 35 Km en línea recta entre sí. La estación meteorológica Chimborazo pertenece al cantón Riobamba, comunidad Loma de Rasutambo, Zona Pinanquil (El Arenal). Y la estación Chingazo al cantón Guano, comunidad San José de Chocón, sector de Chingazo Alto, tal como se muestran en la Figura 1.

Figura 1. Ubicación geográfica de los lugares en estudio.



Para complementar lo que se puede observar en la ilustración anterior en la Tabla 1 se presentan las variables meteorológicas que caracterizan los lugares de estudio en valores medios anuales.

Tabla I. Caracterización de los lugares de estudio

Estación meteorológica	Chimborazo	Chingazo
Característica		
Altitud [m.s.n.m]	4302,00	2940,00
Humedad relativa [%]	90,75	87,27
Temperatura [°K]	276,78	284,54
Presión atmosférica [atm]	0,77	0,88

Como se puede observar la estación Chimborazo presenta una temperatura promedio anual aproximada de 4 °C y Chingazo aproximadamente 12 °C. También se puede ver que Chingazo se encuentra a 1362 m.s.n.m. menos que Chimborazo, mientras su humedad relativa es menor, mientras la presión atmosférica es mayor.

En lo que respecta al análisis de comportamiento del viento, las estaciones meteorológicas automáticas cumplen con la norma de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), y se instalaron en estos lugares tras un pre-estudio. El equipamiento de la estación consta de un datalogger Vaisala, y sensores de: radiación global y difusa, velocidad y dirección de viento, precipitación, temperatura ambiente, humedad relativa, presión barométrica, temperatura de suelo a siete niveles y carga de batería, lo que permiten almacenar variables meteorológicas primarias.

Siguiendo con los aspectos metodológicos, es importante señalar que los datos de velocidad y dirección de viento para este estudio se muestrearon a 10 metros de altura sobre la superficie del suelo, cada 10 min según el estándar internacional para monitoreo de energía eólica, entre enero y diciembre de los años 2015, 2016 y 2017.

Igualmente es relevante acotar la aplicación de la metodología del análisis estadístico usando los softwares RStudio, Matlab y Excel. De acuerdo con Pazmiño et al., este tipo de estudios mantienen altos grados de confiabilidad y confianza, al estar apoyados en técnicas estadísticas estandarizadas (2018). El análisis en horas y meses del comportamiento del

viento se realizó mediante el uso de frecuencias acumulativas tanto para la velocidad como para la dirección, con la gráfica de la rosa de los vientos, lo que permitió estudiar su comportamiento.

Se determinó la densidad del aire con la ecuación (1), mediante la fórmula CIPM-2007, que relaciona temperatura del aire, humedad relativa y presión del aire.

$$\rho_{\theta} = \frac{0.348444p - h_r(0.0252t - 0.20582)}{273.15 + t} \quad (1)$$

Donde:

$\rho_{\theta}$ , es la densidad del aire,  $p$ , es presión atmosférica,  $h_r$ , es humedad relativa ambiente y  $t$ , es temperatura ambiente, en valores medios anuales.

También se determinó la dispersión [10-11] de las muestras con respecto a la media con la ecuación (2).

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Donde:

$s$ , es la desviación estándar,  $x_i$ , cada uno de los datos muestreados,  $\bar{x}$ , es la media y  $N$ , el total de los datos de velocidad de viento.

Y el coeficiente de variación [12] ( $cv$ ) definido como el radio entre la media y la desviación estándar de la velocidad del viento expresado en porcentajes por la ecuación (3).

$$cv = \frac{\sigma}{\mu} * 100 \quad (3)$$

Donde:

$cv$ , es el coeficiente de variación,  $\sigma$ , es la desviación estándar y  $\mu$ , es la media de la velocidad de viento.

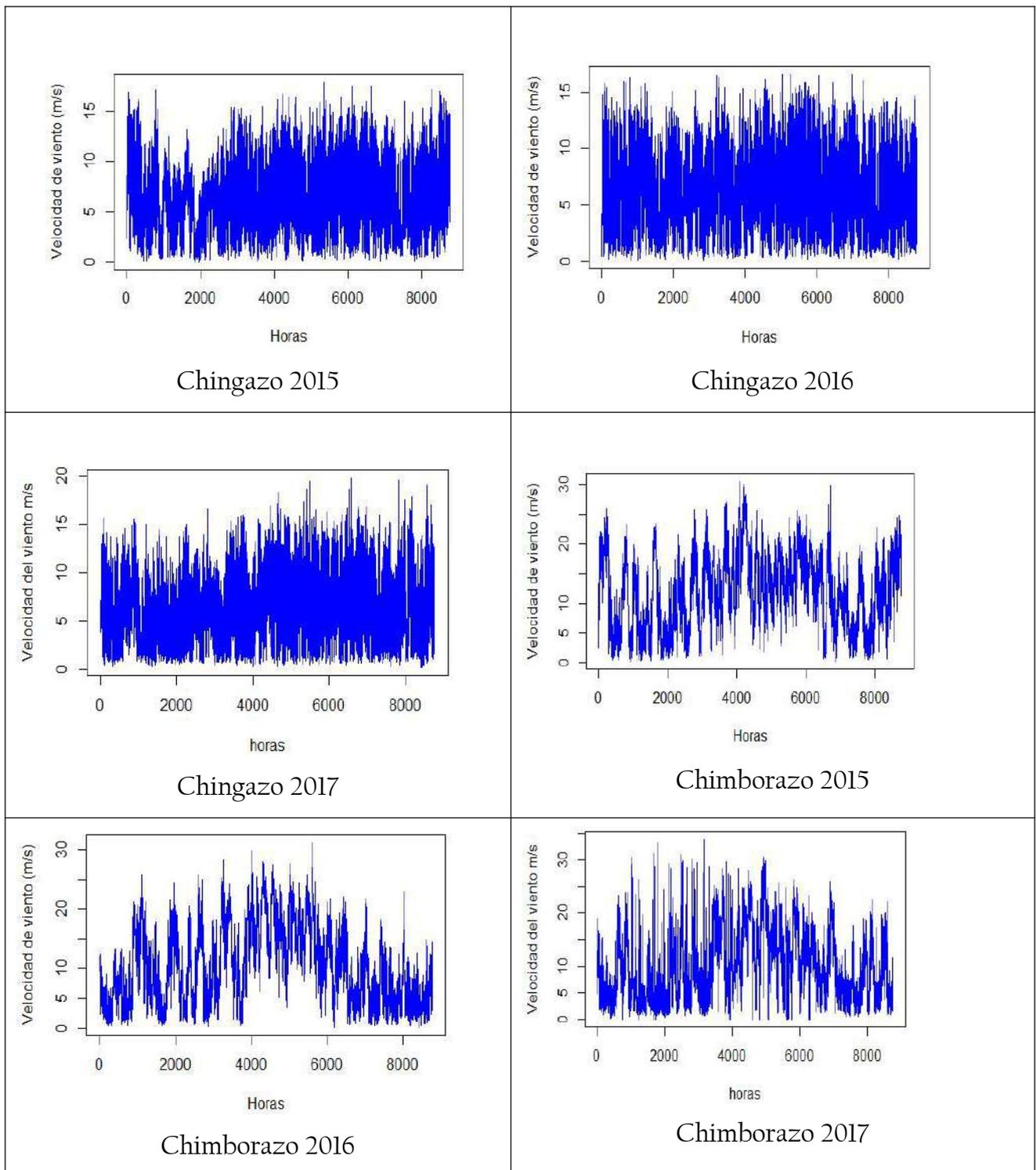
### 3. Resultados y Discusión

Para la estimación de la densidad del aire en los emplazamientos en estudio se utilizaron diversos parámetros meteorológicos tales como: temperatura, presión atmosférica, altura y humedad relativa. Se caracterizó por medio del modelo físico expresado por la ecuación 1, obteniendo el valor de 0.764 Kg/m<sup>3</sup>, que representa un 62,35% de la densidad del aire al nivel del mar para el emplazamiento Chimborazo, y para el

emplazamiento Chingazo, la densidad del aire resulto ser de  $0.883 \text{ Kg/m}^3$ , es decir un 73,1% de la que corresponde al nivel del mar.

En estos resultados, destaca el comportamiento de los vientos en cada emplazamiento como se presenta en la composición realizada para presentar en la Figura 2.

Figura 2. Registro horario de la velocidad de viento por estación y año



En la Figura 2, es posible constatar el comportamiento totalmente estocástico de las velocidades medias por hora del viento a lo largo del año para los dos emplazamientos en estudio. Se muestra así el comportamiento de la velocidad de viento en horas de los años 2015 a 2017, con sus valores altos y bajos, de manera que se puede observar la tendencia.

Ahora, obsérvense las Figuras 3 y 4 para precisar otro de los datos importantes en el análisis del comportamiento de los vientos en ambos lugares.

Figura 3. Chingazo: medias anuales por meses de velocidad de viento

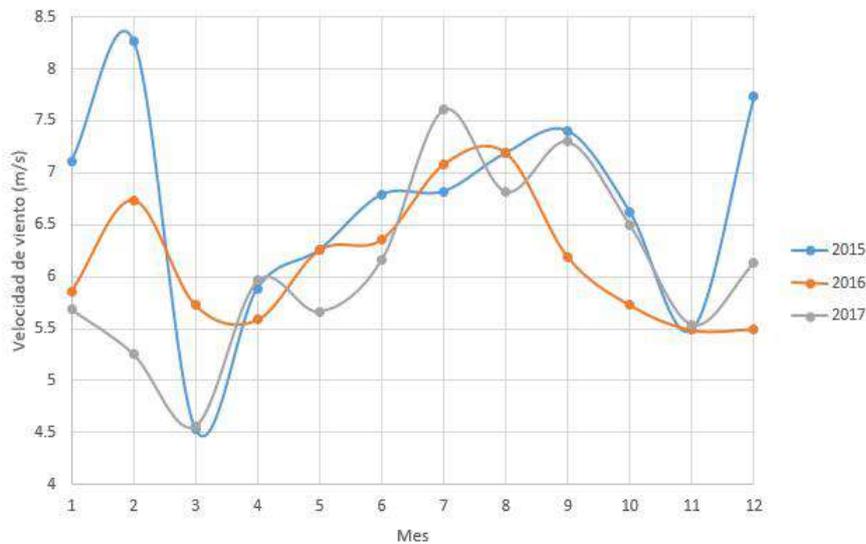
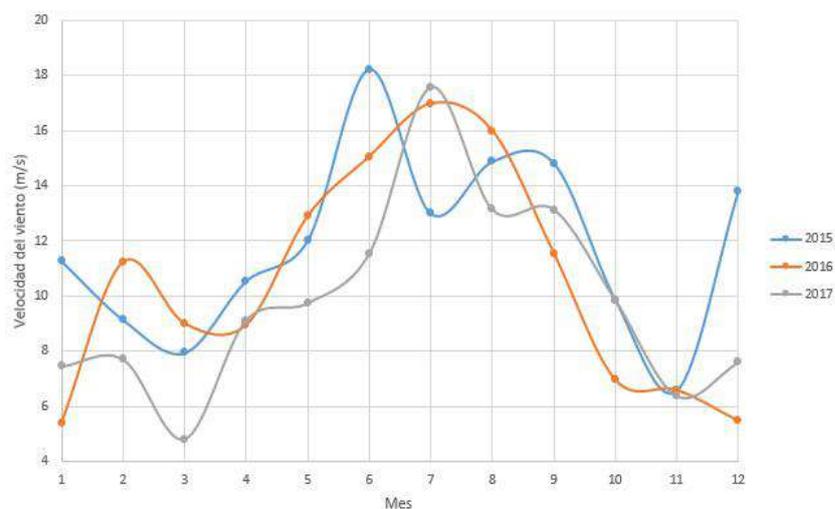


Figura 4. Chimborazo: medias anuales por meses de velocidad de viento



La Figura 3, muestra el comportamiento mensual de la velocidad del viento anualmente del emplazamiento Chingazo; como se puede observar la velocidad máxima en el año 2015 es de 8.27 m/s en el mes de febrero, 7.19 m/s en agosto de 2016 y en julio 7.70 m/s,

en los meses de marzo del 2015 y 2017 se puede ver una disminución significativa en las velocidades de viento con respecto al año 2016.

La Figura 4, por su parte, representa el comportamiento mensual de Chimborazo. Las velocidades máximas son 18,22 m/s durante 2015, 16.98 m/s durante 2016 y 17.56 m/s en julio 2017. La velocidad de viento en el año 2016 incremento en los meses febrero, julio y agosto en relación con el año 2015, y disminuyó durante los meses enero, abril y septiembre a diciembre, mostrando una velocidad del viento aleatoria.

Otros resultados relevantes en cuanto al comportamiento de los vientos y su análisis se presentan en la Figura 5 y 6

Figura 5. Chingazo: Curva anual de duración de viento.

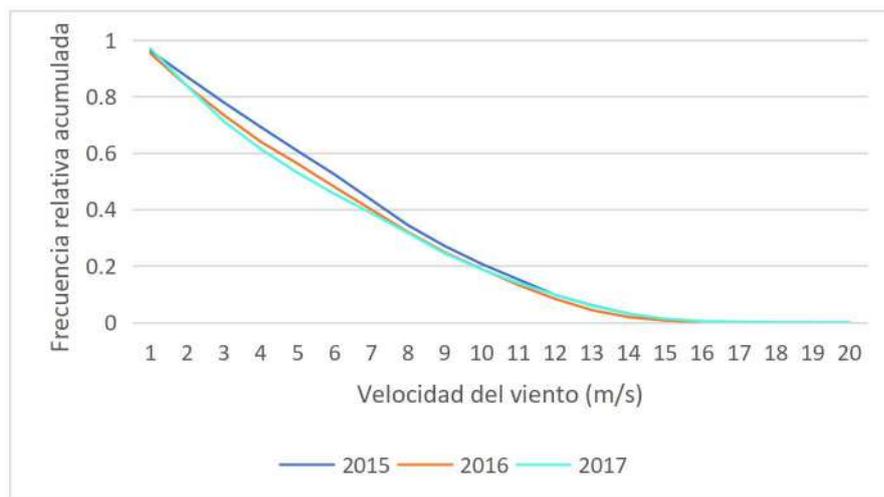
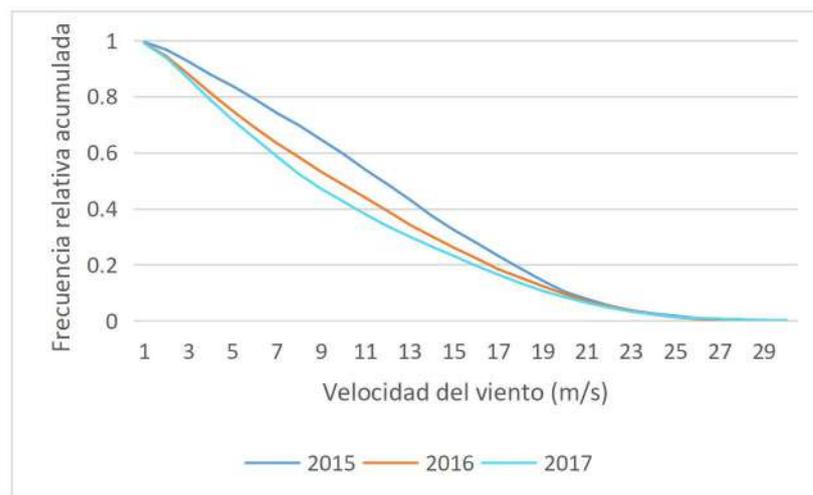


Figura 6. Chimborazo: Curva anual de duración de viento.



En la Figura 5, se puede observar que las velocidades mayores o iguales a 3 m/s de la estación Chingazo, en el año 2015 fueron de aproximadamente el 77% de las velocidades

muestreadas, mientras que presentó una velocidad media máxima de 18 m/s. Se puede ver que en el año 2016 y 2017 son similares con un aproximado al 73% y 71% respectivamente, las velocidades máximas registradas para el año 2016 fue de 17 m/s y para 2017 de 20 m/s.

Por su parte en la Figura 6, se muestran los resultados de la duración de viento para la estación Chimborazo. Como se puede observar los valores mayores o iguales a 3m/s en el año 2015 fueron de 92%, 87% y, 86% respectivamente para el 2016 y 2017, con una velocidad máxima de 29 m/s para los tres años.

Ahora bien, continuando con el análisis de los resultados, en las figuras 7, 8 y 9 se presentan las gráficas correspondientes a las rosas de los vientos de la estación Chingazo

Figura 7. Rosa de los vientos, Estación Chingazo. 2015

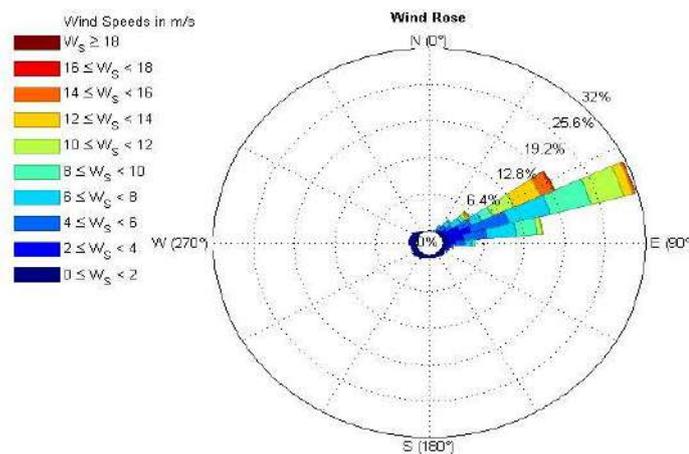
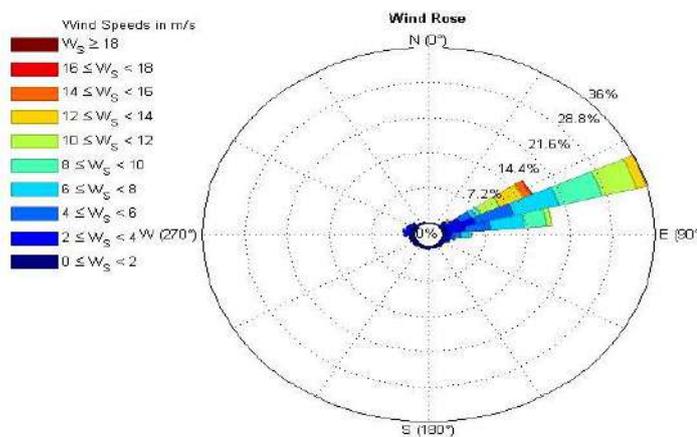


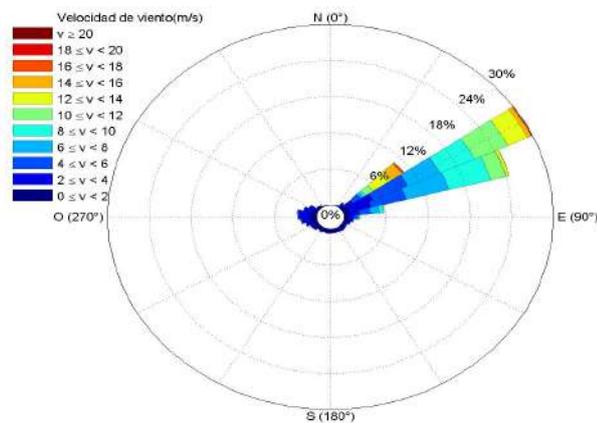
Figura 8. Rosa de los vientos, Estación Chingazo. 2016



Analizando estas imágenes, en las Figuras 7,8 y 9, se presentan las rosas de los vientos de la estación o emplazamiento Chingazo de los años 2015, 2016,2017 que

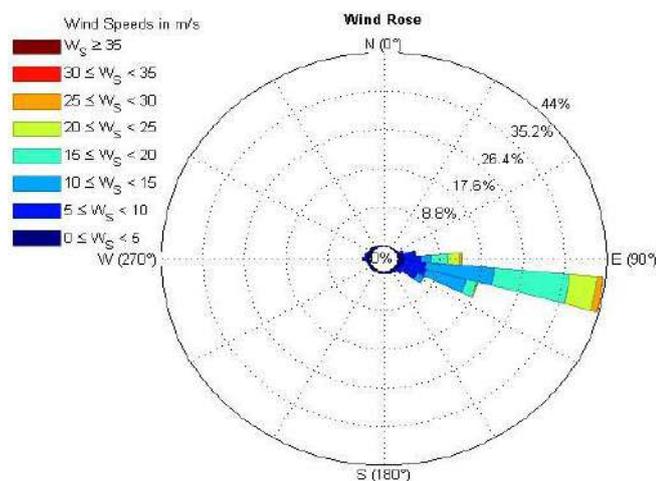
representan el número de horas por año en una determinada dirección y de una determinada magnitud. Se puede observar que existe una dirección predominante del viento en la dirección Este\_Norte\_Este (ENE) con los siguientes porcentajes: 31.46%, 35,93% y 29,92% para intensidades de velocidad comprendido entre intervalos o rangos de velocidad mayores o iguales que 2 m/s y menores que 14 m/s, y de menor intensidad en el rango mayores o iguales 14 m/s y menores a 16 m/s

Figura 9. Rosa de los vientos, Estación Chingazo. 2017



Para poder tener una idea del contraste en ambas estaciones o emplazamientos, respecto a las variables meteorológicas analizadas, es preciso observar las figuras 10, 11 y 12

Figura 10. Rosa de los vientos, Estación Chimborazo. 2015



En las Figuras 10, 11 y 12 se presentan las rosas de los vientos de la estación o emplazamiento Chimborazo de los años 2015, 2016, 2017 que representan el número de horas por año en una determinada dirección y de una determinada magnitud y se puede

observar que existe una dirección predominante del viento en la dirección Este\_Sur\_Este (ESE) con los siguientes porcentajes: 43,44%, 34,96% y 27,58% para intensidades de velocidad comprendido entre intervalos o rangos de velocidad mayores o iguales que 5 m/s y menores que 24 m/s, y de menor intensidad en el rango mayores o iguales 25 m/s y menores a 29 m/s.

Figura 11. Rosa de los vientos, Estación Chimborazo. 2016

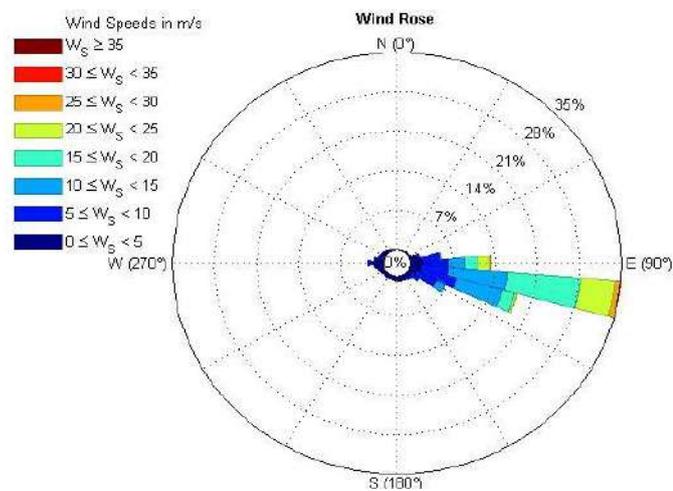
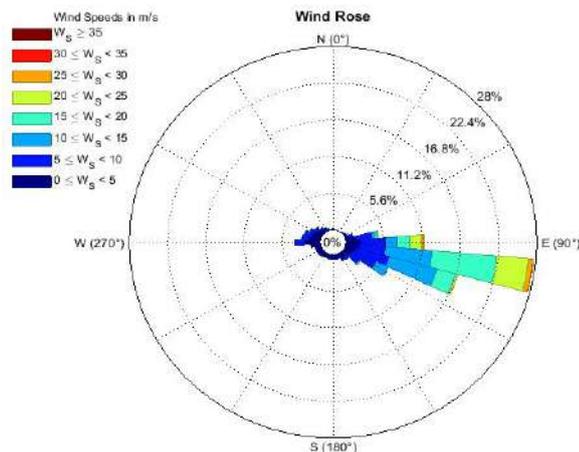


Figura 12. Rosa de los vientos, Estación Chimborazo. 2017



Por otra parte, como complemento del análisis eólico presentado, en la Tabla 2, se muestran los valores estadísticos medios anuales de los emplazamientos en estudio, en la estación meteorológica Chimborazo la velocidad del viento mínimo fue de 0.04 m/s en el año 2017, mientras que la velocidad máxima de viento en el año 2016 fue de 31 m/s y la velocidad promedio de los 3 años fue de 10.81 m/s, además la desviación estándar está en el

intervalo de 6.28 a 6.42. En cambio, en la estación meteorológica Chingazo, la desviación estándar oscila entre 3.78 a 3.90, siendo su velocidad mínima en los años 2015 y 2016 de 0.02 m/s, promediando en los 3 años un valor de 6.23 m/s.

**Tabla 2.** Valores medios de emplazamientos

Estación	CHIMBORAZO			CHINGAZO		
Año	2015	2016	2017	2015	2016	2017
Promedio	12,09	10,51	9,84	6,44	6,15	6,10
Desviación estándar	6,28	6,42	6,39	3,81	3,78	3,90
Máximo	30,6	31,00	30,89	17,95	16,63	19,84
Mínimo	0,06	0,05	0,04	0,02	0,02	0,21

La factibilidad técnica de un emplazamiento se determina cuando la velocidad media es mayor que 3 m/s, que corresponde a la velocidad de arranque de la mayoría de los aerogeneradores y que las velocidades de funcionamiento de los aerogeneradores requiere que al menos el 40% de las horas-año del viento es decir al menos 3500 horas, y que la dirección de viento tenga direcciones predominantes con un porcentaje de al menos 25%.

Dada las alturas extraordinarias de los emplazamientos estudiados, estos podrían ser casos inéditos de aplicaciones en la producción de energía eléctrica de varias decenas a centenas de MW de potencia dichos emplazamientos se puedan conectar al sistema Interconectado del Ecuador, se observó que la densidad del aire se reduce significativamente con la altura sobre el nivel del mar del emplazamiento. Esta circunstancia es relevante en la producción de energía eólica, ya que la potencia de un aerogenerador es directamente proporcional con la densidad del aire, pero es más significativo la velocidad del aire, donde la potencia de generación eólica depende del cubo de la velocidad del viento, que en estos casos estudiados compensan la disminución de la densidad del aire.

En el caso del otro parámetro meteorológico-estadístico fundamental analizado para la determinación de la viabilidad técnica de un emplazamiento, que corresponde al porcentaje de horas de funcionamiento u horas totales de operatividad de los hipotéticos parques eólicos que podrían implementarse en los emplazamientos estudiados. Se observa que los resultados obtenidos fueron mucho más satisfactorios que el estándar internacional requerido para estos propósitos, los cuales fueron: 74.11 % (6492 horas de funcionamiento

equivalente) en la estación meteorológica Chingazo y del 88.85% (7783 horas de funcionamiento equivalente) para la estación Chimborazo.

Asimismo, los coeficientes de variación de los emplazamientos Chimborazo y Chingazo fueron de 59,42% y 61,58% respectivamente, siendo otro aspecto importante del estudio para las estaciones meteorológicas Chimborazo y Chingazo donde se explica la dispersión de los datos observando que en el caso de la estación Chimborazo presento mayor dispersión, el cual fue de 61,58% y el caso de la estación Chingazo fue del 59,42%, lo cual nos dice la estación Chingazo tiene una mayor precisión de los datos medidos, donde estos resultados están dentro de los estándares internacionales requeridos para la implementación de parques eólicos.

Otro aspecto preponderante que se tiene en cuenta en el estudio estadístico de los emplazamientos considerados, es el de la dirección predominante del viento que debe existir siempre para una posible implementación de parques eólicos, que por lo tanto fue muy satisfactorio para los dos emplazamientos analizados, es decir un 7 % más que el estándar exigido para la estación Chingazo y un 10% para la estación Chimborazo.

## Conclusiones

En el marco de esta investigación, la revisión de la literatura sobre el tema, (específicamente en lo que se refiere a la energía eólica como una alternativa real para generar energías renovables), se han podido evidenciar los esfuerzos a nivel global y nacional, para abrir oportunidades y apoyar, con talento y recursos financieros, los proyectos que apuntan a ese objetivo. Latinoamérica y, Ecuador particularmente, se encuentran en esa labor que permita aprovechar los ingentes recursos naturales que se poseen, para lograr cada vez mayores grados de autonomía frente a la dependencia de los recursos energéticos no renovables.

En cuanto al estudio específico desarrollado y expuesto en el texto de este artículo, se puede afirmar que el análisis estadístico realizado a los emplazamientos considerados determinó que estos son completamente factibles estadísticamente para una futura implementación de parques eólicos en zonas altas andinas ecuatoriales de la provincia de Chimborazo, a altitudes entre los 2900 msnm y 4300 msnm.

Dada la compleja topografía del suelo, las grandes alturas, la influencia de múltiples parámetros meteorológicos se recomienda utilizar otros métodos estadísticos más

sofisticados que permitan realizar estudios más precisos, así como también se estudie el área de uso de los posibles emplazamientos; además es de preponderante importancia que se realice un estudio de factibilidad económica, teniendo en cuenta: la tecnología a implementar, las políticas energéticas que a corto, mediano y largo plazo tiene el gobierno nacional.

En suma, considerando el objetivo planteado en esta investigación, se ha podido realizar un análisis estadístico lo suficientemente riguroso como para determinar la factibilidad de implementar nuevos parques eólico en la zona estudiada como una manera de apoyar la generación de energía renovable en el país. Sin embargo, el estudio resulta más valioso en términos de representar una referencia en la identificación a futuro, de algunos puntos geográficos con las características ambientales y ecológicas óptimas a la hora de fortalecer la diversificación energética que tanto requiere Ecuador.

## Referencias

- Andrades, M., & Múñes, C. (2012). Fundamentos de Climatología. *Iberus*. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/267903.pdf>
- Bustamante, C., Jans, M., & Higuera, E. (2015). El comportamiento del viento en la morfología urbana y su incidencia en el uso estacional del espacio público, Punta Arenas, Chile. *Revista AUS*(15), 28-33. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281732449006>
- Cantero, E. (2022). Metodologías de Evaluación del Recurso Eólico; Incorporación de la estabilidad atmosférica como variable. "Tesis Doctoral" Universidad Pública de Navarra. Pamplona, España. [https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/44391/Tesis\\_ElenaCantero..pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/44391/Tesis_ElenaCantero..pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Castro, D. (2016). El volcán Chimborazo "El Coloso de los Andes". *Bionatura*, 1(3), 154-157. <https://www.revistabionatura.com/files/chimborazo.pdf>
- Enríquez, L., & Moreno, H. (2020). Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo. *Dominio de las Ciencias*, 6(3), 1077-1093. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i3.1338>
- Galán , N., Orozco, E., Mejías , N., & Mellado, C. (2015). Análisis Estadístico de la Velocidad del Viento en Mazatlán Sinaloa. *Revista de Análisis Cuantitativo y Estadístico*, 2 (4), pp. 288-294. [https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Analisis\\_Cuantitativo\\_y\\_Estadistico/analisis4/3%20Analisis%20Cuantitativo%20y%20Estadistico%20Vol%202%20Num%204%20288-294.pdf](https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Analisis_Cuantitativo_y_Estadistico/analisis4/3%20Analisis%20Cuantitativo%20y%20Estadistico%20Vol%202%20Num%204%20288-294.pdf)

Global Energy Monitor . (2023). Una carrera hacia la cima: América Latina 2023. Global Energy Monitor. <https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2023/03/GEM-LATAM-report-Spanish.pdf>

Haro, S., Zúñiga, L., Meneses, A., & Escudero, A. (2020). Determinación del comportamiento meteorológico del viento en la Provincia de Chimborazo, Ecuador. *Perfiles*, 1 (23), 26-34. <http://ceaa.esPOCH.edu.ec:8080/revista.perfiles/faces/Articulos/Perfiles23Art4.pdf>

Huera, J. (Mayo de 2019). Diversificación de la matriz energética en el Ecuador: indicadores energéticos, socioeconómicos y ambientales . "Tesis de Maestría" FLACSO. Quito, Ecuador. <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/10469/15640/TFLACSO-2019JLHA.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

Insaurralde, C., & Palese, C. (2021). Estimación del recurso eólico en una comunidad aislada: Lago Hermoso, Provincia del Neuquén. *Boletín geográfico*, 43(2), 31-47. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8289287.pdf>

Mártil de la Plaza, M. (11 de marzo de 2021). OpenMind BBVA. Historia de la energía eólica: del origen a la II Guerra Mundial: <https://www.bbvaopenmind.com/tecnologia/innovacion/historia-energia-eolica-origen-ii-guerra-mundial/>

Martínez, S., & Garbi, M. (2020). Climatología y Fenología Agrícola . Universidad Nacional de La Plata . [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/66686/mod\\_resource/content/1/06-%20Unidad%20tematica%20B-%20Presion%20-%20Vientos%20-%20Precipitacion.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/66686/mod_resource/content/1/06-%20Unidad%20tematica%20B-%20Presion%20-%20Vientos%20-%20Precipitacion.pdf)

Pachecho, M. (2020). Teoría de ecuaciones diferenciales estocásticas y sus aplicaciones. "Tesis de Maestría" Universidad Politécnica de Valencia . Valencia, España. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/150999/Pachecho%20-%20Teor%C3%ADa%20de%20ecuaciones%20diferenciales%20estoc%C3%A1sticas%20y%20sus%20aplicaciones.pdf?sequence=1>

Pazmiño, A., Jácome, J., Bolaños, P., & Santiana, C. (2018). Matlab como herramienta de análisis estadístico. *Polo del Conocimiento*, 3(11), 398-408. <https://doi.org/10.23857/pc.v3i11.862>

Robles, C., & Rodríguez, O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. *Espacios*, 39(34), 1-16. <https://ww.revistaespacios.com/a18v39n34/a18v39n34p10.pdf>

Sánchez, B., Benítez, M., Zamora, R., & Jimenez, P. (2018). Control Interno, factor clave para la Organización en las Juntas de Agua Potable Zona Nororiental de la Provincia del Tungurahua. *Ojeando la Agenda*(53), 1-21. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6501347>

Sánchez, J. (2019). Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad. 70 años de pensamiento de la CEPAL. Libros de la CEPAL. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44785/8/S1900378\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44785/8/S1900378_es.pdf)

Soto, C. (2017). Central Eólica Villonaco Energías Renovables, Sustentables, y Sostenibles. e-lis(15), 1-10. <http://eprints.rclis.org/32290/1/Art%C3%ADculo%20E%C3%B3licos..pdf>

Titos, M., Luque, T., & Navarro, J. (2018). Montañas. Fuente de vida y de futuro. Editorial Universidad de Granada. [https://www.researchgate.net/publication/333755773\\_EL\\_VOLCAN\\_CHIMBORAZO\\_6268\\_msnm\\_EN\\_ECUADOR\\_UNA\\_CIMA\\_SINGULAR\\_CON\\_UN\\_SISTEMA\\_SINGULAR\\_DE\\_GESTION\\_BASADO\\_EN\\_LA\\_CONSERVACION\\_DE\\_LOS\\_CAMELIDOS](https://www.researchgate.net/publication/333755773_EL_VOLCAN_CHIMBORAZO_6268_msnm_EN_ECUADOR_UNA_CIMA_SINGULAR_CON_UN_SISTEMA_SINGULAR_DE_GESTION_BASADO_EN_LA_CONSERVACION_DE_LOS_CAMELIDOS)