

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2025,
Volumen 9, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO A DIFERENTES ALTURAS: ESTUDIO TEMPORAL Y ESPACIAL EN BOCA DEL RÍO, VERACRUZ

WIND SPEED ASSESSMENT AT DIFFERENT HEIGHTS: TEMPORAL AND SPATIAL STUDY IN BOCA DEL RÍO, VERACRUZ

Guadalupe González Mejía

Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales, México

Erika Jazmín De la Cruz Ángel

Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales, México

José Alfredo Inclán Barragán

Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales, México

Casildo Pacheco Martínez

Facultad de Ciencias Químicas, México

Jesús Ponce Ávila

Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rem.v9i1.16334

Evaluación de la Velocidad del Viento a Diferentes Alturas: Estudio Temporal y Espacial en Boca del Río, Veracruz

Guadalupe González Mejía¹guadalupegonzalez@uv.mx<https://orcid.org/0009-0003-0639-7942>Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias
Navales
México**José Alfredo Inclán Barragán**jinclan@uv.mx<https://orcid.org/0009-0009-0351-0851>Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias
Navales
México**Jesús Ponce Ávila**jponce@uv.mx<https://orcid.org/0009-0007-5322-914X>Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias
Navales
México**Erika Jazmín De la Cruz Ángel**eridelacruz@uv.mx<https://orcid.org/0009-0001-2617-0708>Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias
Navales
México**Casildo Pacheco Martínez**capacheco@uv.mx<https://orcid.org/0009-0005-8791-7667>Facultad de Ciencias Químicas
México

RESUMEN

Estudiar el efecto del comportamiento del viento es primordial para el diseño de elementos estáticos, el cálculo de aprovechamiento eólico, la programación de actividades humanas, la caracterización de la velocidad y dirección del viento a través de los datos de estaciones meteorológicas que existen con fines de estudiar las variables climatológicas, permitiendo utilizar los datos que se generan para aplicarlos en otras áreas de estudio. Para realizar el estudio temporal y espacial del viento en la Ciudad de Boca del Río, Veracruz, se realizó el análisis estadístico del viento a nivel de superficie (altura del instrumento) utilizando 8760 valores horarios promedio correspondientes al año 2023, aplicando la Ley exponencial de Hellmann obteniendo un perfil vertical de velocidad de vientos hasta 100 m. Así mismo se presenta un estudio del comportamiento anual de las velocidades diurnas y direcciones presentadas en el área de estudio. El objetivo es presentar un estudio temporal y espacial de del comportamiento del viento para utilizarlo en áreas de diseño mecánico y eólico.

Palabras clave: viento, perfil vertical del viento, ley de Hellmann

¹ Autor principal.

Correspondencia: guadalupegonzalez@uv.mx

Wind Speed Assessment at Different Heights: Temporal and Spatial Study in Boca Del Río, Veracruz

ABSTRACT

Studying the effect of wind behavior is essential for the design of static elements, the calculation of wind exploitation, the programming of human activities, the characterization of wind speed and direction through data from meteorological stations that exist for the purposes of study climatological variables, allowing the data generated to be used to apply them in other study areas. To carry out the temporal and spatial study of the wind in the City of Boca del Rio, Veracruz, the statistical analysis of the wind at the surface level (height of the instrument) was carried out using 8760 average hourly values corresponding to the year 2023, applying the Exponential Law of Hellmann obtaining a vertical wind speed profile up to 100 m. Likewise, a study of the annual behavior of the diurnal speeds and directions presented in the study area is presented. The objective is to present a temporal and spatial study of wind behavior for use in mechanical and wind design areas.

Keywords: wind, vertical wind profile, Hellmann's law

*Artículo recibido 23 enero 2025
Aceptado para publicación: 24 febrero 2025*



INTRODUCCIÓN

El viento se genera como un movimiento de masa de aire derivado de la radiación solar. Las diferencias de insolación entre distintas regiones generan diferentes áreas térmicas y los desequilibrios de temperatura provocan diferencias de densidad en las masas de aire, que se traducen en variaciones de presión. El aire, como cualquier gas, se mueve desde las zonas de alta presión a las de baja presión. Se establece así cierto equilibrio por transferencia de energía entre las zonas de diferente temperatura, lo que ocasiona un desplazamiento de masas de aire, lo que produce el viento. De esta forma, se podría definir el viento como una corriente de aire resultante de las diferencias de presión en la atmósfera, provocadas en la mayoría de los casos, por variaciones de la temperatura (Jarabo Friedrich, Perez Dominguez, Elortegui Escartin, Fernandez Gonzalez, & Macias Hernandez, 1988).

Realizar un estudio de la velocidad y dirección del viento en un sitio de medición con una orografía cercana a la zona costera de Boca del Río es fundamental para conocer las condiciones disponibles para la generación de energía eólica (Barzola, y otros, 2016) y para conocer la dinámica del viento en las cargas de viento que pueden generar fuerzas de presión sobre un elemento esbelto o estructuras (Fabrè Sentile, Sánchez Noa, González Fernández, García Domínguez, & Wellesley-Bourke Funcasta , 2006). Estas cargas, se calculan a partir de variables conocidas en la zona como la velocidad media, el perfil vertical de velocidades del viento, en el cual los datos meteorológicos como la magnitud y dirección están definidos en función de la topografía o la altitud del terreno y otros parámetros que definen las características de turbulencia del viento.

El perfil vertical del viento se obtuvo mediante la Ley Exponencial de Hellmann, la cual permite definir el comportamiento del viento en alturas superiores a la del instrumento de medición y se apoya en estudios realizados donde se puede estimar el coeficiente α , correspondiente al tipo de superficie, dando una idea del coeficiente de rugosidad (exponente de Hellman).

Para estudiar la frecuencia de la dirección del viento y delimitar sus rangos de velocidad, se generó un gráfico de rosa de vientos que muestra la distribución de frecuencia de velocidades y direcciones del viento de forma polar y su comportamiento anual en forma vectorial.

METODOLOGÍA

Se presenta un estudio realizado en el año 2023 en el Observatorio Meteorológico Boca del Río, el cual



pertence a la red de observatorios del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), ubicado en el municipio de Boca del Río, en el estado de Veracruz, México con coordenadas geográficas Latitud 19 grados 08' 34.76" N y longitud 96 grados 06' 40.73" W. Se obtuvieron los datos de la velocidad y dirección del viento a través de la página del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, s.f.). Las lecturas de medición de velocidad y dirección del viento se obtuvieron de un anemocinómetro marca ESTERLINE ANGUS modelo F-420C-M4 (De la Cruz Ángel, Inclán Barragán, González Mejía, Grajeda Rosado, & Díaz Abascal, 2024). Se utilizaron 8760 datos promedios horarios del año 2023, el procedimiento es tomar lecturas cada 15 minutos, de las cuales a 4 lecturas se le realiza un cálculo para obtener tres tipos de velocidades y direcciones horarias: la promedio, dominante y máxima según normatividad de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Herrera Vázquez, Restrepo López, Quevedo Nolasco, Crespo Pichardo, & Portocarrero Reséndiz, 2010).

Para realizar la extrapolación de velocidades en altura, hasta 100 metros, y obtener los perfiles verticales del viento, en los meses del año 2023, se utiliza la Ley Exponencial de Hellman (Mendoza Uribe, 2018), la cual representa la variación de velocidad exponencial en relación a la altura sobre la superficie. La velocidad inicial se toma de un anemómetro instalado sobre un mástil de 10 metros, sobre 15 m.s.n.m, dando una altura de la medición de 25 m.s.n.m. La ecuación 1 define las velocidades a diferentes alturas, tomando como referencia la altura y velocidad del instrumento.

$$V_{h_2} = V_{h_1} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (1)$$

Donde:

V_{h_1} = Velocidad a la altura del instrumento de medición (m/s)

V_{h_2} = Velocidad a la altura h (m/s)

h_1 = Altura del instrumento de medición (m)

h_2 = Altura h (m)

El exponente α es el coeficiente de rugosidad del terreno, el cual depende de varios factores como la altura, velocidad tomada del instrumento de medición, y rugosidad del terreno se puede estimar de la ecuación 2 de Justus – Mikhail (Vera Duarte, Vásquez Vega, & Rojas Serrano, 2015) se define el exponente α .



$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(V_{h1})}{1 - 0.088 \ln(h_1)} \quad (2)$$

La ecuación 2, dio un valor en el rango de 0.2713 – 0.3306, el cual se encuentra comprendido en valores de $\alpha = 0.25 \div 0.4$, según tabla de valores de exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno (Mendoza Uribe, 2018), se menciona que el area de estudio es una ciudad urbana costera.

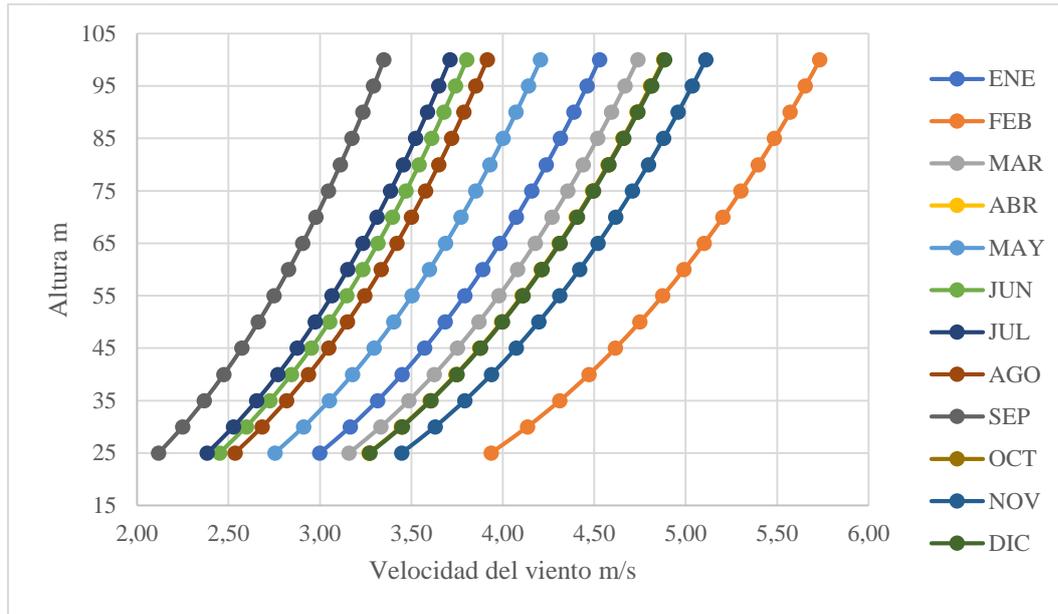
El estudio se realiza con los valores promedio mensuales de velocidad del viento, mediante las ecuaciones (1), (2) y se obtienen los perfiles de velocidad del viento en altura mostrados en la tabla 1.

Tabla 1 Perfiles verticales de velocidad del viento

ALTURA m	25	30	40	50	60	70	80	90	100
ENE	3.00	3.17	3.45	3.69	3.89	4.07	4.24	4.39	4.53
FEB	3.94	4.14	4.47	4.75	4.99	5.20	5.40	5.57	5.73
MAR	3.16	3.33	3.62	3.87	4.08	4.27	4.44	4.59	4.74
ABR	3.27	3.45	3.74	3.99	4.21	4.40	4.58	4.73	4.88
MAY	2.75	2.91	3.18	3.40	3.60	3.77	3.93	4.07	4.21
JUN	2.45	2.60	2.84	3.05	3.23	3.40	3.54	3.68	3.80
JUL	2.38	2.53	2.77	2.97	3.15	3.31	3.46	3.59	3.71
AGO	2.54	2.68	2.94	3.15	3.34	3.50	3.65	3.79	3.91
SEP	2.12	2.25	2.47	2.66	2.83	2.98	3.11	3.23	3.35
OCT	3.27	3.45	3.75	3.99	4.21	4.40	4.58	4.73	4.88
NOV	3.45	3.63	3.94	4.20	4.42	4.62	4.80	4.96	5.11
DIC	3.27	3.45	3.75	4.00	4.22	4.41	4.58	4.74	4.89

La ecuación 1, se puede utilizar para dar una aproximación de un perfil de vientos en altura, hasta 100 – 150 m , sabiendo que el exponente α varia con la altura, hora del día, epoca del año y factores ambientales como la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, las cuales determinan la densidad del aire dependientes de las condiciones de estabilidad atmosférica (Guevara Díaz, 2013). Los perfiles verticales de viento mensuales se presentan en la figura 1.

Figura 1 Perfiles verticales de velocidad del viento mensuales

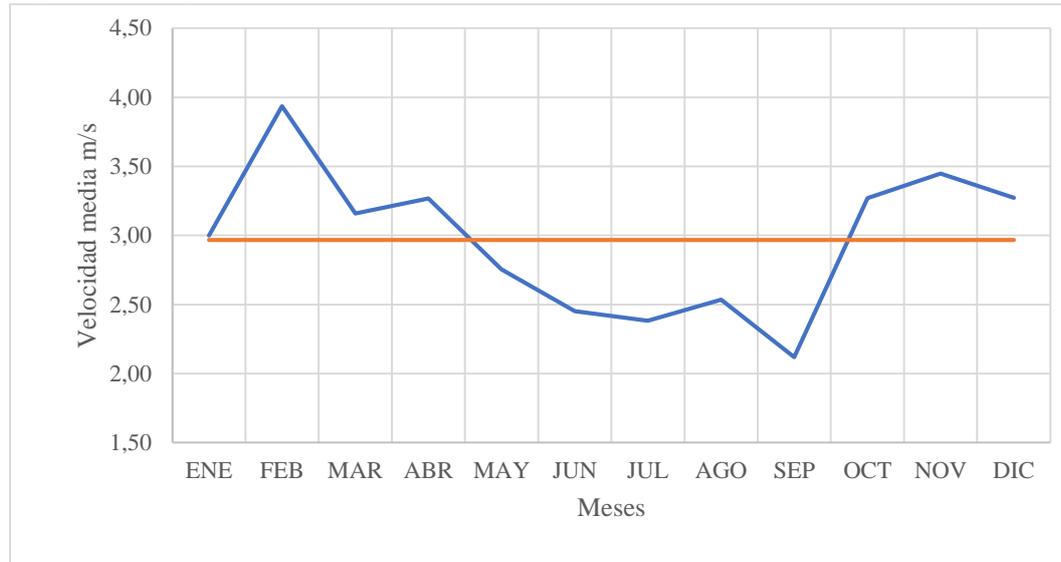


La figura 1 muestra la variabilidad de la velocidad del viento durante el año 2023, presentándose en el mes de septiembre la menor velocidad promedio a la altura del instrumento de medición con 2.12 m/s y en el mes de febrero la mayor velocidad en febrero con 3.94 m/s, esto debido a la temporada de frentes fríos, ya que el área de estudio es afectada por esta eventualidad. Además se puede observar una variación de velocidad a una altura de 100 m en el mes septiembre respecto al mes febrero, siendo estas de 3.35 m/s y 5.73 m/s respectivamente.

Conocer el comportamiento anual de la velocidad del viento por periodos mensuales, es fundamental para estimar la variabilidad (De Bortoli, Canavesio, Benitez, & Makuch, 2002) y determinar como se puede ver afectado en un ámbito de diseño de estructuras o diseño eólico. El impacto en una estructura, el aprovechamiento eólico, la dispersión de contaminantes en la atmósfera, las actividades humanas, dependen de esta condición de velocidad del viento en superficie y en altura, por lo cual es vital conocer su temporalidad para estimar como influye el viento en las estructuras de la región del caso de estudio (Ortiz Diaz, Escobar Amado, & Sepulveda Mora, 2018).

En la figura 2 se observa el comportamiento anual de la velocidad en el año 2023, registrando las velocidades promedio mensuales con el instrumento de medición a 25 m.

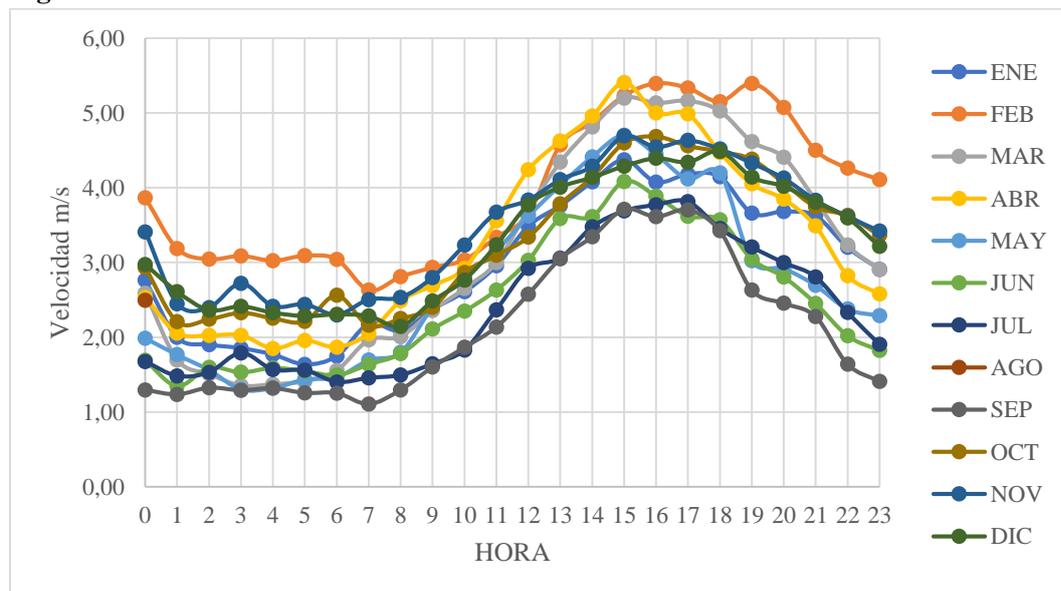
Figura 2 Comportamiento anual de la velocidad a 25 m



La tendencia de la serie, muestra que en el periodo de marzo a septiembre el comportamiento de la velocidad del viento va en decremento. Se observa un incremento de esta variable en el periodo de octubre a febrero, esto debido a los efectos de los frentes fríos, donde los vientos del norte se incrementan por dicho fenómeno meteorológico, la velocidad promedio anual es de 2.97 m/s, y la velocidad del viento oscila de 2.12 m/s a 3.94 m/s.

Otra característica importante es estudiar el comportamiento de la velocidad durante el día (Yancachajlla Tito & Vilca Huayta, 2022), que compara los rangos de velocidad contra la hora del día y los meses del año 2023, los cuales se muestran en la figura 3.

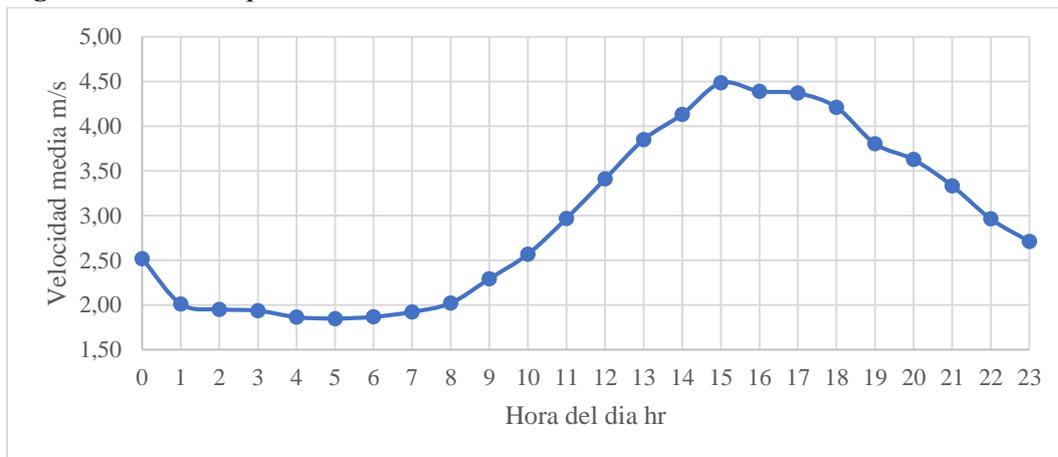
Figura 3 Velocidad del viento diurna mensual del año 2023



La figura 3 muestra que la intensidad del viento incrementa con la radiación solar, esto está relacionado con la temperatura ambiente, ya que la velocidad se incrementa a partir de las 07: 00 horas, alcanzando su máxima velocidad a las 16:00 horas y a partir de ahí empieza a decrecer, siendo el mes de febrero donde se presenta una mayor velocidad promedio y el mes septiembre una menor velocidad.

También es importante exponer el comportamiento anual diario, el cual muestra a mayor detalle la variación de la velocidad del viento durante el día (Mora & Tinjacá, 2021), la figura 4 muestra el comportamiento diario de la velocidad durante el año 2023.

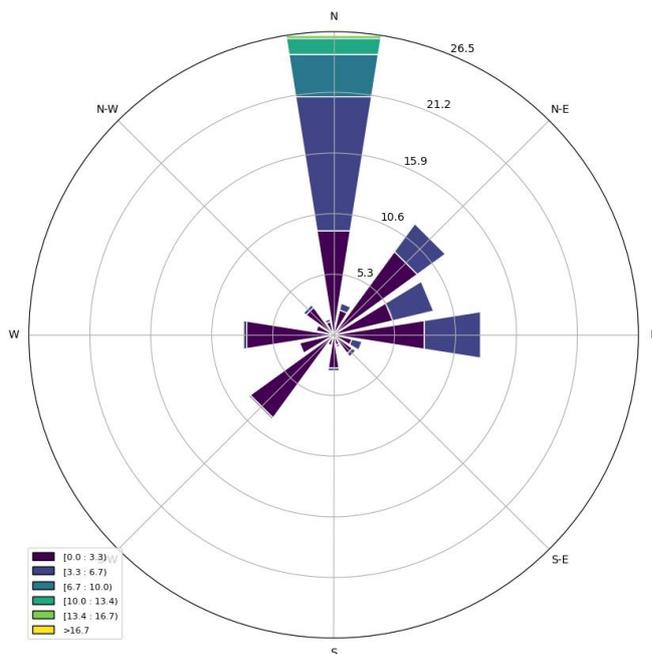
Figura 4 Velocidad promedio anual diaria



La figura 4 muestra la variabilidad media de la velocidad del viento, presentándose alrededor de las 05:00 horas con 1.85 m/s hasta las 15:00 horas con una velocidad máxima de 4.48 m/s, también se observa que la velocidad a las 07:00 horas incrementa y a partir de las 15:00 horas decrecienta debido a la radiación solar y a la temperatura (De la Cruz Buelvas, Valencia Ochoa, & Vanegas Chamorro, 2018).

Para representar las direcciones de velocidad existe un gráfico el cual representa las características de velocidad y dirección en forma polar. La rosa de vientos es un diagrama vectorial que permite representar la dirección y velocidad del viento (Roque Rodriguez, 2015). La figura 5 muestra el comportamiento anual 2023 de la dirección y velocidad del viento en forma vectorial.

Figura 5 Rosa de los vientos del año 2023



En la figura se observa 5 que las velocidades dominantes corresponden al norte con 26.5%, al este con un 13% y al noreste con un 12%, las direcciones del viento de mayor frecuencia se presentan en el primer cuadrante correspondientes a los ejes norte – este. Así mismo las velocidades se comportan de la siguiente manera: de 0.0 a 3.3 m/s se presenta un 67%, de 3.3 a 6.7 m/s un 27%, de 6.7 a 10.0 m/s un 3.7%, de 10.0 a 13.4 m/s un 1.4%, y de 13.4 a 16.7 un 0.3% y las velocidades más altas se presentan en el primer cuadrante, siendo la dirección norte la que presenta las velocidades de mayor magnitud.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento del viento a nivel de superficie en la estación ubicada en la zona urbana de Boca del Río, está directamente ligada a la altura del terreno, el relieve, la época del año, la cercanía a la costa e influenciada por la climatología del área de estudio, ya que se encuentra en el centro del Golfo de México y está expuesta a eventos de frentes fríos en épocas invernales.

Este estudio muestra la temporalidad del comportamiento de la velocidad y dirección del viento, demostrando que hay dos tendencias de velocidades definidas por la velocidad promedio anual, los meses de comportamiento por encima del promedio anual se presentan de septiembre a febrero y los valores por debajo de la media anual se concentran en el periodo de marzo a octubre, marcando una diferencia considerable. Los perfiles verticales del viento se comportan de igual manera, ya que dependen de la velocidad de superficie a la que fue tomada la medida del instrumento y el factor de

rugosidad que depende de la orografía de la superficie principalmente.

CONCLUSIONES

El gráfico de rosa de vientos representa los resultados obtenidos, donde el 85% de las direcciones se encuentran en el primer cuadrante de la rosa de los vientos, las direcciones actúan con más frecuencia en los ejes norte – sur, de ahí el segundo cuadrante de mayor frecuencia es el sur – oeste, Las velocidades más fuertes están prácticamente en la dirección norte.

Estos datos son muy importantes al momento de diseñar la orientación de una estructura, el emplazamiento de un aprovechamiento eólico, la orientación de una industria que emite partículas contaminantes a la atmósfera. El resultado demuestra que un emplazamiento a considerar se encuentra dentro del primer cuadrante de la rosa de los vientos.

El factor de mayor importancia es la dirección norte, presentando el mayor rango de variabilidad en la velocidad, debido a que los vientos se modifican desde las calmas (0.3 m/s), de vientos débiles hasta vientos fuertes (16.7 m/s), por lo tanto, una estructura orientada en esta dirección estará expuesta a fatiga por la fuerza aplicada por los vientos y se tiene que tomar en cuenta el factor de rachas de vientos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Jarabo Friedrich, F., Perez Dominguez, C., Elortegui Escartin, N., Fernandez Gonzalez, J., & Macias Hernandez, J. J. (1988). *El libro de las Energías Renovables*. Madrid: S.A.P.T.
- Barzola, J., Espinoza, M., Vera, Á., Valencia, Á., Cabrera, F., & Briones, C. (2016). Análisis del potencial de energía eólica a partir de mediciones in situ en Atahualpa - Santa Elena. *YACHANA*, 103-112.
- CONAGUA. (s.f.). *Servicio Meteorológico Nacional*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- De Bortoli, M., Canavesio, O., Benitez, F., & Makuch, F. (2002). ANALISIS DE VELOCIDADES DE VIENTO ATMOSFERICAS MEDIAS HORARIA ANUAL EXTREMA A TRAVES DEL ANALISIS PROBABILISTICO DE REGISTROS CORTOS. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.
- De la Cruz Ángel, E. J., Inclán Barragán, J. A., González Mejía, G., Grajeda Rosado, R. M., & Díaz Abascal, P. (2024). Estudio de Comportamiento de Velocidad del Viento en Boca del Río Mediante Distribución Weibull. *Ingeniantes*, 23-28.



- De la Cruz Buelvas, J., Valencia Ochoa, G., & Vanegas Chamorro, M. (2018). Estudio estadístico de la velocidad y la dirección del viento en los departamentos de Atlántico y Bolívar en Colombia. *Ingeniare*, 319-328.
- Fabré Sentile, C., Sánchez Noa, M., González Fernández, V., García Domínguez, M., & Wellesley-Bourke Funcasta, J. (2006). Fundamento estadístico del efecto aleatorio del viento para el cálculo de estructuras delgadas. *Ingeniería Mecánica*, 13-19.
- Guevara Díaz, J. M. (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. *Terra Nueva Etapa*, 81-11.
- Herrera Vázquez, G., Restrepo López, A., Quevedo Nolasco, A., Crespo Pichardo, G., & Portocarrero Reséndiz, A. (2010). *Manual Teórico Práctico del Observador Meteorológico de Superficie*. Distrito Federal: SEMARNAT.
- Mendoza Uribe, I. (2018). Valoración del viento como fuente de energía eólica en el estado de Guerrero. *Ingeniería* 22-3, 30-46.
- Mora, S., & Tinjacá, F. (2021). Análisis estadístico de la Velocidad y Dirección del Viento Basado en Modelo de Distribución Rayleigh. *LADEE*, 32-39.
- Ortiz Diaz, H. A., Escobar Amado, C. D., & Sepulveda Mora, S. B. (2018). Análisis estadístico de variables climatológicas en la ciudad de Cúcuta. *Respuestas*, 39-44.
- Roque Rodríguez, A. (2015). Perfil vertical del viento en la capa superficial atmosférica sobre Cuba. Aplicación al estudio del viento como fuente de energía. *Revista Cubana de Meteorología*, 31-48.
- Vera Duarte, E., Vásquez Vega, A., & Rojas Serrano, J. (2015). Evaluación y caracterización del recurso eólico en la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, y prospectiva para el aprovechamiento energético en el Norte de Santander. *El Hombre y la Máquina*, 144-152.
- Yancachajlla Tito, U., & Vilca Huayta, O. A. (2022). Caracterización del viento con la función de Weibull para una zona altoandina, Laraqueri - Perú. *Journal of High Andean Research*, 190-198.

