

CARACTERIZACIÓN DE LA INTENSIDAD DEL VIENTO EN LA ESTACIÓN EZEIZA

Mariela Ayelén Palavecino^{1,2}, Alejandro Anibal Godoy^{1,2}, María Eugenia Dillon^{1,3}, María de los Milagros Skansi¹

¹Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires, Argentina

²Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina

(Manuscrito recibido el 12 de octubre de 2022, en su versión final el 6 de enero de 2023)

RESUMEN

Los eventos de vientos intensos causan destrozos materiales y exponen en situaciones de vulnerabilidad a la vida humana y a distintos ecosistemas. La intensidad y dirección del viento desempeñan un rol importante en distintas disciplinas: por ejemplo, influyen en la actividad aeroportuaria, determinan el aprovechamiento de energía eólica, intervienen en la producción agrícola, impactan en la propagación de incendios forestales y por ende en la calidad del aire. Si bien algunos estudios climáticos y de variabilidad climática del viento muestran una disminución de la intensidad media diaria y anual en los últimos años tanto en Argentina como en otras regiones del mundo (Baldo y Cerne, 2018; Cúneo et al., 2019; Vautard, et al., 2010), también se observan tendencias positivas significativas en la velocidad del viento tanto de superficie como de niveles superiores en el sur de Argentina (Merino, 2022). Por lo motivos antes mencionados, entre otros, resulta de suma importancia continuar con estudios referidos a la variable viento a nivel nacional. El objetivo de este trabajo es realizar una caracterización preliminar del viento a 10 m para distintas escalas temporales en la estación meteorológica aeronáutica de Ezeiza (SAEZ) durante el periodo 2009-2019 y comparar los resultados con el periodo climatológico 1981-2010. Los resultados encontrados muestran que las menores intensidades de los vientos medios diarios y máximos diarios tanto para la serie 2009-2019 como para la serie climatológica se registran durante los meses de otoño e invierno y se observa, en general, que los vientos máximos diarios duplican la intensidad de los vientos medios diarios. Además, los vientos medios mensuales del periodo 2009-2019 muestran una clara tendencia a la disminución de la intensidad y de la amplitud entre valores máximos y mínimos en comparación con los datos climatológicos.

Palabras clave: viento medio, viento máximo, Ezeiza.

CHARACTERIZATION OF WIND INTENSITY AT THE EZEIZA STATION

ABSTRACT

Intense wind events cause material damage and expose human life and different ecosystems in situations of vulnerability. The intensity and direction of the wind play an important role in different disciplines: for example, they influence airport activity, determine the use of wind energy, intervene in agricultural production, impact on the spread of forest fires and therefore on air quality. Although some climate studies and climate variability of wind show a decrease in the average daily and annual intensity in recent years both in Argentina and in other regions of the world (Baldo and Cerne, 2018; Cuneo et al., 2019; Vautard, et al., 2010), significant positive trends in both surface and upper wind speeds are also observed in southern Argentina (Merino, 2022). For the reasons mentioned above, among others, it is very important to continue with studies referring to the wind variable at the national level. The objective of this work is to carry out a preliminary characterization of the wind at 10 m for different time scales in the aeronautical meteorological station of Ezeiza (SAEZ) during the period 2009-2019 and compare the results with the climatological period 1981-2010. The results found show that the lower intensities of the average daily winds and daily maximums for both the 2009-2019 series and the climatological series are recorded during the autumn and winter months and it is observed, in general, that the maximum daily winds double the intensity of the daily average winds. In addition, the monthly average winds of the period 2009-2019 show a clear tendency to decrease the intensity and amplitude between maximum and minimum values compared to the climatological data.

Keywords: mean wind, maximum wind, Ezeiza.

1. INTRODUCCIÓN

La intensidad y dirección del viento desempeñan un rol importante en distintas disciplinas, resultando necesario avanzar con los estudios referidos a estas variables. En Argentina algunos trabajos recientes son: los de Waimann (2016) y Otero et al. (2017), relacionados con la energía eólica; el de Rondan (2019) que indaga en el impacto en la agrometeorología; el de García Ferreyra (2017) enfocado en la calidad del aire por la propagación de incendios forestales; por mencionar algunos.

Respecto a la actividad aeronáutica, los vientos de superficie juegan un rol importante en el despegue y aterrizaje de aviones (Leung et al., 2020). Por ejemplo, Gultepe et al. (2019) afirman que en Estados Unidos el 20% de

los accidentes de aviación ocurridos durante el periodo 2003-2007 estuvieron fuertemente ligados a las condiciones meteorológicas, siendo el viento una de las variables que más contribuye. Entre los fenómenos meteorológicos más perjudiciales para la aviación se encuentran las nieblas, cuya formación depende, entre otros factores, del viento. Por ejemplo, Gultepe et al. (2007) sostienen que la formación de niebla no siempre ocurre en condiciones de viento calmo, y en estas situaciones la formación de las mismas está asociada a viento turbulento. Asimismo, en 1896 Scott muestra que en las Islas Británicas ocurrían nieblas con vientos fuertes y de larga duración. Mientras que en Argentina, particularmente en la estación meteorológica aeronáutica de Ezeiza (SAEZ) Quinteros de Menzies y Obertello (1972) encuentran que las nieblas son casi en su totalidad de tipo radiativo

y que, en consecuencia, los factores de mayor influencia en su formación son las calmas o los vientos leves con dirección comprendida entre E y NE.

Cabe destacar que la estación SAEZ se encuentra dentro del Aeropuerto Internacional Ministro Pistarini, que es la terminal aérea más grande y moderna de Argentina, y por lo tanto la entrada directa de vuelos internacionales de larga distancia al país. La importancia y confiabilidad de sus datos meteorológicos tanto a nivel nacional como internacional, sumadas a la relevancia de la ubicación, motivan la elección de SAEZ para caracterizar el viento de superficie en este trabajo.

Por ejemplo, algunos estudios climáticos y de variabilidad climática del viento muestran una disminución de la intensidad media diaria y anual en los últimos años tanto en algunas zonas de Argentina como en otras regiones del mundo (Baldo y Cerne, 2018; Cúneo et al., 2019; Vautard et al., 2010), pero también se observan tendencias positivas significativas en la velocidad del viento tanto de superficie como de niveles superiores en el sur de Argentina entre los años 1990-2020 (Merino, 2022). De esta manera, surge la necesidad de estudiar el comportamiento local del viento y su tendencia en la estación Ezeiza y conocer si el mismo está mostrando cambios o no.

El objetivo de este trabajo es realizar una caracterización preliminar de la intensidad del viento en la estación SAEZ durante el periodo 2009-2019. Con el fin de obtener una estadística del viento medio diario y de los valores extremos diarios en dicha estación, se caracteriza el viento a 10 m y se compara la serie con los datos climatológicos del periodo 1981-2010.

En la sección 2 se describen las observaciones y las herramientas utilizadas para analizar las mismas. En la sección 3 se presentan y discuten los resultados obtenidos, y finalmente en la sección 4 se resumen las conclusiones del trabajo.

2. METODOLOGÍA

2.1. Observaciones de viento en la estación de Ezeiza

En este artículo se analiza el viento a 10 m en la estación SAEZ que pertenece a la red de estaciones meteorológicas de superficie del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Sus coordenadas geográficas son 34°49'20" S 58°32'09" O, y está ubicada a una altitud de 20 m en el partido de Ezeiza de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Se cuenta con dos set de datos:

- El primero es de datos de vientos medios mensuales correspondientes al periodo climatológico 1981-2010 (A).
- El segundo es de datos de vientos horarios correspondientes al periodo 2009-2019 (B).

Como primera instancia, con el objetivo de conocer el viento en la estación SAEZ a nivel climatológico, se realiza un análisis de los vientos medios mensuales correspondientes a la serie 1981-2010 (A) tomada de la base de datos del SMN. Dicho periodo cuenta con 30 años de datos de vientos medios mensuales, donde la información del viento a 10 m está registrada en nudos y se convierte a m/s, utilizando dos decimales. Esta serie climatológica es emitida por el SMN pero no se encuentra publicada oficialmente. Los vientos medios mensuales fueron calculados a partir de los vientos medios diarios que surgen del promedio de 4 horas diarias principales (00, 06, 12 y 18 UTC) (ver Figura 1).

Como segunda instancia, se analizan los datos de vientos horarios correspondientes al periodo 2009-2019 (B). Se cuenta con 11 años de datos de vientos horarios, donde también se realiza la conversión de nudos a m/s, utilizando dos decimales. Los vientos medios diarios se calculan a partir del promedio de los 24 datos

de vientos horarios, mientras que los vientos medios mensuales se calculan promediando los vientos medios diarios para cada mes, y los vientos medios anuales surgen de promediar los vientos medios mensuales obtenidos (ver Figura 1). También se trabaja con los vientos máximos diarios, seleccionando el mayor valor del viento registrado durante las 24 horas del día, considerando el comienzo del mismo a las 00 Hora Oficial Argentina (HOA) (-3 UTC). Cabe aclarar que en este artículo no se trabaja con los datos correspondientes a registros de ráfagas de los mensajes Synop.

En cuanto a los controles de calidad de los datos de viento horario, estos se realizan una vez que los mismos ingresan al sistema del SMN a través de mensajes Synop. El control que se realiza es tanto de dirección (dd) como de intensidad (ff) (para más detalle consultar Anexo o Palavecino, 2021).

A partir de la información de anemometría se constata que en la estación SAEZ se utilizó la versión WAD21 de VAISALA con número de serie 52231 en el año 2009, que luego cambió a 52224 en el año 2010. Pero en el año 2016 se puso en funcionamiento el nuevo Sistema Automático de Observación Meteorológica (AWOS, por sus siglas en inglés) CATEGORÍA III, que implicó una actualización importante en el instrumental. Es importante destacar que tanto la torre anemométrica de la empresa VAISALA como la correspondiente al sistema AWOS se encuentran ubicadas en la cabecera de pista N°11, donde la distancia entre ambas torres es entre 10 y 15 m aproximadamente (comunicación personal con Diego Vega, jefe de la estación SAEZ). A partir del cambio de instrumental que se realizó en el año 2016, los datos que se informan en la libreta meteorológica son los obtenidos por el anemómetro ultrasónico del sistema AWOS. Si ante alguna eventualidad este sistema se encuentra fuera de servicio, se utiliza el anemómetro VAISALA como back up y se informa este dato en la libreta meteorológica. En estos casos, en la libreta no se aclara que el dato fue tomado por el anemómetro

VAISALA, pero sí se informa en las planillas de control de calidad (Información obtenida mediante comunicación personal con Anabella Barrionuevo, observadora de SAEZ).

Debido a que el cambio de instrumental se realizó precisamente dentro del periodo de estudio, podrían detectarse heterogeneidades en la serie como así también períodos en los cuales los instrumentos podrían haber presentado un funcionamiento inadecuado. Por lo tanto, se decide evaluar la normalidad de la distribución teniendo en cuenta el cambio de instrumental realizado en ese año. Los resultados muestran que la serie completa 2009-2019 presenta un buen ajuste a la distribución de Weibull, con aproximación a la distribución normal (parámetro de forma k elevado, ver sección 3).

2.2. Herramientas utilizadas para analizar los datos

En esta sección se mencionan y describen las diversas metodologías que se utilizan para analizar los datos estadísticamente. En todos los casos se emplea el lenguaje de programación Python para el procesamiento de datos, el cual es de libre distribución (disponible en <https://www.python.org/>, accedido el 27/09/2022).

Una herramienta útil para visualizar los datos es el Boxplot o Diagrama de caja. Es un método estandarizado para representar gráficamente una serie de datos numéricos a través de sus cuartiles (Tukey, 1977). El Boxplot muestra la mediana y los cuartiles de los datos, pudiendo también representar los valores atípicos o "outliers". La caja abarca el rango intercuartíl (IQR), es decir, el 50% de los datos que se encuentran entre los cuartiles 25 (Q1) y 75 (Q3). La línea que cruza el centro de la caja marca la mediana (la observación central). En este trabajo los bigotes se extienden a ambos lados de la caja y representan los rangos del 25% de valores de datos de la parte inferior y el 25% de la parte superior, excluyendo los valores atípicos.

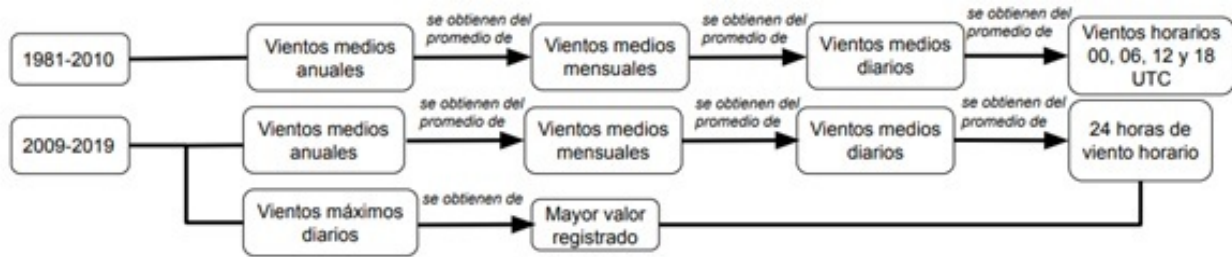


Figura 1: Cuadro sinóptico que esquematiza los cálculos realizados para la obtención de los vientos medios anuales, mensuales y diarios para las series 1981-2010 y 2009-2019; y de los vientos máximos diarios para la serie 2009-2019.

El histograma es otra herramienta de visualización gráfica muy utilizada en estadística. El mismo consta de una serie de barras cuyos anchos están definidos por los límites de clase y cuyas alturas dependen del número de valores en cada intervalo de clase. Muestra también los atributos de los datos, es decir, distribución, extensión y simetría. Particularmente en este trabajo los anchos de los intervalos de clase son iguales y las alturas de las barras del histograma representan la frecuencia relativa de cada uno.

Cuando se presenta un histograma, resulta útil mostrar los valores de los estadísticos más utilizados, por ejemplo, la media o la mediana. Si los datos provienen de una distribución normal (Gaussiana) (Wilks, 2005), entonces, siempre que el tamaño de la muestra sea lo suficientemente grande, el histograma debe aproximarse a una forma simétrica tipo campana.

Por su parte, el gráfico Q-Q Plot (Cuantil Cuantil) permite comparar los datos de la muestra con una distribución de referencia, por ejemplo, la distribución Gaussiana. Cada par de coordenadas que define la ubicación de un punto consiste en un valor de datos, y la estimación correspondiente para ese valor de datos deriva a partir de la función cuantil de la distribución ajustada (Wilks, 2005).

Para analizar la homogeneidad de la serie se emplean distintos tipos de testeos (Wilks,

2005) que permiten conocer si la serie puede o no ajustarse a algún tipo de distribución continua. Particularmente se quiere probar si la serie de datos puede ajustarse a una distribución de Weibull. La distribución de Weibull es una función comúnmente utilizada para ajustarse a distribuciones de frecuencias de velocidad del viento (Justus et al., 1978). La distribución de Weibull de dos parámetros ha sido la más ampliamente utilizada y recomendada para describir las distribuciones de frecuencia de las velocidades del viento con la finalidad de evaluar sus características y contribuir al modelado estadístico del mismo, en particular para su evaluación energética (Ramírez González, 2006). Esta distribución está compuesta por dos parámetros: parámetro de escala de Weibull “c” y parámetro o factor de distribución de forma “k”. Se utiliza el método de máxima verosimilitud para la estimación de los parámetros de Weibull siguiendo a Seguro y Lambert (2000) quienes postulan que es el método más preciso y robusto. La función de distribución de Weibull está representada por la ecuación (1):

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

Donde c toma unidades iguales a las unidades de velocidad del viento; k es adimensional; y v es la velocidad del viento. El parámetro de escala c define cuán dispersa se encuentra la distribución. Dependiendo del valor de k, una

distribución puede tomar diferente forma. Para valores de $k < 1$ la distribución presenta una fuerte asimetría positiva, y cuando k tiende a 1 la distribución de Weibull tiende a una distribución exponencial. El parámetro de escala c actúa estirando o comprimiendo la forma básica a lo largo del eje x , para un determinado valor de k . En especial, un valor de $k = 3,6$ hace que la distribución de Weibull sea muy similar a la distribución Gaussiana.

En la Fig. 2 se muestran ejemplos de distintas distribuciones dependiendo de los valores de k . Se observa especialmente que para valores de k entre 2 y 4, la distribución se aproxima a la forma Gaussiana. A medida que el k aumenta, la curva presenta elevada curtosis y asimetría hacia la izquierda.

Los testeos que se utilizan para analizar el tipo de distribución de la serie son: Test de Kolmogórov-Smirnov (Lilliefors, 1967; Crutcher, 1975), Test de Levene (Levene, 1960; Gastwirth et al., 2009), Test U de Mann-Whitney (Mann y Whitney, 1947; Yue y Wang, 2002).

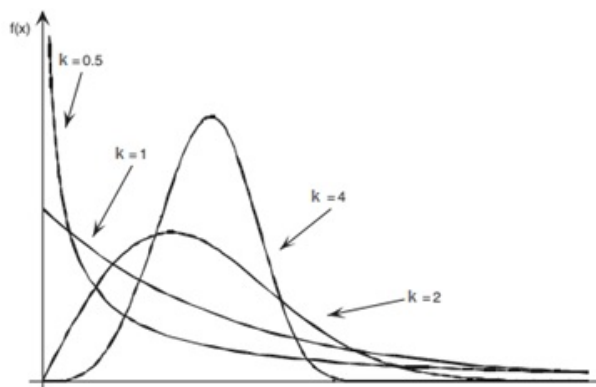


Figura 2: Funciones de densidad de probabilidad de la distribución de Weibull para cuatro valores del parámetro de forma k . (Gráfico tomado y adaptado, 4.4.5 Extreme-Value Distributions, Wilks (2005)).

3. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Antes de proceder con las comparaciones entre los vientos de ambas series, resulta importante analizar el tipo de distribución a la que se ajustan los vientos medios diarios del periodo 2009-2019.

Se realizan particiones dentro de la serie para un análisis más detallado y se aplican distintos tipos de testeos: Test de Kolmogórov-Smirnov, Test de Levene, Test U de Mann-Whitney. Los mismos indican que la serie no puede ajustarse a la distribución normal, ya sea tanto para el periodo completo, incluyendo 2016, como para cada una de las subdivisiones de la misma a través de los periodos 1 y 2 (periodo 1: 2009-2015 y periodo 2: 2017-2019). En particular, el análisis mediante las varianzas muestra que ambos periodos, 1 y 2, pertenecen a distintas poblaciones (no mostrado). En este punto hay que tener en cuenta que al analizarse periodos relativamente cortos de tiempo, los mismos podrían estar influenciados por la variabilidad propia de la atmósfera, pudiendo no ser detectada por los testeos.

Sin embargo, el ajuste a la distribución de Weibull muestra que ambos periodos poseen una distribución similar, aproximada a la forma de “campana”, indicando el acercamiento de ambos a la distribución Gaussiana, con una leve asimetría (no mostrado). Los resultados al comparar los valores de k muestran que eliminar (o no) el año 2016 de la serie completa no produce alteraciones significativas en la distribución, dado que las diferencias en los valores de k pueden considerarse despreciables a los fines de este estudio. Por este motivo se decide incluir los datos de vientos correspondientes al año 2016. En cuanto al análisis de la distribución de los vientos máximos diarios del periodo 2009-2019, la serie presenta un buen ajuste a la distribución de Weibull, donde k toma también valores semejantes a los de la distribución Gaussiana.

3.1. Comparación entre la serie de vientos medios mensuales y anuales del periodo 2009-2019 y la serie climatológica 1981-2010

En esta sección se busca obtener una caracterización del viento medio mensual climatológico durante el periodo 1981-2010 y luego poder compararlo con el viento medio mensual del periodo de interés 2009-2019. En la Fig. 3 se presentan para ambas series los gráficos boxplot, Q-Q plot e histogramas de frecuencias con ajustes a la distribución de Weibull.

Analizando los gráficos boxplot (panel superior izquierdo), se observa a grandes rasgos que las menores velocidades corresponden a la serie 2009-2019. La serie 1981-2010 presenta una mediana con valor de 3,75 m/s, donde el 50% de los registros que se encuentran dentro de la caja oscilan entre 3,4 y 4 m/s. Son escasos los valores fuera de rango u outliers. Comparando con la serie 2009-2019, la mediana toma un valor menor, alrededor de 3,4 m/s. En este caso, el 50% de los datos que se encuentran dentro de la caja oscilan entre 3,1 y 3,7 m/s.

Mediante el gráfico Q-Q plot (panel superior derecho) se muestra el ajuste de los vientos medios mensuales de ambas series a la distribución normal. Se observa en ambos casos, un alto porcentaje de los datos emparejados a la función lineal representada en color rojo, evidenciando un buen ajuste a la misma.

Para concluir el análisis se procede al estudio de los histogramas de frecuencias y de las series ajustadas a la distribución de Weibull. Tanto la media como el desvío estándar son mayores para el periodo climatológico alcanzando un valor de 3,7 m/s y de 0,56 m/s respectivamente (panel inferior izquierdo), en comparación con la serie de interés donde la media es de 3,36 m/s, mientras que el desvío estándar es de 0,43 m/s (panel inferior derecho). El rango de velocidades también es mayor en la serie climatológica, variando entre 2,2 y 5,2 m/s,

lo cual puede deberse a la mayor cantidad de años considerados. En cuanto al análisis de la distribución de Weibull, el parámetro de forma k de la serie 1981-2010 toma un valor de 7,34, definiendo una curva con una moda muy pronunciada, elevada curtosis y asimetría hacia la izquierda. Cabe aclarar que una curtosis grande implica una mayor concentración de valores tanto muy cerca de la media (pico) como muy lejos de ella (colas), disminuyendo la frecuencia de valores intermedios.

En cuanto al parámetro de forma k , en la serie 2009-2019 toma un valor de 8,76, y al igual que para el periodo 1981-2010, define una curva con elevada curtosis y asimetría hacia la izquierda. Tanto el valor de la media como el valor del parámetro de escala c son menores en el periodo 2009-2019 en comparación con el periodo 1981-2010. La disminución del valor de la velocidad media indica un cambio en la amplitud de la distribución, relacionado con el parámetro de escala c , ya que cuanto menor sea éste, menor amplitud presentará la distribución. Tal como se observa, en este caso, el rango de velocidades es menor, variando entre 2,3 y 4,4 m/s.

En la Fig. 4 se presentan las series del promedio de los vientos medios mensuales (panel superior) que resultan de promediar para cada año las intensidades de los vientos medios mensuales para cada periodo. Tanto en la serie 2009-2019 como en la serie 1981-2010 se observa la misma tendencia: las intensidades mínimas se registran durante las estaciones de otoño (Marzo- Abril- Mayo) e invierno (Junio- Julio- Agosto) mientras que las máximas durante la primavera (Septiembre -Octubre- Noviembre) y verano (Diciembre- Enero- Febrero). Se observa que los vientos presentan menores intensidades en el periodo 2009-2019, donde el valor mínimo para el promedio de los vientos medios mensuales es 2,7 m/s, mientras que el máximo es 3,9 m/s.

Respecto a los vientos medios anuales (panel inferior), en ambos periodos las líneas de

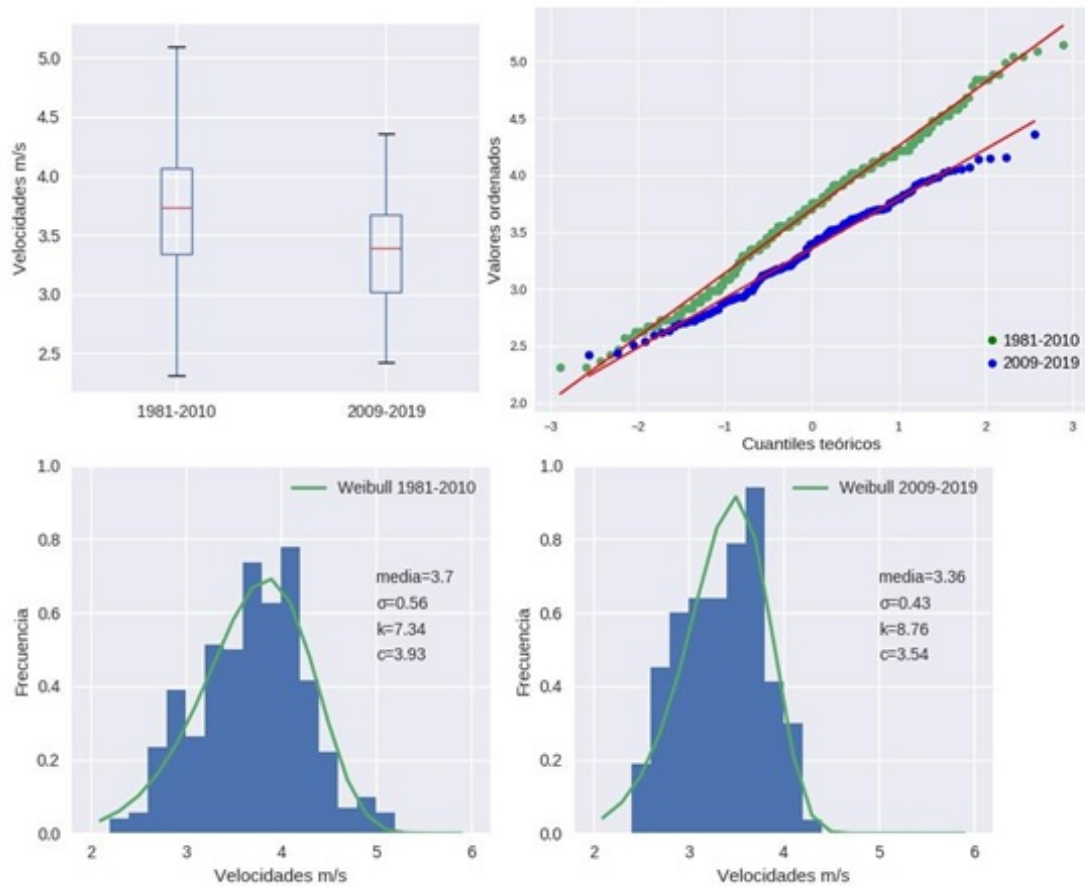


Figura 3: Boxplot (panel superior izquierdo), Q-Q plot (panel superior derecho) e histogramas de las series de vientos medios mensuales de los periodos 1981-2010 y 2009-2019 con ajuste a la distribución de Weibull (paneles inferiores izquierdo y derecho, respectivamente), incluyendo el valor de sus parámetros.

tendencia evidencian una inclinación negativa, siendo más pronunciado el decrecimiento en la serie 1981-2010, donde la pendiente de la recta es de $-0,025$ en comparación a $-0,002$ del periodo 2009-2019.

En la Tabla 1 se muestran los valores de los estadísticos calculados para los vientos medios mensuales, vientos medios anuales y promedio de vientos medios mensuales. Respecto a las series de vientos medios anuales, el promedio de la variabilidad interanual presenta una tendencia negativa en ambas, siendo mayor en el periodo climatológico, alrededor de $-0,98\%$ anual mientras que en el periodo 2009-2019 es de alrededor de $-0,35\%$ anual. En ambos

periodos se observan dos extremos relativos de variabilidad interanual. En el periodo climatológico estos se registran entre los años 1984-1985 (1997-1998) donde la variabilidad interanual es de $-11,8\%$ (-20%). En cuanto al periodo 2009-2019 los máximos ocurren entre los años 2010-2011 y 2016-2017 ambos con un valor aproximado de $7,14\%$.

3.2. Análisis de vientos medios y máximos diarios según los meses del año para el periodo 2009-2019

Para analizar el comportamiento del viento medio diario y del viento máximo diario de acuerdo al mes del año, se muestran los gráficos

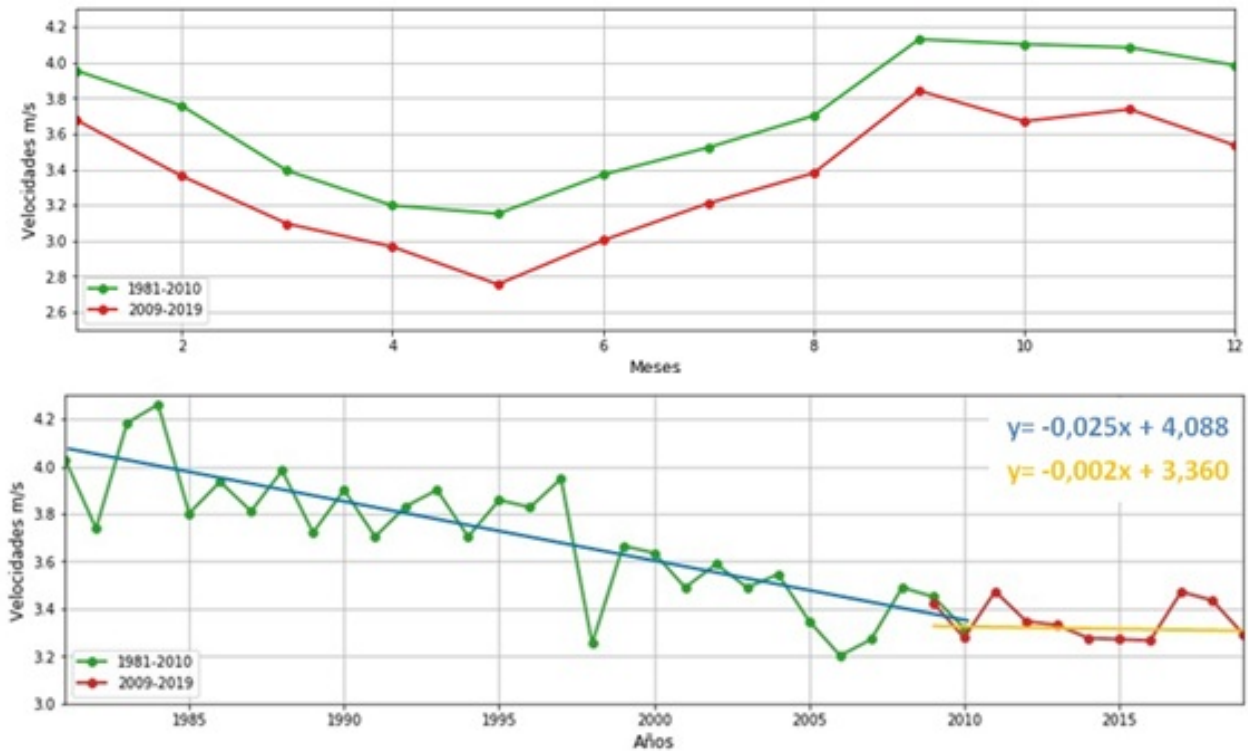


Figura 4: Promedio de los vientos medios mensuales para las series 1981-2010 y 2009-2019 (panel superior) y vientos medios anuales incluyendo las líneas de tendencia con sus respectivas ecuaciones (azul: 1981-2010, naranja: 2009-2019) (panel inferior).

boxplot para cada mes dentro del periodo 2009-2019 (Fig. 5). Este estudio es importante ya que permite analizar la variabilidad anual y detectar los meses donde el viento presenta los mayores y menores valores de intensidad. Así mismo se puede analizar cuáles son los meses en el que el viento varía en un rango más amplio.

Se observa que si bien la diferencia de intensidades del viento medio diario y máximo diario durante el año es leve, la mediana presenta los mayores valores en verano y primavera, siendo alrededor de 3 m/s para los vientos medios diarios y alrededor de 6 m/s para los vientos máximos diarios. Es importante destacar que la mediana anual de los vientos máximos diarios alcanza un valor alrededor de 6,5 m/s, siendo el doble de intensidad que para los vientos medios diarios.

En ambos casos, aunque más marcado para los vientos máximos diarios, se observa que

la amplitud de las intensidades dentro de la caja es mayor para el invierno y otoño, donde el cuartil Q1 se encuentra levemente desplazado hacia intensidades menores. Si bien, como se observó anteriormente, tanto los vientos medios diarios como los vientos máximos diarios alcanzan las mayores intensidades en verano y primavera, éstas varían dentro de un rango más acotado en comparación al invierno y otoño. Un aspecto a destacar es que los valores fuera de rango presentan las mayores intensidades en invierno, en ambos casos. Este comportamiento podría responder a la dinámica de situaciones sinópticas típicas que se desarrollan durante el invierno, favoreciendo la ocurrencia de vientos extremos más elevados. Un ejemplo de estas situaciones es el desarrollo de ciclones explosivos al sudeste de Sudamérica, siendo su época más frecuente en invierno entre los 30 y 45° S, sobre el continente y sobre el mar (Possia, 2004). Además de estar asociados a la rápida profundización,

Periodos	Vientos medios mensuales				Vientos medios anuales		Promedio vientos medios mensuales
	Media [m/s]	Mediana [m/s]	Desvío Estándar [m/s]	Amplitud [m/s]	Promedio Variabilidad interanual	Aumento/ Disminución Extremos	Rango [m/s]
1981-2010	3,75	3,7	0,56	3,1	-0,98%	* -11,8% (1984-1985) * -20% (1997-1998)	3,2-4,15
2009-2019	3,4	3,36	0,43	2	-0,35%	* 7,14% (2010-2011) (2016-2017)	2,75-3,8

Tabla I: Valores estadísticos calculados para los vientos medios mensuales, vientos medios anuales y promedio de vientos medios mensuales

generalmente se registran vientos muy intensos y fuerte precipitación (Possia, 2004).

Analizando el comportamiento del viento de acuerdo al mes del año, en la Tabla 2 se observa que el viento medio diario se comporta de manera similar durante los meses de primavera y de verano respecto a la media, donde la misma oscila entre 3,36 y 3,84 m/s, alcanzando las mayores intensidades durante Septiembre, Octubre y Noviembre. Asimismo, en los meses de otoño e invierno la media alcanza los menores valores, entre 2,8 y 3,4 m/s. Respecto al desvío estándar se observa que los mayores valores corresponden al invierno y a la primavera, entre 1,3 y 1,5 m/s; mientras que en verano y otoño el desvío es menor, oscilando entre 1 y 1,3 m/s.

Continuando con el análisis de los vientos máximos diarios de acuerdo a la Tabla 2, se observa que si bien las intensidades de los mismos duplican, en general, a las intensidades de los vientos medios diarios, se mantiene el mismo comportamiento con respecto a las estaciones del año. Las mayores intensidades se presentan durante los meses de primavera y verano, oscilando entre 6,27 y 6,81 m/s; mientras que las menores durante los meses de otoño e invierno con valores entre 5,21 y 6,17 m/s.

Respecto al desvío estándar, la variación es similar durante todo el año, siendo su oscilación entre 1,7 y 2,07 m/s.

Mes del año	Media [m/s]		Desvío estándar [m/s]	
	Viento medio diario	Viento máximo diario	Viento medio diario	Viento máximo diario
Enero	3,66	6,72	1,07	1,81
Febrero	3,36	6,27	1,06	1,7
Marzo	3,1	5,91	1,06	1,86
Abril	2,97	5,66	1,18	1,93
Mayo	2,76	5,21	1,14	1,76
Junio	3	5,55	1,28	1,92
Julio	3,21	5,89	1,33	1,92
Agosto	3,38	6,17	1,35	2,04
Septiembre	3,84	6,81	1,47	2,07
Octubre	3,67	6,67	1,27	1,99
Noviembre	3,74	6,71	1,27	1,89
Diciembre	3,54	6,64	0,97	1,87

Tabla II: Media y desvío estándar mensual del viento medio diario y del viento máximo diario correspondiente a la serie 2009-2019.

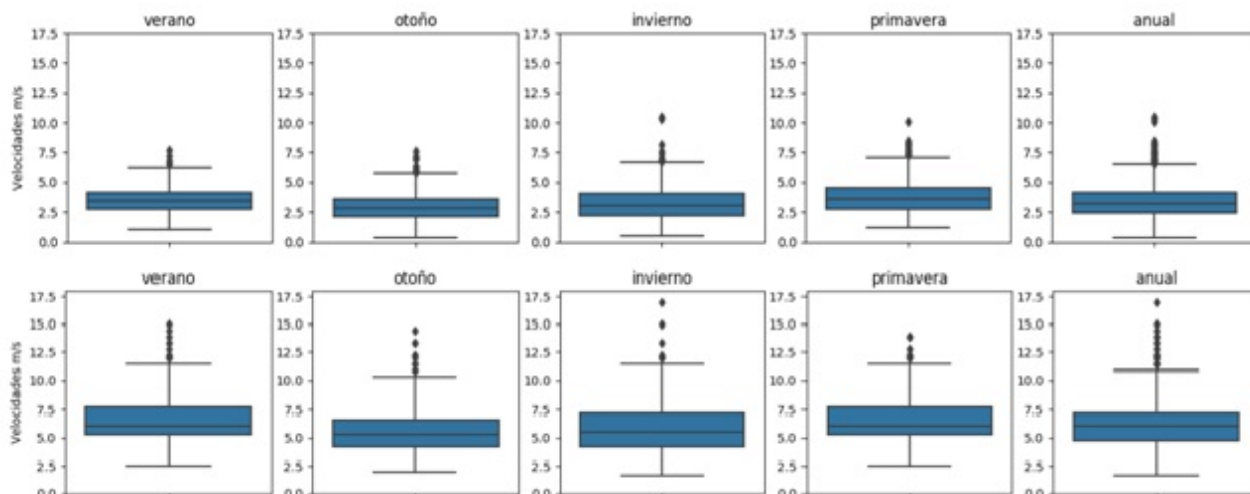


Figura 5: Boxplot del viento medio diario para cada estación del año y para todo el año (panel superior) y boxplot del viento máximo diario para cada estación del año y para todo el año (panel inferior), ambos correspondientes a la serie 2009-2019.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se caracterizó la intensidad del viento en la estación SAEZ a partir de datos de vientos horarios para un periodo de 11 años, comprendidos entre 2009 y 2019. Si bien se reconoce que el periodo no es lo suficientemente extenso, el mismo permitió establecer ciertos patrones y tendencias en el comportamiento del viento en dicha estación, para diferentes escalas temporales.

A partir de los datos horarios de la intensidad del viento, se calcularon los vientos medios diarios, mensuales y anuales; y se seleccionaron los vientos máximos diarios. Además, se realizó una comparación con la serie 1981-2010 provista por el SMN y considerada como climatológica.

Los resultados de los test aplicados y el ajuste de Weibull mostraron que las series de vientos medios mensuales 1981-2010 y 2009-2019 pueden tratarse como series homogéneas a pesar de haberse realizado cambios en el instrumental de medición en la estación SAEZ. Resulta importante destacar que hasta el 2016 (año en que se reemplaza el instrumental) las intensidades de los vientos fueron del mismo orden que las de la serie climatológica, y luego a

partir de ese año la amplitud entre los valores máximos y mínimos disminuyó notablemente (no mostrado). Siguiendo esta línea, en Baldo y Cerne (2018) encontraron una disminución progresiva en la intensidad de los vientos a partir del cambio de instrumental, en las estaciones meteorológicas de Trelew y Bahía Blanca, durante el periodo 2009-2016, resultando el año 2016 el menor registro anual en Trelew. Además, los autores destacaron un cambio en las intensidades a partir del año 2013 que no fueron causadas por cambios de instrumental, por lo tanto, sostuvieron que podría estar asociado, entre otros factores, a cambios en la circulación de la atmósfera.

El análisis realizado evidenció una marcada disminución tanto en la intensidad como en el rango de variación de los vientos medios mensuales en el periodo 2009-2019 respecto a la serie climatológica 1981-2010. En concordancia con estos resultados encontrados, algunos estudios climáticos y de variabilidad climática del viento sostuvieron también que la velocidad media diaria y anual del viento está disminuyendo en los últimos años tanto en Argentina (Baldo y Cerne, 2018) como en otras regiones del mundo (Pryor et al., 2007; Wan et al., 2010). En semejanza con los resultados

hallados en Baldo y Cerne (2018), otros estudios realizados en el noreste patagónico destacaron una marcada reducción de vientos extremos tanto en velocidades altas como en calmas entre los años 1997-2014 (Cúneo et al., 2019). Palese y Lassig (2012) documentaron también una disminución en la velocidad del viento observado en la provincia de Neuquén. Asimismo, en el hemisferio norte, Pryor et al. (2007) indicaron una tendencia negativa en la intensidad de los vientos en el centro oeste de Estados Unidos entre 1973 y 2005; mientras que Wan et al. (2010) lo documentaron en estaciones de Canadá. Algunos resultados hallados sostienen que el aumento progresivo en calmas de viento en el hemisferio norte se debe directamente al incremento de la rugosidad de la superficie por cambios en el uso del suelo (Vautard et al., 2010).

En cuanto a los vientos medios anuales, también se apreció una tendencia negativa en la intensidad de los mismos hacia finales del periodo 2009-2019.

Respecto a la serie de vientos medios diarios y máximos diarios del periodo 2009-2019 cabe destacar que si bien durante las estaciones de primavera y verano se presentaron intensidades levemente más altas; ocurre que durante el invierno se registraron los valores extremos más intensos. Este comportamiento podría estar asociado a la dinámica de situaciones sinópticas típicas que se desarrollan durante el invierno, favoreciendo la ocurrencia de vientos extremos más intensos. Se observó también que los vientos máximos diarios duplicaron en intensidad a los vientos medios diarios sin discriminación de acuerdo a la estación del año.

Los resultados encontrados mostraron una tendencia negativa en la intensidad de los vientos en la estación SAEZ en sus diferentes escalas temporales y fueron consistentes a los hallados en otros estudios (Baldo y Cerne, 2018; Cúneo et al., 2019; Palese y Lassig, 2012; Pryor et al., 2007; Vautard et al., 2010; Wan et al., 2010), no obstante en Merino

(2022) encontraron que en regiones de la Patagonia los vientos evidenciaron tendencias positivas considerando los últimos 30 años. Por lo tanto se destaca la necesidad de extender el estudio llevado a cabo en este trabajo a otras estaciones meteorológicas del país. Asimismo, al trabajar con una serie de tiempo relativamente corta, la misma podría estar influenciada por la variabilidad interanual de la atmósfera, donde bajo diferentes regímenes de variabilidad de baja frecuencia, la atmósfera puede comportarse de maneras distintas. Por esta razón, con el fin de poder detectar posibles variabilidades climáticas, resulta de interés para trabajos a futuro además de extender el análisis realizado en este trabajo a otras estaciones meteorológicas, también realizarlo para un periodo de tiempo más prolongado. De esta manera quedarían documentadas características de utilidad para diversos usuarios de las observaciones en distintas estaciones del país.

ANEXO - CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS DE VIENTO HORARIO

Una vez que los datos de viento horario ingresan al sistema del SMN a través de mensajes Synop se les realiza una serie de controles de calidad. El control es de dirección (dd) e intensidad (ff).

Si en el dato se informa dirección, el dato debe estar acompañado por la intensidad y viceversa. Se controla que la dirección no sea superior a 360°, y en el caso que se informe "99" (direcciones variables), la intensidad debe ser menor a 6 kt. Con respecto a la intensidad, la misma tiene una cota superior de 80 kt. Acerca de la consistencia con tiempo presente (WW), se realizan los siguientes controles: Si $WW = 09$ (tempestad de polvo o arena a la vista, pero no en la estación), o $WW = 30$ a 39 (tempestad de polvo, arena, ventisca baja o elevada), entonces la intensidad del viento debe ser mayor a 10 kt; si en el tiempo presente se incluyen fenómenos relacionados con vientos intensos (ventisca, torbellino, etc), la intensidad del viento debe ser mayor que 10 kt.

No existen controles de calidad en tiempo real, sino que el chequeo se realiza por un supervisor visualmente a través de gráficos, por lo cual en esta instancia es altamente probable la filtración de posibles errores. El gráfico que se chequea muestra, durante las últimas 48 horas, los datos de viento horario, ráfaga horaria, tiempo presente y el viento máximo diario que se informa en el Synop de 12 UTC. Se controla que no haya ni saltos bruscos ni vientos horarios superiores al viento máximo diario. A nivel del dato diario, se chequea que no haya más de 3 días consecutivos con valores iguales.

Los mismos controles se repiten en tiempo diferido utilizando la misma metodología. Se revisa la siguiente información: Que la intensidad del viento máximo diario no sea menor a la intensidad del viento horario y/o de la ráfaga máxima horaria; y se chequea el dato de viento cuya intensidad es superior a 50 kt (esto último aplica especialmente en regiones de la Patagonia, donde climatológicamente se registran los vientos más intensos). Respecto al instrumental de la estación SAEZ, cabe destacar que hasta el año 1992 se utilizaron anemómetros de la empresa VAISALA 11 registrándose distintos cambios en el número de serie (en 1984: 10364, en 1988: 33855 y en 1992: 66260 s/c), y en el año 1997 se realizó un nuevo cambio en el instrumental a la versión VAISALA WAD21M 62231.

REFERENCIAS

- Baldo, M., Cerne, B., 2018: Sobre la variabilidad del viento medio diario en la región costera Patagónica comprendida entre las latitudes 38°S y 46°S. XIII Congreso Argentino de Meteorología (CONGREMET XIII). 16-19 de Octubre, Rosario, Argentina.
- Crutcher, H.L., 1975: A note on the possible Misuse of the Kolmogorov-Smirnov Test. *Journal of Applied Meteorology*, 14(18), 1600–1603. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014\(1600:ANOTPM\)2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014(1600:ANOTPM)2.0.CO;2)
- Cúneo, L. M., Cerne, B., Llano, M., 2019: Descripción preliminar de la velocidad y dirección del viento medio mensual en Trelew. *Meteorológica*, 44(1), 66–80.
- García Ferreyra, M. F., Curci, G., Della Ceca, L. S., Lighezzolo, R., 2017: Dispersión de la pluma de humo de los incendios forestales en la Patagonia nororiental durante el verano 2016-17: una visión desde el espacio.
- Gastwirth, J. L., Gel, Y. R., Miao, W., 2009: The Impact of Levene's Test of Equality of Variances on Statistical Theory and Practice. *Statist. Sci.* 24(3), 343-360. <https://doi.org/10.1214/09-STS301>
- Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S., 2007: Fog Research: A Review of Past Achievements and Future Perspectives. *Pure appl. geophys.* 164, 1121–1159. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0211-x>
- Gultepe, I., Sharman, R., Williams, P. D., 2019: A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology. *Pure Appl. Geophys.* 176, 1869–1921. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02168-6>
- Justus, C. G., Hargraves, W. R., Mikhail, A., Graber, D., 1978: Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 17(3), 350-353. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017\(0350:MFWSF\)2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017(0350:MFWSF)2.0.CO;2)
- Leung, A. C. W., Gough, W. A., Butler, K. A., 2020: Characterizing observed surface wind speed in the Hudson Bay and Labrador regions of Canada from an aviation perspective. *Int J Biometeorol* 66, pp. 411–425 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02021-9>
- Levene, H., 1960: Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling. Stanford University Press, Palo Alto, 278-292.
- Lilliefors, H. W., 1967: On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown, *Journal of the American Statistical Association*, 62:318, 399–402. <https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10482916>
- Mann, H. B., Whitney, D. R., 1947: On a Test of Whether one of Two Random Variables

- is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50–60.
- Merino, R. A., Gassmann, M. I., 2022: Wind trends analysis in southern South America from weather station and reanalysis data. *International Journal of Climatology*, 42(4), 2117–2134. <https://doi.org/10.1002/joc.7355>
- Otero, F., Cerne, B., Campetella, C., 2017: Estudio preliminar de la velocidad del viento en San Julián en referencia a la generación de energía eólica. *Meteorológica*, 42(2), 59-79.
- Palavecino, M. A., 2021: Caracterización de la intensidad del viento en la escala diaria y verificación del pronóstico numérico en la estación Ezeiza. Tesis de Licenciatura. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Buenos Aires.
- Palese, C., Lassig J., 2012: Variabilidad del viento en Neuquén. XI Congreso Argentino de Meteorología (CONGREMET XI). 28-01 de Junio, Mendoza, Argentina. Possia, N. E., 2004: Tesis Doctoral “Estudio de los ciclones explosivos sobre la región sur de Sudamérica”. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 223 págs.
- Pryor, S. C., Barthelmie, R. J., Riley, E. S., 2007: Historical evolution of wind climates in the U.S.A. *Journal of Physics: Conference Series* 75, 1-8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/75/1/012065>
- Quinteros de Menzies, C. Y., Obertello, I., 1972: Pronóstico objetivo de niebla en Ezeiza. Publicación de la Fuerza Aérea Argentina, Comando de regiones aéreas, Servicio Meteorológico Nacional, Serie C, 12, 32 páginas.
- Ramírez González, M. P., 2006: Tesis doctoral “Modelado estadístico de las características del viento para su evaluación energética. Aplicación a las Islas Canarias”. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 509 págs. <http://hdl.handle.net/10553/20027>
- Rondan, G. A., Michelin, C. I., Brizuela, A. B., Maltese, N. E., Kemerer, A. C., 2019: Características del índice de temperatura y humedad modificado por viento y radiación en Entre Ríos, Argentina; Asociación Argentina de Agrometeorología; *Revista Argentina de Agrometeorología*; 10; 10-2019; 49-57.
- Scott, R. H., 1896: Notes on some of the difference between fogs, as related to the weather systems which accompany them, submitted to the Fog Committee, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* XXII, 41–65.
- Seguro, J. V., Lambert, T. W., 2000: Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(1), 75-84. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00122-1)
- Tukey, J.W., 1977: *Exploratory Data Analysis*. Reading, Mass., Addison-Wesley, 2, 131160.
- Vautard, R., Cattiaux, J., Yiou, P., 2010: Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. *NatureGeosci* 3, 756–761. <https://doi.org/10.1038/ngeo979>
- Waimann, C., 2016: Tesis Doctoral “Desarrollo de un sistema de pronóstico estocástico-dinámico de producción de energía eólica basado en el modelo WRF/CIMA”. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Buenos Aires.
- Wan, H., Wang, X. L., y Swail, V. R., 2010: Homogenization and Trend Analysis of Canadian Near-Surface Wind Speeds. *Journal of Climate*, 23(5), 1209-1225. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3200.1>
- Wilks, D. S., 2005: *Statistical Methods in the Atmospheric Science*. 2.^a ed., Academic Press, p. 648.
- Yue, S., Wang, C. Y., 2002: The influence of serial correlation in the Mann-Whitney Test for detecting a shift in median. *Advances in WaterResearch*, 25, 325–333. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00049-5)