

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN EL CENTRO DE ARGENTINA MEDIANTE EL USO DE WAVELETS

Emilio Bianchi^{1,2}, Tomás Guzden²

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

²Centro Interdisciplinario de Telecomunicaciones, Electrónica, Computación y Ciencia Aplicada (CITECCA) – Universidad Nacional de Río Negro C.P. 8400 – Río Negro
Tel. 0294-443-3186 e-mail: ebianchi@unrn.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se analizó la variabilidad de la velocidad del viento y se exploraron fuentes de predictibilidad para diferentes sitios en el centro de la Argentina para el período 1980-2022. Para esto se aplicaron herramientas de análisis espectral, análisis de tendencias y correlaciones a datos derivados de reanálisis. Los análisis indican que el comportamiento temporal de las series de velocidad del viento es poco estacionario: no se observa presencia de ciclos significativos y estables a lo largo del tiempo. Se observan tendencias a largo plazo que, en la mayoría de los casos no son significativas. Como potencial predictor de la velocidad del viento se destacan Oscilación Antártica, que muestra correlaciones negativas con el recurso eólico durante el verano, otoño y primavera; y el índice Blob, que muestra correlaciones positivas en los sitios de la Patagonia durante la primavera. El análisis de coherencia wavelet, sin embargo, muestra que las relaciones entre estos forzantes climáticos y la velocidad del viento ocurren en períodos que no son los que dominan la variabilidad temporal de las series de velocidad del viento: El espectro de potencia wavelet revela que las series de velocidad del viento concentran su variabilidad en ciclos que van desde 1 año hasta tres años (aproximadamente), mientras que las relaciones con índices climáticos ocurren en períodos más largos (> 4 años).

Palabras clave: velocidad del viento, variaciones climáticas, wavelets.

INTRODUCCIÓN

En años recientes, la generación de electricidad renovable no convencional (principalmente solar y eólica) ha crecido notablemente a nivel global, aumentando su participación en las matrices de generación nacionales y regionales (WWEA, 2015; Ren21). Este incremento en la producción de energías renovables implica nuevos desafíos para los sistemas de generación; ya que esta producción es intermitente, es decir que depende de fluctuaciones meteorológicas y no coincide con la demanda de electricidad (Cosserson et al., 2013; Grams et al., 2017). El problema de la intermitencia es mayor en el recurso eólico que en el recurso solar, ya que este último concentra su variabilidad en los ciclos diario y anual, que si bien no necesariamente coinciden con la demanda de electricidad, son predecibles (Gross et al., 2006, Hoste et al., 2009; Guozden et al., 2020). Esta incertidumbre en la generación eólica afecta a diferentes actores del sector eléctrico como dueños y operadores de plantas de generación, operadores del sistema eléctrico, desarrolladores de proyectos, etc. (Albadi y El-Saadany, 2010; Orlov et al., 2020, Bett et al., 2022); y está demandando un mejor entendimiento de las causas de la variabilidad del recurso eólico (Torralba et al. 2017, Bett et al., 2022).

El recurso eólico suele presentar variabilidad en diferentes escalas temporales: desde la escala micrometeorológica (segundos a minutos), pasando por la escala diaria, la sinóptica, la estacional, anual e incluso interanual y decadal (Soberanis y Mérida, 2015; Watson, 2019). Hasta el momento, la mayor disponibilidad de pronósticos del recurso eólico ha estado limitada a la escala sinóptica (< 10 días)

(Graff et al., 2014; Torralba et al. 2017). No obstante, las variaciones y tendencias climáticas de más largo plazo (estacional, decadal) causan un gran impacto en el recurso eólico (Malloy et al., 2015; Lledó et al., 2018).

Las variaciones a largo plazo de la velocidad del viento han recibido creciente atención de parte de la comunidad científica en los últimos años (Deng et al., 2021; Wohland et al., 2021). Diferentes autores han abordado esta problemática en escalas globales y regionales. En líneas generales, se ha observado un debilitamiento global de las velocidades del viento (“global stilling”, Roderick et al., 2007) desde la década de 1960. Esta tendencia al debilitamiento fue seguida por una estabilización y aumento de la velocidad del viento (“reversal”, Zeng et al. 2019) que comenzó alrededor del año 2010. Los mecanismos físicos detrás de estas tendencias a largo plazo de la velocidad del viento no son del todo comprendidos actualmente, pero el consenso general indica que, dado que la velocidad del viento depende de gradientes de temperaturas de gran escala (Deng et al., 2021; Zha et al., 2021), estas tendencias son el resultado de i) el cambio climático de origen antropogénico (Pryor et al., 2020, Zha et al., 2021; Deng et al., 2022) y ii) la acción de oscilaciones climáticas de gran escala (como el fenómeno El Niño)(Roderick et al., 2007; Zha et al., 2021). Sin embargo, es muy difícil determinar la contribución de cada uno de estos mecanismos en variaciones a largo plazo de la velocidad del viento. Estudios de escala global (Zeng et al. 2019; Deng et al., 2021), hemisférica (Deng et al., 2021; Zha et al., 2021; Deng et al., 2022) y regional (McVicar et al., 2008; Minola et al., 2021; Liu et al., 2022) muestran una gran heterogeneidad en la magnitud, signo y duración de las tendencias de velocidad del viento, así como también en los mecanismos físicos involucrados.

Comprender los forzantes de la dinámica de largo plazo de las velocidades del viento es de gran importancia para el diseño de escenarios futuros de energía eólica. Esto implica considerar tanto los efectos del cambio climático antropogénico como las fluctuaciones debido a la variabilidad interna del sistema climático (Pryor et al., 2020). El problema reside en que la variabilidad interna del sistema climático frecuentemente manifiesta un comportamiento caótico y no estacionario, lo cual dificulta la estimación de los impactos del cambio climático y limita la precisión de las proyecciones climáticas (Pryor et al., 2020; Wohland et al., 2021; Zha et al., 2021). Por este motivo, resulta necesario un mejor entendimiento de las variaciones interanuales e interdecadales de la velocidad del viento y sus patrones de teleconexión (Pryor et al., 2020)

Como se mencionó anteriormente, diversos estudios se han dedicado a investigar la variabilidad de la velocidad del viento en relación con oscilaciones climáticas de gran escala (Zeng et al. 2019; Deng et al., 2021; Utrabo-Carazo et al., 2022). La gran mayoría de estos trabajos han analizado las velocidades del viento en el dominio temporal, con las excepciones notables de Naizghi y Ouarda (2017), y Utrabo-Carazo et al. (2023); los cuales hicieron uso de técnicas espectrales llamadas “wavelets”. Los métodos espectrales basados en wavelets resultan más apropiados para caracterizar la variabilidad y las relaciones entre series de variables climáticas, las cuales normalmente muestran comportamientos no estacionarios y además pueden contener señales transientes en múltiples escalas temporales (Coulibaly y Burn, 2004; Grinsted et al., 2004; Janicke et al., 2009; Polanco-Martinez et al., 2020). El presente trabajo tiene como objetivo realizar una primera aproximación en la implementación de técnicas espectrales basadas en wavelets para mejorar la comprensión del comportamiento temporal de la velocidad del viento y su relación con forzantes climáticos de gran escala en el centro de Argentina

METODOLOGÍA

En este trabajo se analizó el comportamiento temporal de la velocidad del viento en las localidades de Necochea, Villalonga, Pomona, Puerto Madryn, Trelew y Rawson. En estos sitios operan parques eólicos de la empresa generadora GENNEIA, y se cuenta con mediciones del recurso eólico en períodos de tiempo acotados. Estas mediciones fueron realizadas sobre mástiles a 100 metros de altura, y se utilizaron sensores de la marca Thies. Los períodos de medición de cada sitio se especifican en la tabla 2. Estos datos observados se complementaron con datos de velocidad del viento derivados del reanálisis MERRA2 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>) (Rienecker et al., 2011). Este conjunto de datos permite extender las series de velocidad del viento hasta el año 1980. Se extrajeron las variables velocidad de viento a 2, 10 y 50 metros de altura (U/V2M, U/V10M, U/V50M) en los puntos de grilla cercanos a los

nodos eólicos (figura 1) para el período 1980-2022, y se extrapoló la velocidad del viento a 100 metros de altura utilizando las velocidades a estas diferentes alturas asumiendo un perfil logarítmico del viento con la altura (Staffell y Green, 2014; Staffell y Pfenninger, 2016).

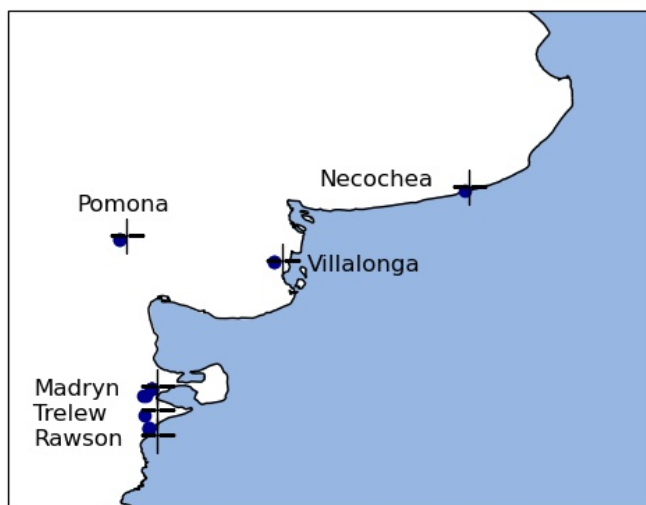


Figura 1: Ubicación de los sitios eólicos (puntos), y puntos de grilla del reanálisis MERRA2 (cruces).

Se analizó el desempeño del reanálisis MERRA2 en representar la variabilidad del viento observado calculando los estadísticos i) coeficiente de correlación y ii) error cuadrático medio en los períodos en que se solaparon las observaciones con los datos de reanálisis. Se analizó la tendencia lineal de la velocidad del viento en todos los sitios mediante la utilización del test no paramétrico de Mann-Kendall (Hamed 2008). Para analizar la ocurrencia y significancia de ciclos en la velocidad del viento, se aplicó el análisis de la transformada wavelet utilizando el software PyWavelet (<https://pypi.org/project/PyWavelets/>) (Lee et al., 2019) basado en Python. Este método permite visualizar la presencia de ciclos en series temporales que no son estacionarias (Torrence y Compo 1998). Esto significa que pueden estar presentes o ausentes durante diferentes períodos de tiempo; entonces se puede observar, para los diferentes ciclos y sus períodos, los momentos en los que estuvieron presentes. Para estudiar las relaciones entre las velocidades de viento en los diferentes sitios y forzantes climáticos de gran escala, se calcularon los coeficientes de correlación a nivel estacional entre las velocidades del viento derivadas de MERRA2 y diversos índices de oscilaciones climáticas. Los índices climáticos considerados fueron:

- Índice de Oscilación del Sur (SOI). Da cuenta de la componente atmosférica del fenómeno Niño/Niña.
- Índice Niño 3.4. Indica las anomalías de temperatura superficial del mar promediadas entre 5°N-5°S, 170°O-120°O
- Índice TSA (Tropical-South Atlantic). Indica las anomalías de temperatura superficial del mar promediadas entre 0°-20°S, 10°E-30°O
- Índice de la Oscilación Antártica (AAO). Da cuenta de variaciones en las anomalías de presión atmosférica entre latitudes medias y altas.
- Índice Blob, o "La Mancha del Pacífico". Indica las anomalías de temperatura superficial del mar promediadas entre 33°S-40°S, 152°O-162°O

Para este punto también se aplicó el análisis de coherencia wavelet (Phillips y Gorse, 2018). La coherencia wavelet puede ser explicada como un coeficiente de correlación entre dos series temporales, pero con la posibilidad de discriminar en que frecuencias o para que ciclos es mayor la correlación.

RESULTADOS

Descripción de variabilidad temporal

Los datos de velocidad del viento derivados de reanálisis muestran una alta correlación con los datos observacionales (ver figura 2 y tabla 1), lo cual valida la representación de la variabilidad de la velocidad del viento por parte del reanálisis, y permite extender el período de análisis con series homogéneas hasta el año 1980. En la tabla 2 se comparan los valores del viento P50 y promediado de las series observacionales, los promedios derivados de MERRA2 durante el periodo 1980-presente, y las diferencias porcentuales entre el viento derivado de MERRA2 durante este último periodo y durante el periodo de medición de cada parque. Se puede observar que, salvo para los casos de Pomona y Villalonga, las campañas de medición coincidieron con periodos de vientos promedio más elevados. Las diferencias porcentuales entre la velocidad del viento en el periodo 1980-presente y el periodo de medición (ambos MERRA2) alcanza el 5 % para el caso de Rawson. La figura 3 ilustra los ejemplos de Rawson y Pomona, donde las observaciones produjeron una sobreestimación y sub-estimación del recurso, respectivamente. Estas diferencias entre las estimaciones del recurso derivadas de las observaciones y las provenientes de un período más largo (posibilitado por los datos de reanálisis), pone en relieve la importancia de las variaciones de largo plazo.

Tabla 1: Coeficientes de correlación (r) y error cuadrático medio (ECM) entre series de velocidad observadas y derivadas de MERRA2

	Rawson	Trelew	Madryn	Villalonga	Pomona	Necochea
r	0.86	0.62	0.8	0.83	0.94	0.93
ECM	1.5	0.5	0.36	0.4	0.3	0.26

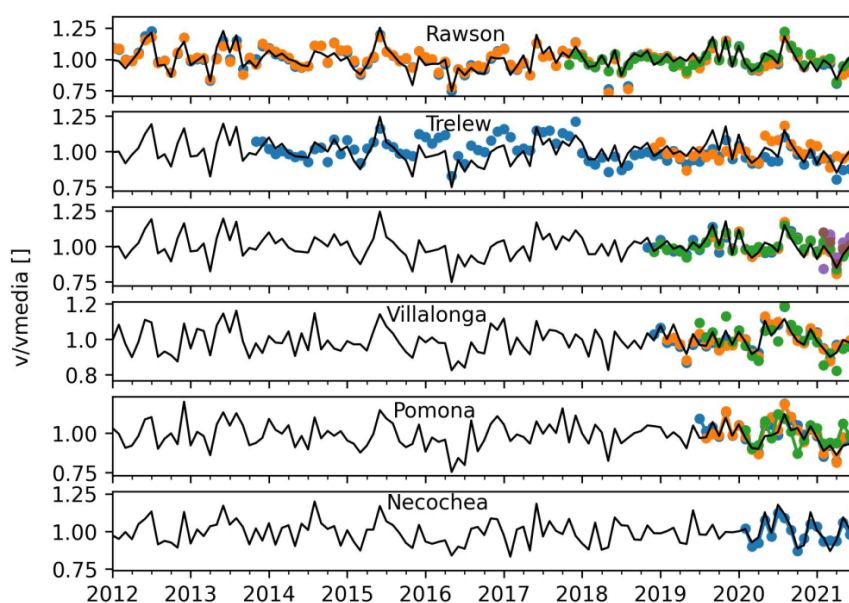


Figura 2: Series de velocidades de viento medidas (puntos) y derivadas del reanálisis MERRA2 (líneas negras)

Tabla 2: Cuadro 2: Viento P50 observacionales y derivados de MERRA2 durante el período 1980-presente

Parque	P50 obs.	P50 MERRA2 (p50obs/p50M 1980-2021	Período medición
Rawson	7.45	8.83	10/01/2008-07/01/2010
Trelew	9.05	8.92	11/01/2013-08/31/2015
Madryn	8.7	8.94	01/10/2008-09/01/2016
Villalonga	8.56	8.17	06/01/2012-05/01/2016

Pomona	7.5	7.92	-3.5 %	11/01/2014-05/01/2016
Necochea	8.52	8.16	+1.7 %	03/24/2012-08/15/2013

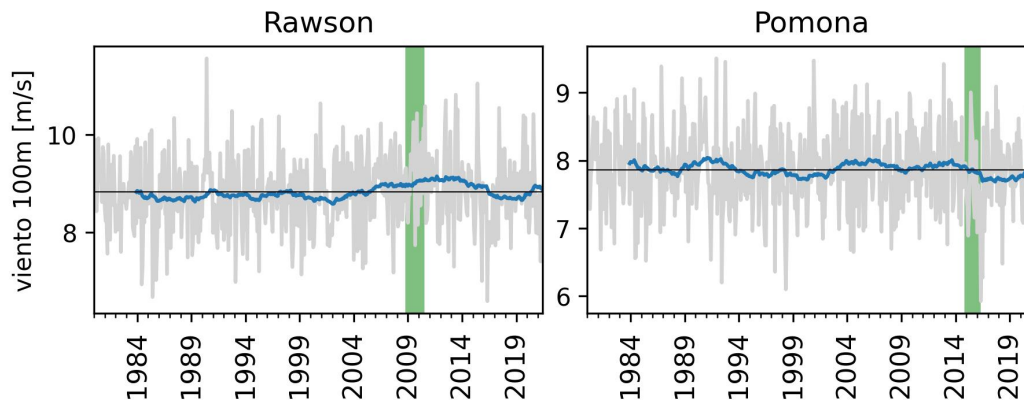


Figura 3: Promedios mensuales de viento a 100m derivados de MERRA2 (línea gris), promedios móviles de 5 años y período de medición de velocidad del viento (sombreado verde) para los sitios Rawson y Pomona. En Rawson, el valor medio calculado en el periodo de medición es 5.1 % mayor que la media total; mientras que en Pomona el valor medio calculado en este periodo es 3.5 % menor que la media total.

La figura 4 brinda una descripción de la variabilidad temporal del recurso eólico en diferentes escalas temporales: interanual, intra-anual y anual promedio. Se excluyen de este análisis los sitios de Rawson y P. Madryn ya que las series temporales son muy similares entre sí y a la serie de Trelew. Las series muestran una gran variabilidad intra e interanual. Además, se puede apreciar que el comportamiento del viento presenta, en promedio, ciclos anuales: Todos los sitios menos Pomona muestran una tendencia a vientos más débiles durante las estaciones de otoño y primavera, y vientos más fuertes en invierno y en verano. Pomona, en cambio, presenta velocidades de viento mínimas (-5 %) y máximas en el verano (+5 %). Estos ciclos anuales no se presentan con regularidad todos los años.

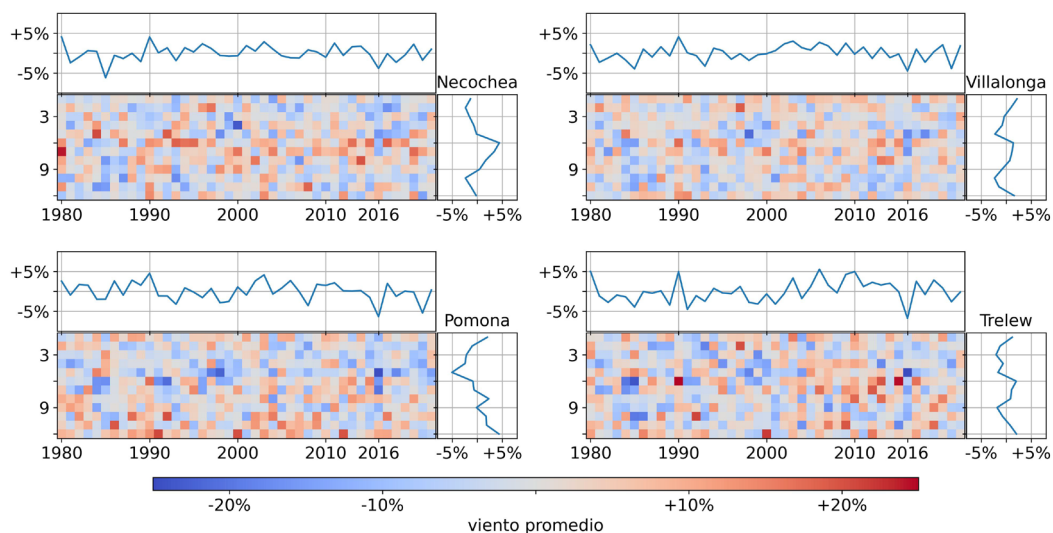


Figura 4: Variaciones de velocidad del viento mensuales (heatplot), promedios anuales (serie temporal en el panel superior de cada gráfico) y mensuales promedio (en el panel derecho de cada gráfico) durante el periodo 1980-2022 para los sitios Necochea, Villalonga, Pomona y Trelew.

En cuanto a las variaciones de más largo plazo, las rectas de regresión lineal y los resultados del test de Mann-Kendall se muestran en la figura 5. En los sitios de Patagonia (Trelew, Madryn y Rawson) se observa una tendencia positiva, aunque solo es significativa en el sitio Rawson. Los sitios Villalonga y Necochea muestran también una tendencia positiva, pero aún más leve. El sitio Pomona, por último, muestra una tendencia negativa. Ninguna de estas tendencias es estadísticamente significativa.

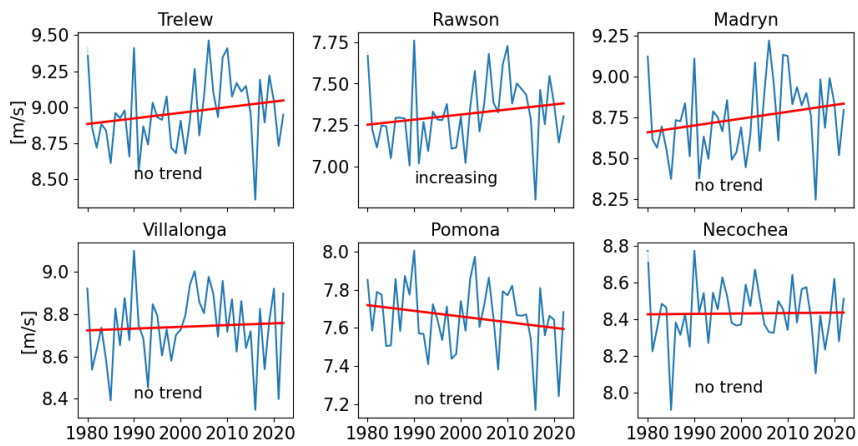


Figura 5. Recta de regresión lineal de la velocidad del viento en los diferentes sitios eólicos. En cada gráfico se indica el resultado del test de tendencia Mann-Kendall

El análisis de tendencias, sin embargo, no describe las variaciones que ocurren en escalas de tiempo más cortas que claramente se observan en las series del recurso. Los resultados del análisis de transformada Wavelet se muestran en la figura 6. Dada la similitud entre las series de velocidad del viento en los sitios Trelew, Rawson y Madryn, solo se muestran los resultados del análisis del sitio Trelew. La mayoría de los sitios muestran un comportamiento muy caótico. Es decir, no se observa la ocurrencia de ciclos significativos por periodos largos de tiempo. En la mayoría de los casos, los ciclos estadísticamente significativos corresponden a la alta frecuencia: son los que comprenden el rango de periodos que van desde los 2 meses hasta los 3 años aproximadamente; y su permanencia no se extiende en el tiempo. El ciclo anual se presenta en forma discontinua a lo largo del tiempo, y prevalece con mayor frecuencia en el sitio Pomona. El sitio más austral (Trelew) muestra la presencia de ciclos de entre 2 y 5 años de periodo a partir del año 2005 aproximadamente.

El comportamiento poco estacionario de las series de velocidad de viento que revela el análisis de wavelet impone un límite a la predictibilidad del recurso. El siguiente aspecto a explorar, es la incidencia de oscilaciones oceánicas-atmosféricas de gran escala. La figura 6 muestra las correlaciones a nivel estacional entre le velocidad del viento derivada de MERRA2 y los índices climáticos anteriormente descriptos.

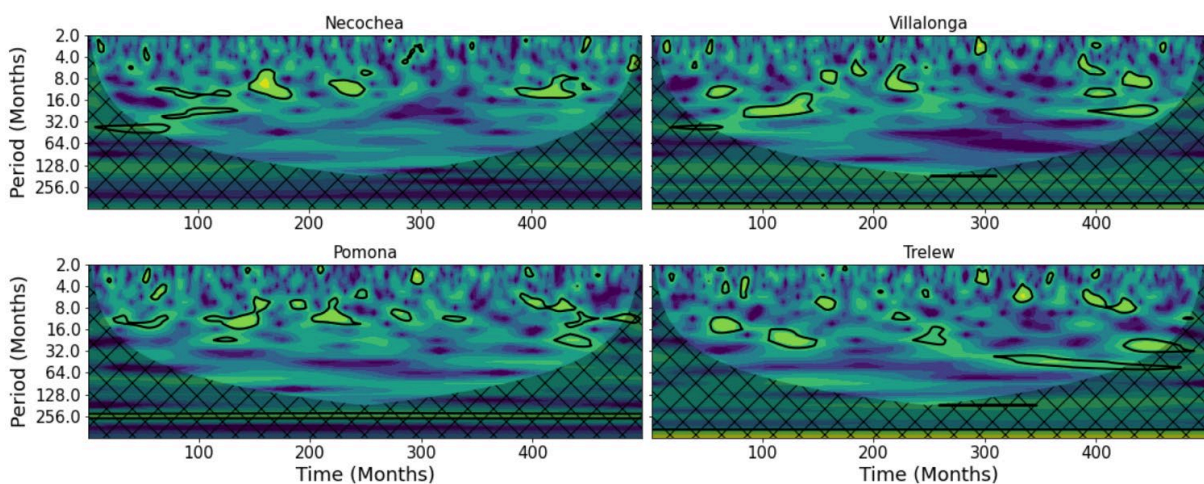


Figura 6: Espectro de potencia wavelet para los sitios Necochea, Villalonga, Pomona y Trelew: Las áreas señaladas con contornos de trazo grueso indican la presencia de ciclos con significancia estadística igual o superior al 95 %. El área sombreada indica el cono de influencia, donde los efectos de borde debido a la longitud de los ciclos dificultan la interpretación de los resultados.

Relación con forzantes de gran escala

En general, parte de la variabilidad climática que se observa a escala local, puede explicarse por la influencia de fenómenos climáticos de gran escala (por ejemplo, el fenómeno Niño/Oscilación del Sur) que actúan como forzantes. Esto aplica a la variable velocidad del viento. La figura 7 muestra los coeficientes de correlación a escala estacional entre la velocidad del viento y los forzantes climáticos SOI, TSA, Niño3.4, AAO y Blob. Se puede observar que el forzante AAO muestra la relación más robusta con las velocidades del viento de la región; se observan correlaciones negativas en las estaciones de verano, otoño y primavera. Se observa también una correlación positiva con el forzante Blob en los sitios eólicos de la Patagonia (Rawson, Trelew y Madryn), solo para la estación de primavera.

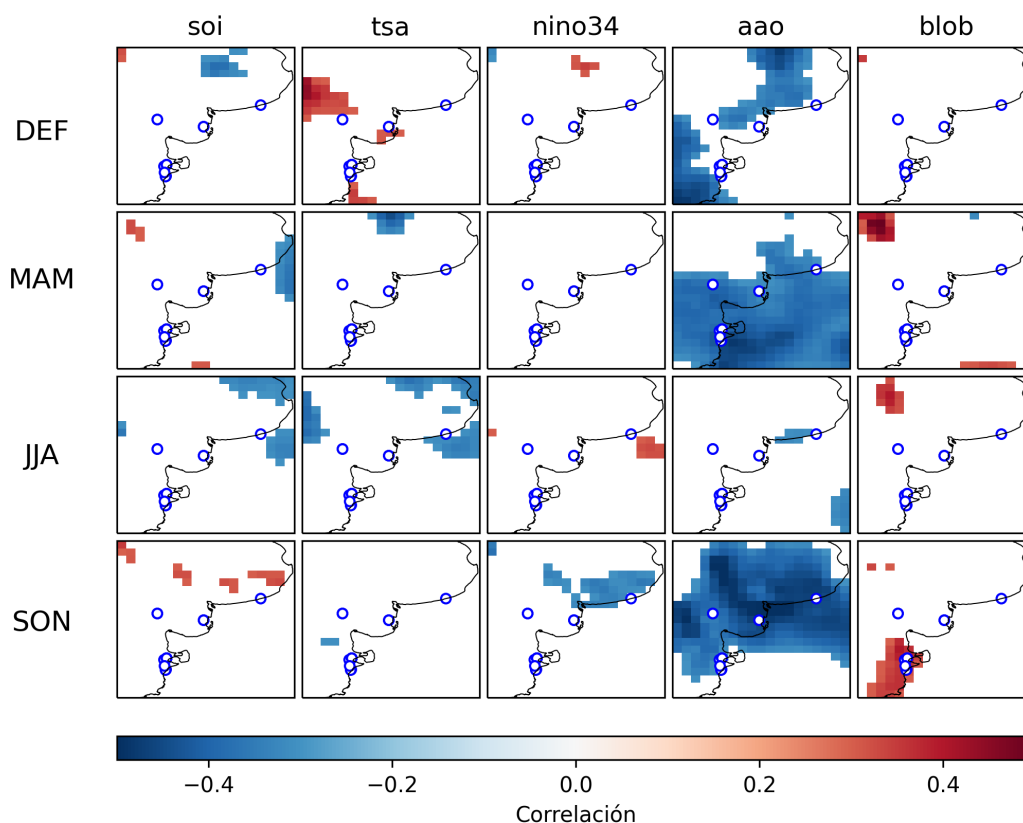


Figura 7: Coeficientes de correlación a nivel estacional entre la velocidad del viento derivada del reanálisis MERRA2 y los índices climáticos SOI, TSA, Niño3.4, AAO y Blob. Solo se muestran los valores estadísticamente significativos al 95% de nivel de confianza.

En análisis de las correlaciones no describe si estas relaciones entre la variable velocidad del viento son transientes, es decir, si cambian con el paso del tiempo; y tampoco discrimina en que frecuencias temporales ocurre esta correlación. El análisis de coherencia wavelet brinda una descripción más detallada de estas relaciones.

La figura 8 muestra los resultados del análisis de coherencia wavelet. El índice Blob muestra una coherencia muy persistente en el tiempo en las ventanas de períodos de entre 5 y 10 años, especialmente en los sitios Pomona y Villalonga. En estos sitios, muestra coherencia incluso en ciclos más largos, lo que indica que podría existir alguna relación con la tendencia de largo plazo. Para los períodos más cortos la señal se vuelve muy poco estacionaria y caótica, con alguna relación alrededor del ciclo anual. El índice de la AAO alrededor muestra correlaciones intermitentes en las ventanas de entre 1 año y medio / 2 años y aproximadamente 4 / 5 años para los sitios Pomona, Villalonga y Necochea (en este último sitio la señal es más débil). En estos sitios también se observa una señal en períodos más largos que no pueden ser capturados en este análisis dado la extensión de las series analizadas. Para el sitio Trelew se observan correlaciones, también intermitentes, en la ventana de entre 1 año y medio / 3 años.

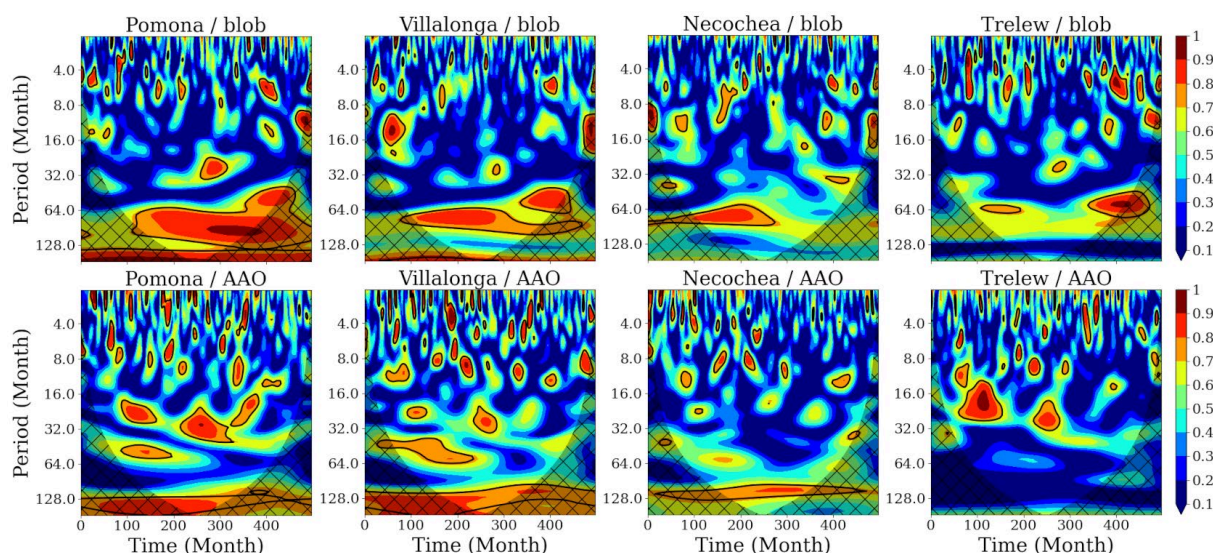


Figura 8: Coherencia wavelet entre los índices Blob y AAO y series de viento en los diferentes sitios. Las áreas señaladas con contornos de trazo grueso indican la presencia de ciclos donde la coherencia es estadísticamente significativa. El área sombreada indica el cono de influencia, donde los efectos de borde debido a la longitud de los ciclos dificultan la interpretación de los resultados.

Cabe destacar que las relaciones entre índices climáticos y las series de velocidad del viento ocurren en ciclos en que no son dominantes en el espectro de frecuencia de la velocidad del viento. El espectro de potencia wavelet revela que las series de velocidad del viento concentran su variabilidad en ciclos que van desde 1 año hasta tres años (aproximadamente), mientras que las relaciones con índices climáticos ocurren en períodos más largos. Esto relativiza la importancia de estos índices para explicar, o eventualmente pronosticar, la variabilidad del recurso.

CONCLUSIONES

El presente trabajo representa una primera aproximación en la implementación de técnicas espectrales basadas en wavelets para analizar el comportamiento temporal de la velocidad del viento y su relación con forzantes climáticos de gran escala en el centro de Argentina. Se aplicaron también técnicas convencionales para analizar variaciones de largo plazo y relaciones con oscilaciones climáticas. El análisis revela patrones de variabilidad temporal complejos, con rasgos caóticos, en los cuales la variabilidad parece concentrarse en ciclos no estacionarios comprendidos entre los 6 meses y los cuatro años. Esto incluye al ciclo anual. También existen tendencias de largo plazo, pero en la mayoría de los casos no son estadísticamente significativas. En cuanto a los forzantes climáticos de la variabilidad, se destaca el rol de las oscilaciones AAO y Blob. El análisis de coherencia wavelet, sin embargo, revela que la importancia de estas relaciones es relativa ya que se concentra en ciclos más largos que los que dominan la variabilidad de la velocidad del viento. La aplicación de estas técnicas espectrales posibilita un análisis más exhaustivo de la variabilidad del recurso eólico. Es necesario continuar estos tipos de análisis ampliando la región geográfica, incorporando diferentes resoluciones temporales, y realizando tratamientos espectrales (e.g. filtro de pasa bajo) para aislar bandas de frecuencias de interés.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó con fondos de los proyectos i) PICT-2018-04705 y ii) PI-JI UNRN 40-B-1080

REFERENCIAS

- Albadi, M. H., y El-Saadany, E. F. (2010). Overview of wind power intermittency impacts on power systems. *Electric power systems research*, 80(6), 627-632. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.10.035>
- Bett, P. E., Thornton, H. E., Troccoli, A., De Felice, M., Suckling, E., Dubus, L., ... y Brayshaw, D. J. (2022). A simplified seasonal forecasting strategy, applied to wind and solar power in Europe. *Climate services*, 27, 100318. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100318>
- Cosseron, A., Gunturu, U. B., y Schlosser, C. A. (2013). Characterization of the wind power resource in Europe and its intermittency. *Energy Procedia*, 40, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.008>
- Coulibaly, P., y Burn, D. H. (2004). Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows. *Water Resources Research*, 40(3). <https://doi.org/10.1029/2003WR002667>
- Deng, K., Azorin-Molina, C., Minola, L., Zhang, G., y Chen, D. (2021). Global near-surface wind speed changes over the last decades revealed by reanalyses and CMIP6 model simulations. *Journal of Climate*, 34(6), 2219-2234. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0310.1>
- Deng, K., Azorin-Molina, C., Yang, S., Hu, C., Zhang, G., Minola, L., y Chen, D. (2022). Changes of Southern Hemisphere westerlies in the future warming climate. *Atmospheric Research*, 270, 106040. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106040>
- Graff, M., Pena, R., Medina, A., y Escalante, H. J. (2014). Wind speed forecasting using a portfolio of forecasters. *Renewable Energy*, 68, 550-559. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.041>
- Grams, C. M., Beerli, R., Pfenninger, S., Staffell, I., y Wernli, H. (2017). Balancing Europe's wind-power output through spatial deployment informed by weather regimes. *Nature climate change*, 7(8), 557-562. <https://doi.org/10.1038/nclimate3338>
- Grinsted, A., Moore, J. C., y Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear processes in geophysics*, 11(5/6), 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- Gross, R., Heptonstall, P., Anderson, D., Green, T., Leach, M., y Skea, J. (2006). The Costs and Impacts of Intermittency: An assessment of the evidence on the costs and impacts of intermittent generation on the British electricity network.
- Guozden, T., Carbajal, J. P., Bianchi, E., y Solarte, A. (2020). Optimized balance between electricity load and wind-solar energy production. *Frontiers in Energy Research*, 8, 16. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00016>
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of hydrology*, 349(3-4), 350-363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>
- Hoste, G., Dvorak, M., y Jacobson, M. Z. (2009). Matching hourly and peak demand by combining different renewable energy sources. Sanford University, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Janicke, H., Bottinger, M., Mikolajewicz, U., y Scheuermann, G. (2009). Visual exploration of climate variability changes using wavelet analysis. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 15(6), 1375-1382. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.197>
- Lau, K. M., y Weng, H. (1995). Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. *Bulletin of the American meteorological society*, 76(12), 2391-2402. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076%3C2391:CSDUWT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076%3C2391:CSDUWT%3E2.0.CO;2)
- Lee, G., Gommers, R., Waselewski, F., Wohlfahrt, K., y O'Leary, A. (2019). PyWavelets: A Python package for wavelet analysis. *Journal of Open-Source Software*, 4(36), 1237. <https://doi.org/10.21105/joss.01237>
- Liu, Y., Zeng, Z., Xu, R., Ziegler, A. D., Jerez, S., Chen, D., ... y Yang, X. (2022). Increases in China's wind energy production from the recovery of wind speed since 2012. *Environmental Research Letters*, 17(11), 114035. DOI 10.1088/1748-9326/ac9cf4
- Lledó, L., Bellprat, O., Doblas-Reyes, F. J., y Soret, A. (2018). Investigating the effects of Pacific sea surface temperatures on the wind drought of 2015 over the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(10), 4837-4849. <https://doi.org/10.1029/2017JD028019>

- Malloy, J. W., Krahenbuhl, D. S., Bush, C. E., Balling Jr, R. C., Santoro, M. M., White, J. R., ... y Cervený, R. S. (2015). A surface wind extreme (“wind lulls” and “wind blows”) climatology for central North America and adjoining oceans (1979–2012). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(3), 643–657. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0009.1>
- McVicar, T. R., Van Niel, T. G., Li, L. T., Roderick, M. L., Rayner, D. P., Ricciardulli, L., y Donohue, R. J. (2008). Wind speed climatology and trends for Australia, 1975–2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output. *Geophysical Research Letters*, 35(20). <https://doi.org/10.1029/2008GL035627>
- McVicar, T.R., M.L. Roderick, R.J. Donohue, and T.G. Van Niel, 2012: Less bluster ahead? Ecohydrological implications of global trends of terrestrial near-surface wind speeds. *Ecohydrol.*, 5(4), 381–388. <https://doi.org/10.1002/eco.1298>
- Minola, L., Azorin-Molina, C., Guijarro, J. A., Zhang, G., Son, S. W., y Chen, D. (2021). Climatology of near-surface daily peak wind gusts across Scandinavia: observations and model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(7), e2020JD033534. <https://doi.org/10.1029/2020JD033534>
- Naizghi, M. S., y Ouarda, T. B. (2017). Teleconnections and analysis of long-term wind speed variability in the UAE. *International Journal of Climatology*, 37(1), 230–248. <https://doi.org/10.1002/joc.4700>
- Orlov, A., Sillmann, J., y Vigo, I. (2020). Better seasonal forecasts for the renewable energy industry. *Nature Energy*, 5(2), 108–110. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0561-5>
- Phillips, R. C., y Gorse, D. (2018). Cryptocurrency price drivers: Wavelet coherence analysis revisited. *PloS one*, 13(4), e0195200. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195200>
- Polanco-Martínez, J. M., Fernández-Macho, J., y Medina-Elizalde, M. (2020). Dynamic wavelet correlation analysis for multivariate climate time series. *Scientific Reports*, 10(1), 21277. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77767-8>
- Pryor, S. C., Barthelmie, R. J., Bukovsky, M. S., Leung, L. R., y Sakaguchi, K. (2020). Climate change impacts on wind power generation. *Nature Reviews Earth y Environment*, 1(12), 627–643. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0101-7>
- Ren21, R. (2020). *Global Status Report, 2020*.
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., ... y Woollen, J. (2011). MERRA: NASA’s modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of climate*, 24(14), 3624–3648.
- Roderick, M. L., L. D. Rotstain, G. D. Farquhar, and M. T. Hobbins, 2007: On the attribution of changing pan evaporation. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L17403. <https://doi.org/10.1029/2007GL031166>
- Soberanis, M. E., y Mérida, W. (2015). Regarding the influence of the Van der Hoven spectrum on wind energy applications in the meteorological mesoscale and microscale. *Renewable Energy*, 81, 286–292. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.048>
- Staffell, I., y Green, R. (2014). How does wind farm performance decline with age?. *Renewable energy*, 66, 775–786. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.041>
- Staffell, I., y Pfenninger, S. (2016). Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. *Energy*, 114, 1224–1239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068>
- Torrallba, V., Doblas-Reyes, F. J., MacLeod, D., Christel, I., y Davis, M. (2017). Seasonal climate prediction: a new source of information for the management of wind energy resources. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(5), 1231–1247. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0204.1>
- Utrabo-Carazo, E., Azorin-Molina, C., Serrano, E., Aguilar, E., Brunet, M., y Guijarro, J. A. (2022). Wind stilling ceased in the Iberian Peninsula since the 2000s. *Atmospheric Research*, 272, 106153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106153>
- Utrabo-Carazo, E., Azorin-Molina, C., Aguilar, E., y Brunet, M. (2023). A Spectral Analysis of Near-Surface Mean Wind Speed and Gusts Over the Iberian Peninsula. *Geophysical Research Letters*, 50(8), e2023GL103323. <https://doi.org/10.1029/2023GL103323>
- Watson, S. (2019). Quantifying the variability of wind energy. *Advances in Energy Systems: The Large-scale Renewable Energy Integration Challenge*, 355–368. <https://doi.org/10.1002/9781119508311.ch21>

- Wohland, J., Folini, D., y Pickering, B. (2021). Wind speed stilling and its recovery due to internal climate variability. *Earth System Dynamics*, 12(4), 1239-1251. <https://doi.org/10.5194/esd-12-1239-2021>
- World Wind Energy Association. (2015). New record in worldwide wind installations. *WWEA Bull*, (1), 4-5.
- Zeng, Z., Ziegler, A. D., Searchinger, T., Yang, L., Chen, A., Ju, K., ... y Wood, E. F. (2019). A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nature Climate Change*, 9(12), 979-985. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>
- Zha, J., Shen, C., Li, Z., Wu, J., Zhao, D., Fan, W., ... y Deng, K. (2021). Projected changes in global terrestrial near-surface wind speed in 1.5° C–4.0° C global warming levels. *Environmental Research Letters*, 16(11), 114016. DOI 10.1088/1748-9326/ac2fdd

ANALYSIS OF WIND SPEED VARIABILITY IN CENTRAL ARGENTINA USING WAVELETS

ABSTRACT: This study analyses wind speed variations and explores sources of predictability for different sites in central Argentina over the 1980-2022 period. For these purposes, spectral, trend and correlation analysis tools were implemented to reanalysis-derived data. Wind speed time series show a non-stationary behaviour. That means a lack of significant and persistent cycles throughout the length of the timeseries. Wind speed timeseries exhibit long-term trends, but non-significant in most of the cases. The Antarctic Oscillation and Blob climatic oscillations stand out as potential predictors of wind speeds. The Antarctic Oscillation shows negative correlations with wind speeds mainly during summer, fall, and spring; while Blob shows positive correlations during spring for the southernmost sites. Wavelet coherency analysis, however, show that relationships between wind speeds and these climate indices occur in spectral bands that do not dominate the power spectrum of wind speeds: wavelet power spectrum shows that the variability of wind speed timeseries is concentrated in cycles spanning from one to three years (approximately), while relationships with climate indices occur over longer cycles (> 4 years).

Keywords: wind speed, climate variations, wavelets.