

Análisis de ciclos e indicadores del recurso eólico para parques GENNEIA

Emilio Bianchi y Tomás Guozden

1. Resumen ejecutivo

En el presente informe:

- Se incorporaron dos sitios de interés adicionales al análisis
- Se estudió la variabilidad a largo plazo (ciclos largos, tendencias) de la velocidad del viento aplicando diferentes metodologías
- Se actualizó el análisis de los pronósticos del Centro Europeo para el Pronóstico Meteorológico de Mediano Plazo. Se extrapolaron los valores pronosticados a 100 metros de altura y se calculó el valor P70

El análisis de series temporales con la metodología wavelet muestra que las series de velocidad del viento tienen un comportamiento, en general, volátil. Esto quiere decir que la mayor variabilidad se concentra en ciclos cortos, y que además no son estables en el tiempo. Se observó que los forzantes que ejercen un control más evidente sobre la velocidad a largo plazo (ciclos mayores a 2 años) son blob y la aao. Ambos índices influyen en la velocidad del viento en ciclos cortos (menores a 3 años), pero estas relaciones tampoco son estables en el tiempo. En ciclos más largos, el índice blob muestra una relación más estable en el tiempo con correlaciones positivas. Esta oscilación afecta principalmente a los sitios Trelew, Madryn, Rawson, Villalonga, Pomona y Patagonia sur. El índice aao ejerce mayor control en los sitios Villalonga, Pomona y Necochea, con correlaciones negativas. A grandes rasgos los pronósticos muestran un diciembre irregular: los modelos son neutros a negativos para Pomona y Villalonga, y neutros a positivos en las zonas de Necochea y Chubut. Para los primeros 5 meses del 2022 los modelos de pronóstico muestran resultados neutros para Pomona y Chubut, y positivos para Necochea principalmente, y en menor medida para Villalonga.

2. Metodología

2.1. Sitios Achiras y Patagonia sur

Se sumaron dos sitios de interés al estudio. Uno denominado Achiras (lat. 33.22°S lon. 65°O) y Patagonia sur (lat. 45.66°S lon. 67.5°O). La ubicación de estos sitios se muestra en la figura 1. Se extrajeron los valores de velocidad de viento del reanálisis MERRA2 y se extrapolaron dichos valores a la altura de 100 metros de la forma descrita en el informe anterior. Se analizó la

variabilidad anual e interanual de la velocidad del viento. Además, con el objetivo de comparar la variabilidad del recurso eólico en los diferentes sitios, se calcularon tablas de correlación anual y estacional entre todos los sitios eólicos.



Figura 1: Ubicación de los puntos de grilla de MERRA2 Achiras y Patagonia sur

2.2. Análisis de ciclos y tendencias

En esta sección se analizaron las tendencias de velocidad del viento en todos los sitios y se analizó la presencia de ciclos en diferentes frecuencias temporales. También se analizaron relaciones entre la velocidad del viento en los diferentes sitios con forzantes climáticos de gran escala. Para este último análisis, a diferencia del realizado en el reporte anterior, se hizo foco en las relaciones de largo plazo (o baja frecuencia). Para analizar la presencia y significancia de tendencias en las series de velocidad del viento se aplicó el test de Mann-Kendall [1]. Para analizar la ocurrencia y significancia de ciclos en la velocidad del viento, se aplicó el análisis de la transformada wavelet. Este método permite visualizar la presencia de ciclos en series temporales que no son estacionarias [2]. 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 a largo plazo entre las velocidades de viento en los diferentes sitios y los índices climáticos, se aplicó un promedio móvil de 24 meses no centrado a ambas series y se calcularon los coeficientes de correlación con desfases temporales de hasta 12 meses. Al realizar el promedio móvil de 24 meses, se desecha la variabilidad de corto plazo, con lo que las correlaciones informarán sobre las relaciones de largo plazo.

Para este punto también se aplicó el análisis de coherencia wavelet [3]. 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. Por ejemplo, puede ocurrir que dos series temporales muestren variaciones similares en ciclos largos, pero no en ciclos cortos. El paso siguiente al análisis de coherencia wavelet es aislar las ventanas de ciclos que muestran mayores correlaciones aplicando filtros pasabanda y analizar la relación entre las series de índices climáticos y de velocidades del viento.

2.3. Pronósticos actualizados

Se actualizó el análisis de las salidas de los modelos de pronóstico estacional del [Copernicus Climate Change Service](#). Los modelos analizados fueron el ECMWF, el UK Met Office, y el NCEP. Se implementó un criterio para discriminar los resultados significativos en los pronósticos. Se consideraron las anomalías promedio mayores a alguna fracción de la dispersión entre corridas. Luego, utilizando la relación entre valores medios históricos de velocidad del viento a 10 y 100 metros de altura del reanálisis MERRA2, se extrapolaron los valores pronosticados a 100 metros de altura. Por último, usando la dispersión de las corridas de los modelos, y teniendo en cuenta el factor de corrección que lleva el viento de 10 a 100 metros, se calculó el valor de velocidad media de viento a 100 metros y el valor P70.

3. Sitios Achiras y Patagonia sur

La figura 2 muestra las series de velocidad del viento a 100 metros de altura obtenidas del reanálisis MERRA2 para los sitios denominados Achiras y Patagonia sur. La velocidad media de en Achiras es 6.5 m/s, la menor de todos los parques analizados, y en Patagonia Sur (donde actualmente está manantiales Behr) la velocidad media es de 10.3 m/s, el mayor de todos los sitios. Se puede observar que el sitio Achiras muestra una menor variabilidad interanual y un ciclo anual más marcado y estable que el sitio Patagonia sur.

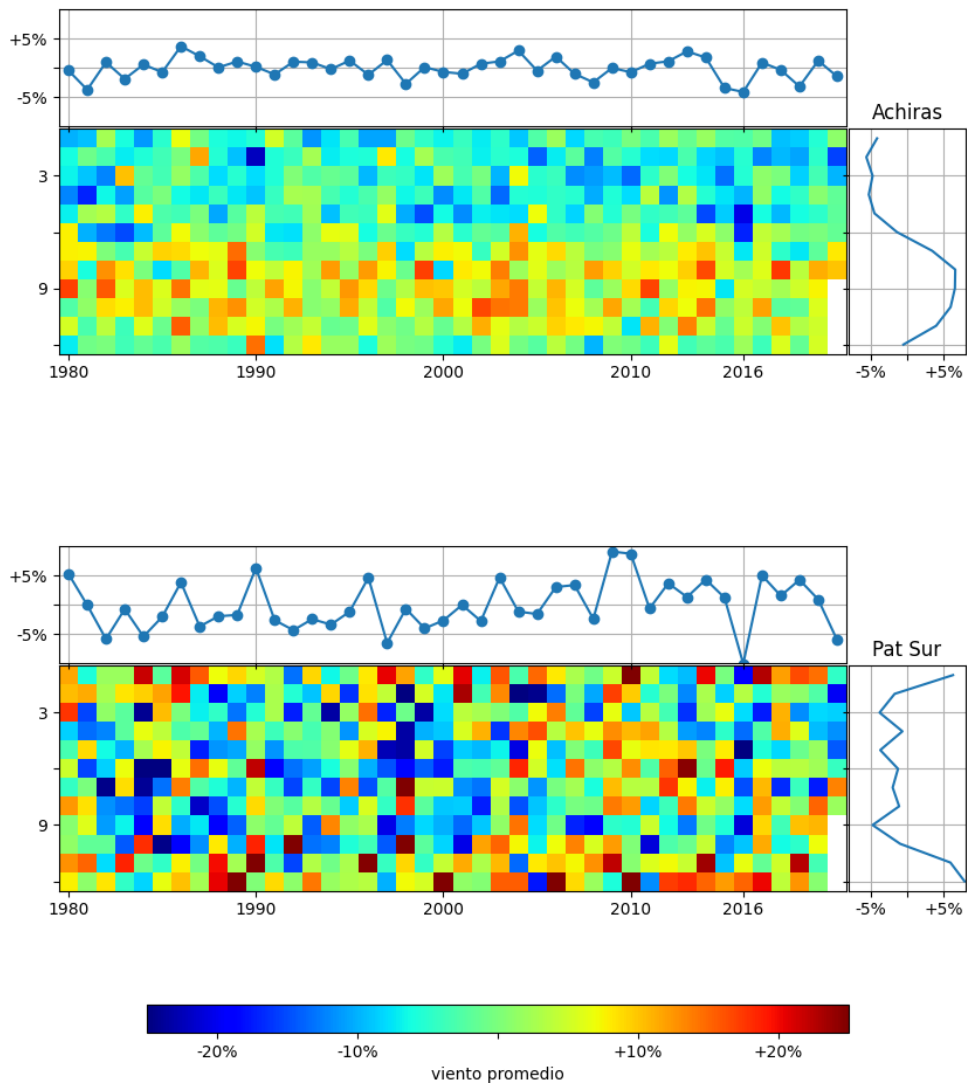


Figura 2: Variaciones de velocidad del viento mensuales, promedios anuales y mensuales promedio durante el período 1980-2021. La velocidad media de en Achiras es 6.5 m/s y en Patagonia Sur es 10.3 m/s, (a 100 metros sobre la superficie)

La figura 3 muestra las correlaciones entre los diferentes sitios a nivel anual y para las diferentes estaciones del año. En líneas generales, se puede observar que los sitios que muestran un comportamiento mas diferenciado son Achiras y Patagonia sur. El comportamiento de Achiras se encuentra mas "desacoplado" del resto de los sitios durante el verano (incluso se observan correlaciones negativas con los sitios Rawson, Trelew y Madryn) y el invierno. Para el otoño, los sitios Rawson, Trelew, Madryn, Patagonia sur, Pomona y Villalonga se encuentran mas acoplados que en las estaciones restantes.

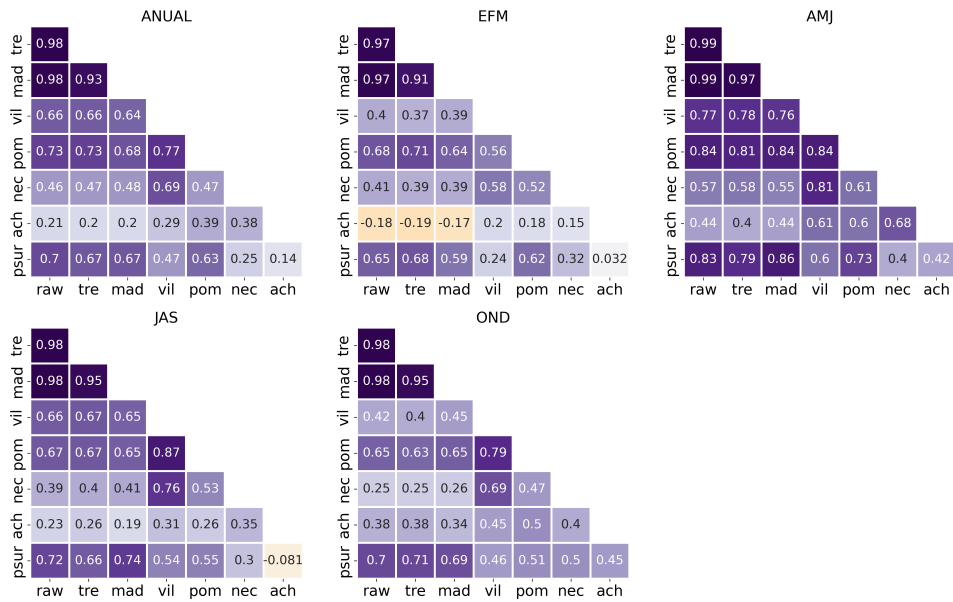


Figura 3: Cuadros de correlaciones anual y estacionales entre sitios eólicos

3.1. Análisis de ciclos y tendencias

Los resultados del análisis de transformada Wavelet se muestran en las figuras 4 y 5. 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 poco estacionario. Es decir, es rara la ocurrencia de ciclos por períodos 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 períodos 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 es mas importante en los sitios Pomona, Patagonia sur y Achiras. Este último sitio muestra un comportamiento excepcional ya que el ciclo anual se encuentra presente durante casi la totalidad del período 1980-presente. Los sitios más australes (Trelew y Patagonia sur) muestran la presencia de ciclos de entre 2 y 5 años de período a partir del año 2005 aproximadamente.

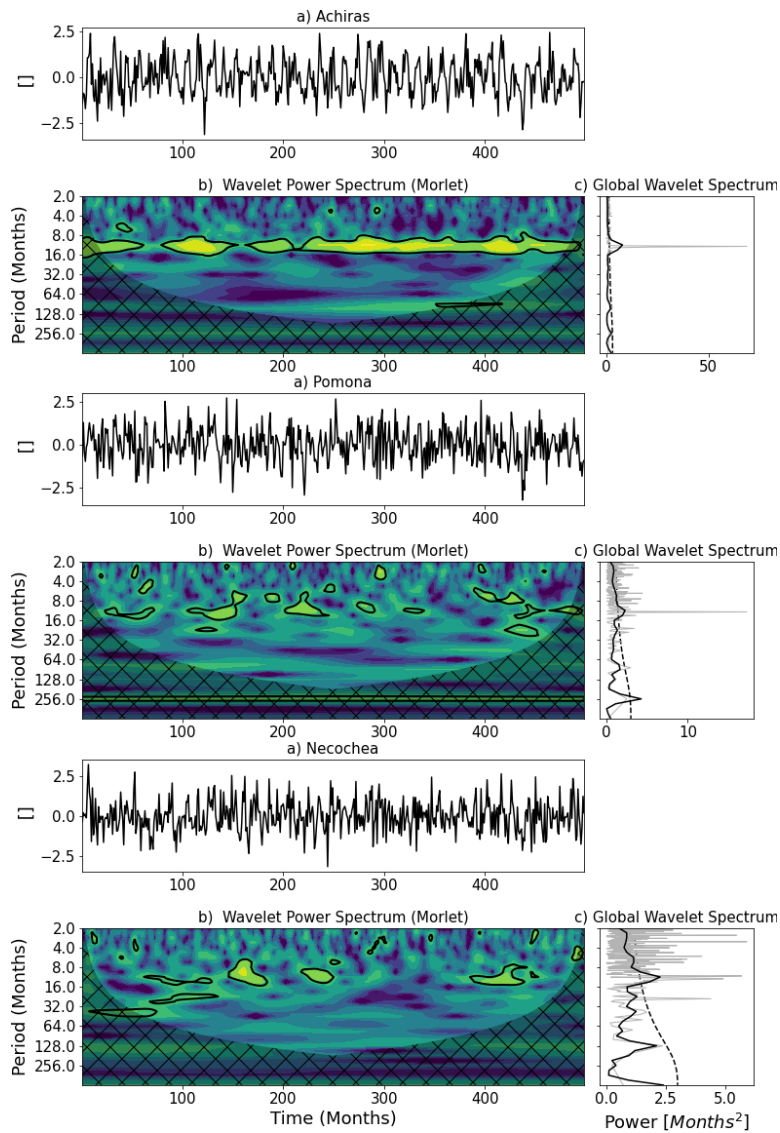


Figura 4: Resultado del análisis de wavelets para los sitios Achiras, Pomona y Necochea: a) serie temporal del desvío estandarizado de velocidad del viento. b) espectro de potencia wavelet. Las áreas señaladas con contornos de trazo grueso indican la presencia de ciclos con significancia estadística 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. c) Espectro de potencias global. De similar interpretación a un espectro de potencias de un análisis de transformada de Fourier para series estacionarias. La línea discontinua marca el límite de significancia estadística

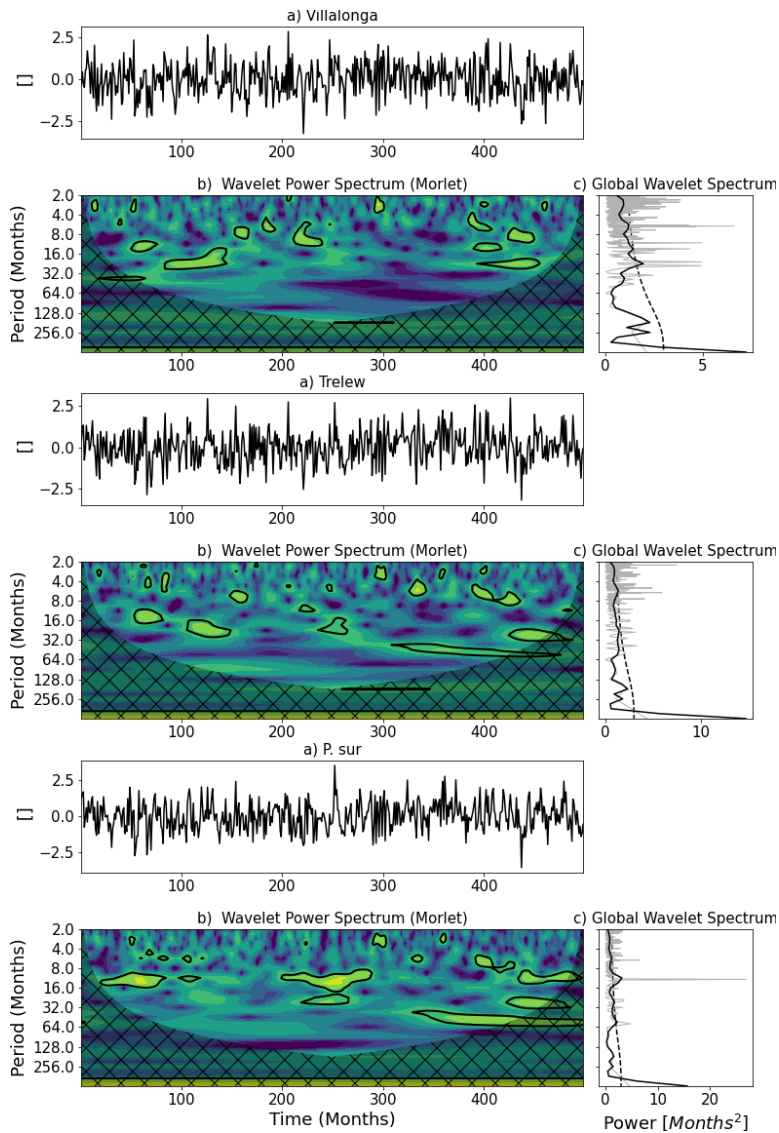


Figura 5: Idem para los sitios Villalonga, Trelew y Patagonia sur

A pesar de la imposibilidad de identificar la presencia y persistencia de ciclos regulares de largo plazo (con períodos mayores a 5 años por ejemplo) en el análisis anterior, se intentó asociar la variabilidad de largo plazo a oscilaciones climáticas de gran escala como las presentadas en el informe anterior. Las relaciones más importantes encontradas fueron con el índice blob (al cual se le removió la tendencia) y el índice aao. Las correlaciones se muestran en las figuras 6 y 7. En el caso del índice blob se obtuvieron correlaciones positivas de entre 0.35 y 0.4 con las series de velocidad del viento de los diferentes sitios sin desfase temporal (los paneles superiores muestran a series de velocidad del viento y el índice blob sin desfase). estas

correlaciones por lo general disminuyen al desfazar las series temporales. El valor de la correlación es excepcional en el caso de Pomona, alcanzando valores cercanos a 0.6 para un desfase de entre 3 y 5 meses.

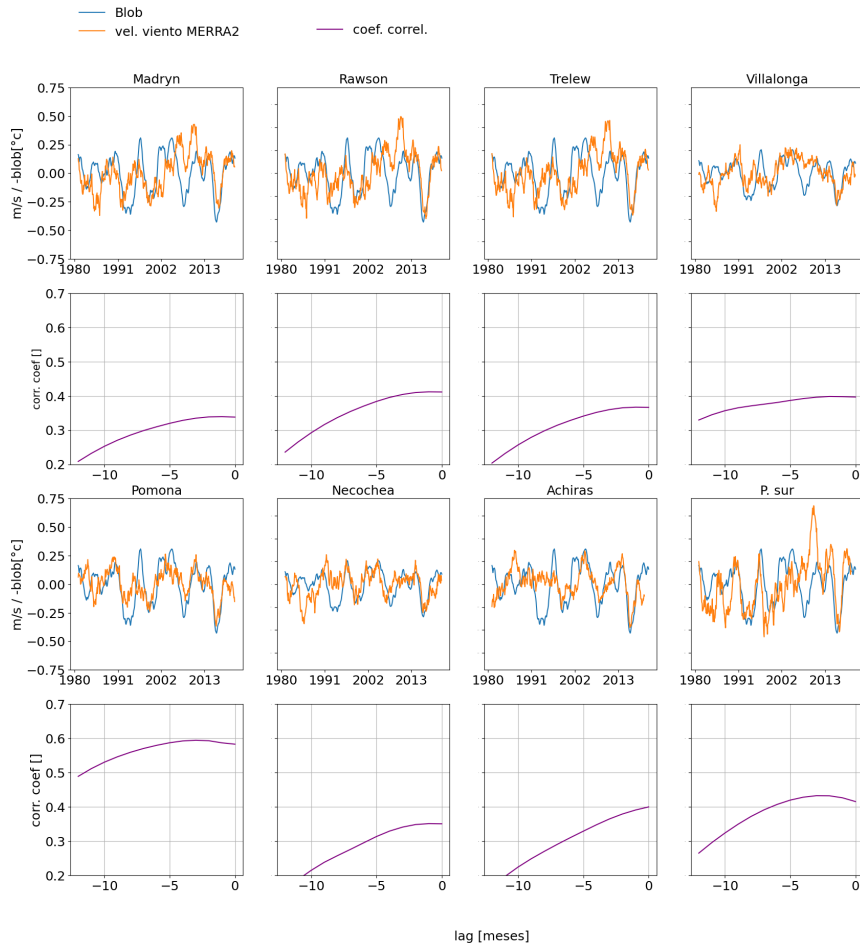


Figura 6: Series de promedios móviles de 24 meses de velocidad del viento (líneas naranjas), índice 'blob' (líneas azules) y correlación entre ambas series en función del desfase temporal ('lag', líneas violetas)

En el caso del índice aao, las correlaciones obtenidas fueron negativas y muestran diferentes patrones: los sitios Madryn, Rawson y Trelew muestran valores de correlación entre -0.3 y -0.35 y que decrecen (en valor absoluto) con los desfases temporales. Villalonga muestra la mayor correlación (-0.49), la cual aumenta ligeramente hasta desfases mayores a 5 meses. Pomona muestra una correlación cercana a -0.3 que aumenta también con los desfases temporales hasta sobrepasar el valor -0.4 para desfases mayores a 10 meses. Necochea muestra una correlación cercana a -0.45 que decrece con los desfases. Achiras muestra una correlación cercana a -0.3

que también decrece con los desfases, y Patagonia sur muestra la menor correlación entre todos los sitios (cerca de -0.25), la cual crece ligeramente con los desfases temporales.

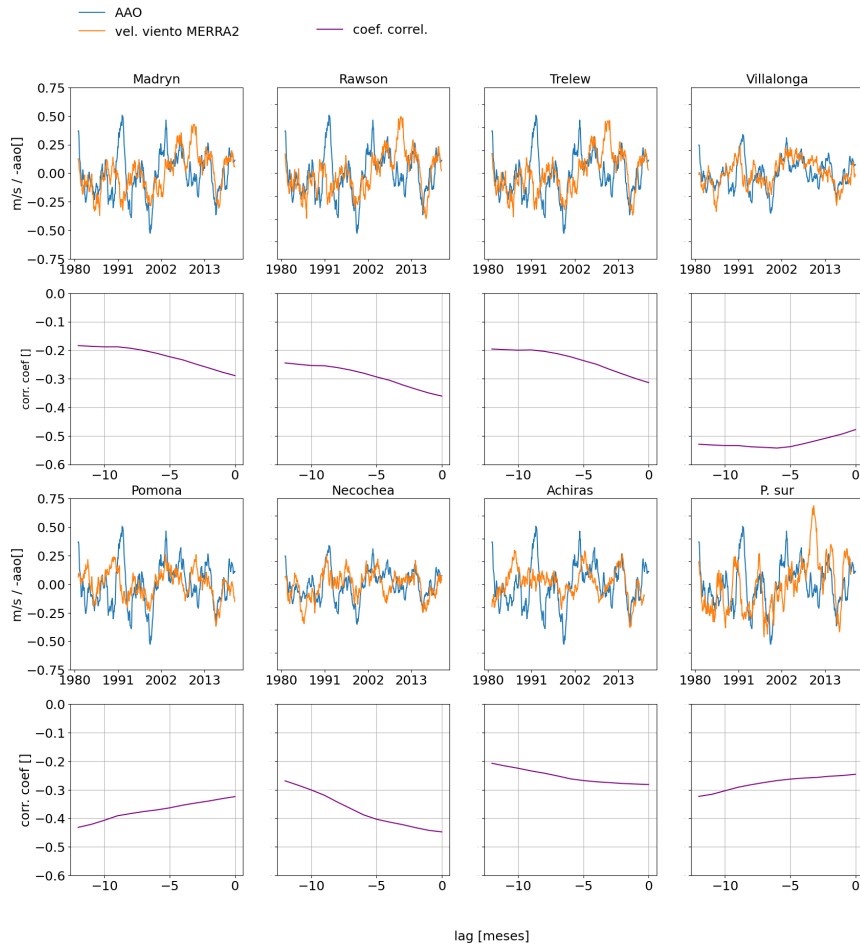


Figura 7: Series de promedios móviles de 24 meses de velocidad del viento (líneas naranjas), índice 'aao' (líneas azules) y correlación entre ambas series en función del desfase temporal ('lag', líneas violetas)

La figura 8 muestra los resultados del análisis de coherencia wavelet. El índice blob muestra la señal mas clara, con valores altos de coherencia (mayores a 0.6), y persistentes a lo largo de la longitud de las series, para los ciclos de períodos comprendidos entre aproximadamente 32 y 128 meses para los sitios Pomona, Villalonga, Trelew, Patagonia sur y, en menor medida Necochea. En el caso del índice AAO, los valores altos y persistentes de coherencia se observan para ciclos de período igual o mayores a 128 meses para los sitios Pomona, Necochea y Villalonga.

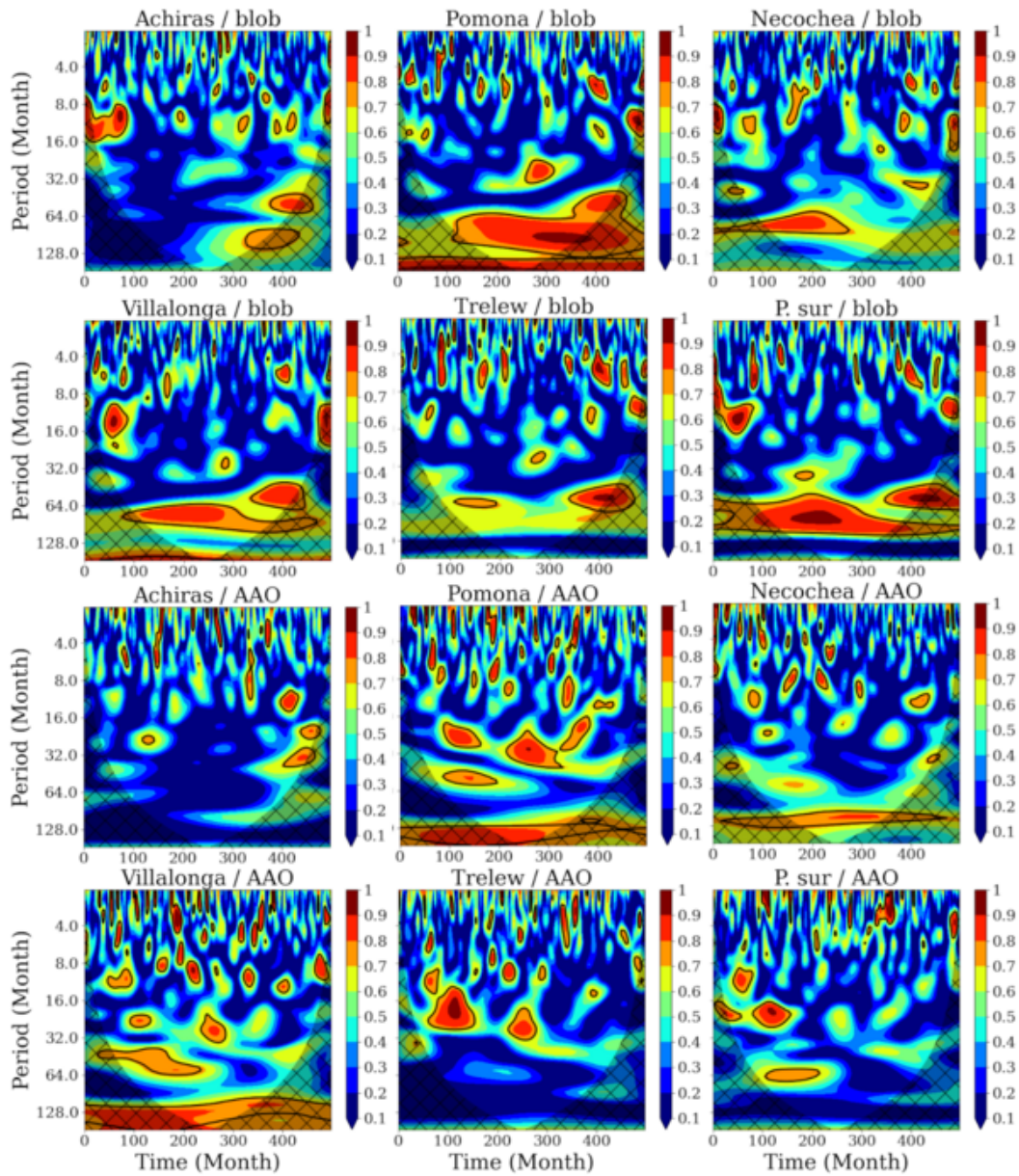


Figura 8: Coherencia wavelet entre los índices blob y AAO y series de viento en los diferentes sitios

El análisis de coherencia wavelet permitió identificar para qué rangos de ciclos las correlaciones entre los índices climáticos y las series de viento son mayores. Para aislar estas ventanas de variabilidad se aplicaron diferentes filtros pasabandas para observar la correlación entre los índices blob y aao, con las series de velocidad del viento. A modo de ejemplo, la figura 9 muestra

la serie de velocidad del viento en Patagonia sur junto con la señal filtrada, dejando sólo los ciclos de períodos de entre 40 y 128 meses. En el caso del índice blob (Figura 10), las mayores correlaciones se observaron conservando sólo los ciclos con períodos comprendidos entre 40 y 128 meses, alcanzando valores en torno a 0.5 o incluso mayores en algunos casos.

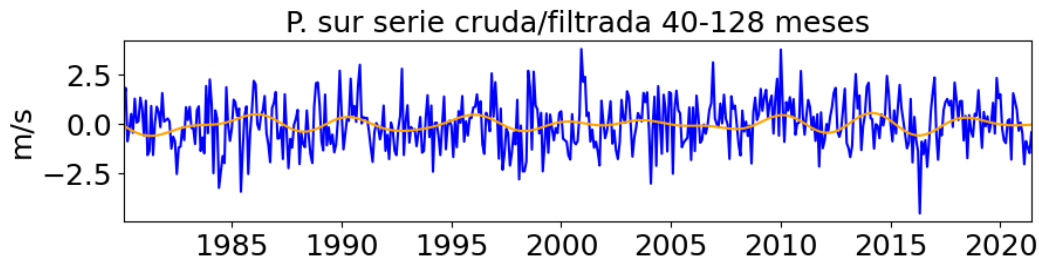


Figura 9: Series cruda (azul) y filtrada (naranja) de velocidad del viento en Patagonia sur

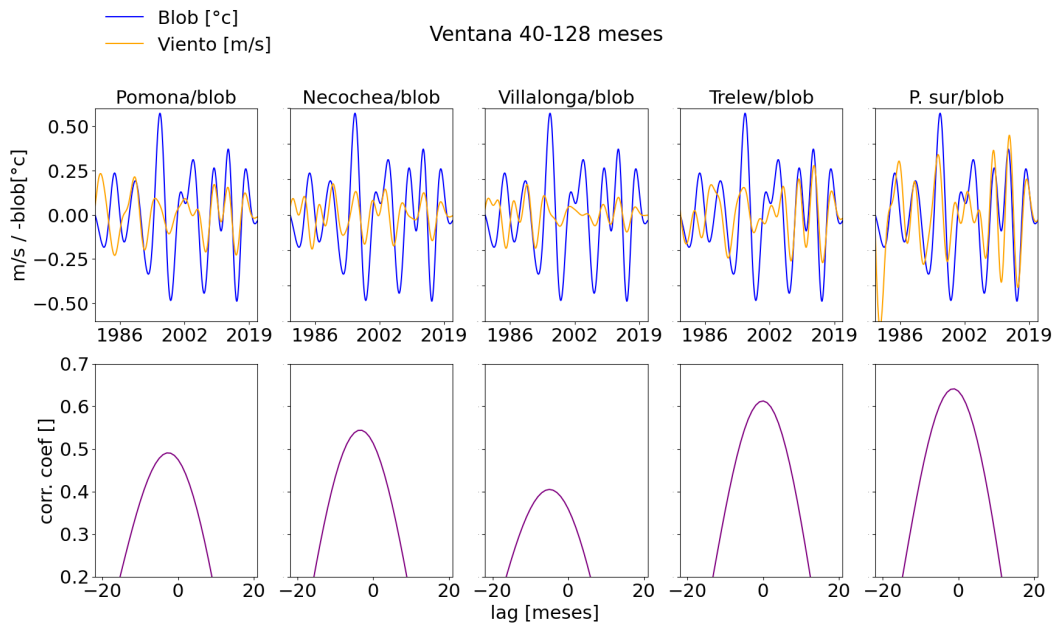


Figura 10: Series a las que se aplicó un filtro pasa banda preservando sólo los ciclos con períodos comprendidos entre 40 y 128 meses de velocidad del viento (líneas naranjas), índice 'blob' (líneas azules) y correlación entre ambas series en función del desfase temporal (líneas violetas)

En el caso del índice aao, la correlación con la velocidad del viento en los sitios Pomona, Necochea y Villalonga se observa para los ciclos con períodos de entre 90 y 160 meses, y no es estable a lo largo del período 1980-presente.

4. Pronósticos a largo plazo

A continuación se presentan los resultados de los pronósticos extendidos que se encuentran en [Copernicus Climate Change Service](#). En la figura 11 se observan los pronósticos a seis meses corridos en noviembre 2021 (en azul), a los que agrega: 1) la dispersión entre corridas, y 2) la comparación con los pronósticos de septiembre 2021 (en rojo) (ver informe anterior). El pronóstico para cada mes se obtiene del promedio de varias corridas, que se denominan *ensamble*. La cantidad de corridas que se hacen cambia según el modelo: 51 corridas en el modelo ECMWF, 124 el NCEP, 51 Meteo y 62 el de UK MetOffice.

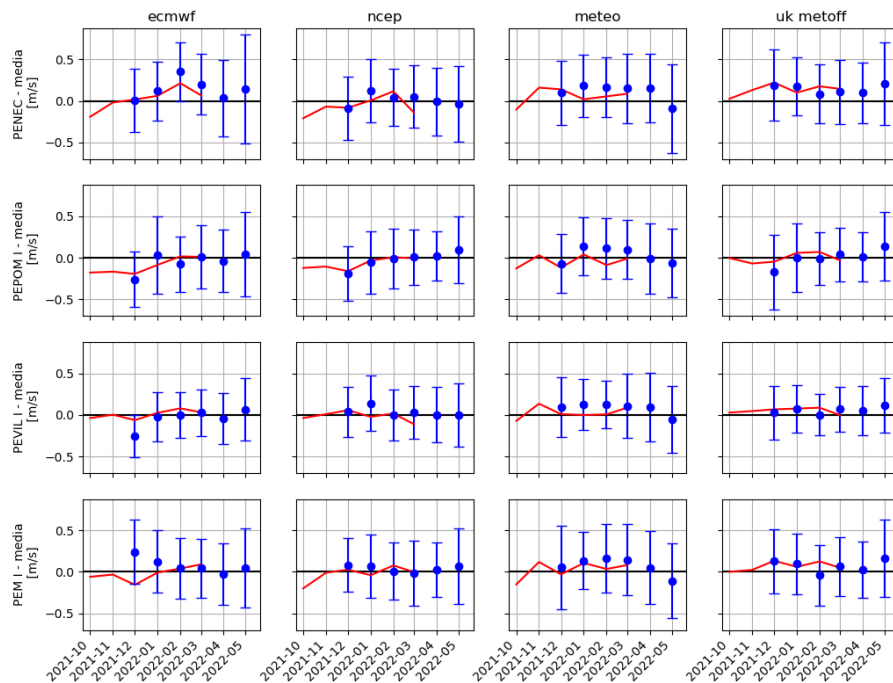


Figura 11: Pronósticos a seis meses corridos en noviembre 2021 (en azul). Las barras indican la dispersión en los valores de velocidad. Las líneas rojas indican los pronósticos de septiembre 2021

Para ejemplificar mejor los resultados de cada pronóstico, se muestran en la figura 12 histogramas de velocidades de los ensambles para dos casos puntuales: un pronóstico favorable para Necochea en el mes de febrero de ECMWF (51 corridas) y uno desfavorable para Pomona en diciembre, de NCEP (124 corridas).

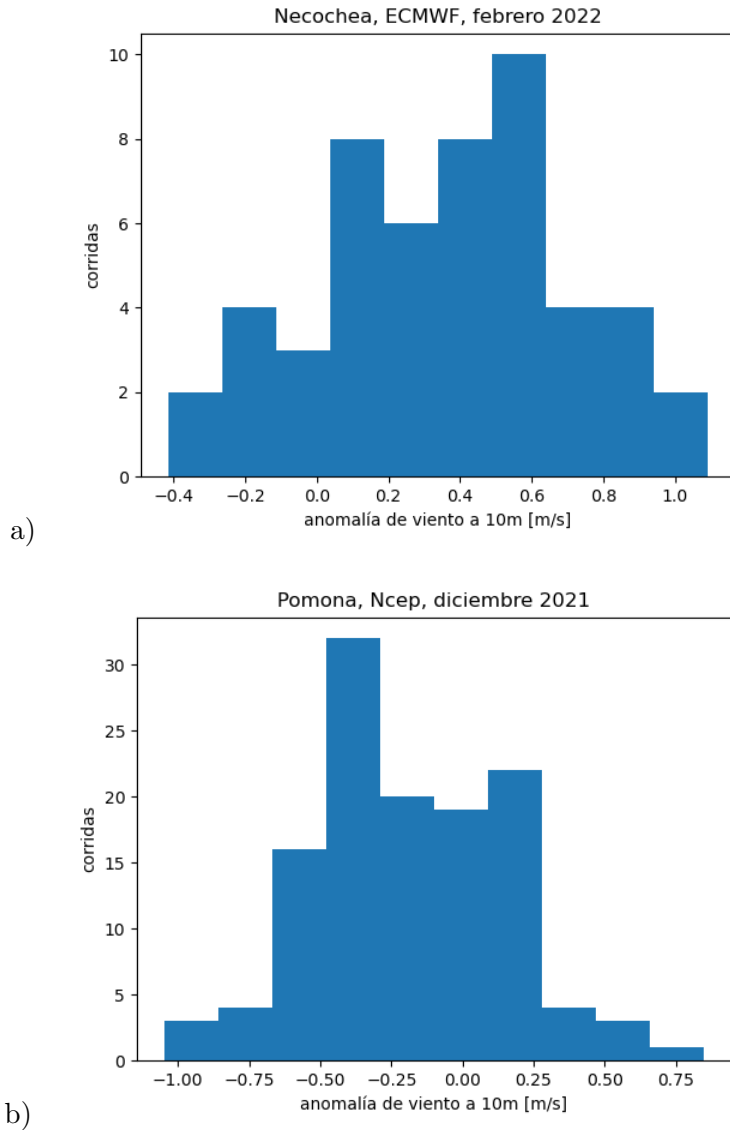


Figura 12: Distribución de las anomalías en la velocidad para dos pronósticos: a) resultados para Necochea de acuerdo al modelo ECMWF (51 corridas) para febrero 2022. b) resultados para Pomona de acuerdo al modelo NCEP (124 corridas) para diciembre del 2021

La significancia de los pronósticos se analiza en el cuadro 1, donde se muestra la relación promedio/dispersión. Resaltamos aquellos valores donde esta relación es mayor a 40 %.

A grandes rasgos los pronósticos muestran un diciembre irregular: los modelos son neutros a negativos para Pomona y Villalonga, y neutros a positivos en las zonas de Necochea y Chubut.

Para los primeros 5 meses del 2022 los modelos muestran resultados neutros para Pomona y Chubut, y positivos para Necochea principalmente, y en menor medida para Villalonga.

Cuadro 1: Anomalías relativas a la dispersión en cada modelo (promedio/dispersión). Se resaltan aquellos valores mayores a 40%, en azul los positivos y en rojo los negativos.

modelo	dic	ene	feb	mar	abr	may
PENEC						
ecmwf	0.0	0.3	1.0	0.6	0.1	0.2
ncep	-0.2	0.3	0.1	0.1	-0.0	-0.1
meteo	0.2	0.5	0.5	0.4	0.4	-0.2
uk metoff	0.4	0.5	0.2	0.3	0.3	0.4
modelo	dic	ene	feb	mar	abr	may
PEPOM I						
ecmwf	-0.8	0.1	-0.2	0.0	-0.1	0.1
ncep	-0.6	-0.1	-0.0	0.0	0.1	0.2
meteo	-0.2	0.4	0.3	0.3	-0.0	-0.2
uk metoff	-0.4	0.0	-0.0	0.1	0.0	0.3
modelo	dic	ene	feb	mar	abr	may
PEVIL I						
ecmwf	-1.0	-0.1	-0.0	0.1	-0.1	0.2
ncep	0.1	0.4	-0.0	0.1	0.0	-0.0
meteo	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2	-0.1
uk metoff	0.1	0.2	0.0	0.3	0.2	0.3
modelo	dic	ene	feb	mar	abr	may
PEM I						
ecmwf	0.6	0.3	0.1	0.1	-0.1	0.1
ncep	0.3	0.2	0.0	-0.0	0.1	0.1
meteo	0.1	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
uk metoff	0.3	0.3	-0.1	0.2	0.1	0.3

La tabla 2 muestra los valores pronosticados extrapolados a 100 metros de altura (utilizando los datos de MERRA2 tal como se explica en la sección Metodología), destacando los valores significativos en rojo (negativos) y azul (positivos). Por último, La tabla 3 muestra el valor de velocidad media de viento a 100m P70.

Cuadro 2: Valores medio de viento (P50) en metros por segundo, tomando como referencia los valores a 100 metros de MERRA. En azul y rojo mostramos se destacan los valores en donde la anomalía supera el 50% de la dispersión del ensamble.

modelo	dic	ene	feb	mar	abr	may
	PENE C					
ecmwf	8.1	8.1	8.5	8.4	8.2	8.8
ncep	7.9	8.1	8.1	8.2	8.1	8.5
meteo	8.2	8.2	8.3	8.3	8.4	8.4
uk metoff	8.3	8.2	8.1	8.3	8.3	8.8
modelo	dic	ene	feb	mar	abr	may
	PEPOM I					
ecmwf	7.6	7.8	7.5	7.7	7.4	7.9
ncep	7.7	7.7	7.7	7.7	7.5	8.0
meteo	7.9	8.0	7.9	7.8	7.5	7.7
uk metoff	7.8	7.8	7.7	7.7	7.5	8.0
modelo	dic	ene	feb	mar	abr	may
	PEVIL I					
ecmwf	8.0	8.2	8.1	8.1	7.9	8.4
ncep	8.4	8.4	8.1	8.1	8.0	8.3
meteo	8.5	8.4	8.3	8.3	8.1	8.2
uk metoff	8.4	8.3	8.1	8.2	8.1	8.5
modelo	dic	ene	feb	mar	abr	may
	PEM I					
ecmwf	9.4	9.0	8.8	8.9	8.7	9.2
ncep	9.2	9.0	8.8	8.8	8.8	9.2
meteo	9.2	9.0	9.0	9.1	8.9	8.9
uk metoff	9.3	9.0	8.7	9.0	8.8	9.4

Cuadro 3: Valores de viento P70, en metros por segundo, tomando como referencia los valores a 100 metros de MERRA. En azul y rojo se destacan los valores en donde la anomalía supera el 50 % de la dispersión del ensamble.

modelo	dic	ene	feb	mar	abr	may
PENEC						
ecmwf	7.8	7.9	8.3	8.1	7.8	8.2
ncep	7.6	7.9	7.8	7.9	7.8	8.1
meteo	7.9	8.0	8.0	8.0	8.1	8.0
uk metoff	8.0	8.0	7.9	8.0	8.0	8.5
modelo	dic	ene	feb	mar	abr	may
PEPOM I						
ecmwf	7.4	7.5	7.3	7.3	7.1	7.4
ncep	7.5	7.4	7.4	7.4	7.3	7.6
meteo	7.6	7.7	7.6	7.5	7.1	7.3
uk metoff	7.4	7.4	7.4	7.4	7.2	7.7
modelo	dic	ene	feb	mar	abr	may
PEVIL I						
ecmwf	7.8	8.0	7.9	7.9	7.7	8.1
ncep	8.2	8.2	7.9	7.9	7.7	8.0
meteo	8.2	8.2	8.1	7.9	7.8	7.9
uk metoff	8.1	8.1	7.9	8.0	7.8	8.2
modelo	dic	ene	feb	mar	abr	may
PEM I						
ecmwf	9.1	8.8	8.6	8.6	8.4	8.8
ncep	9.0	8.7	8.5	8.5	8.6	8.8
meteo	8.8	8.8	8.7	8.7	8.5	8.6
uk metoff	9.0	8.7	8.4	8.7	8.6	9.0

5. Análisis futuros

A continuación mencionamos algunos aspectos en los que creemos que sería conveniente profundizar.

5.1. Evaluación de Pronósticos estacionales

Sería interesante contrastar la precisión de los pronósticos de años anteriores con lo que ocurrió. Los modelos utilizados tienen pronósticos disponibles desde 2017, con lo cual existen 48 meses para evaluar, con lo cual se puede hacer un benchmark de los distintos modelos. También sería interesante evaluar la capacidad de los pronósticos como para detectar mermas significativas como la de abril/2021 o mayo/2016.

5.2. Análisis de la dirección del viento

Los análisis realizados hasta el momento se han enfocado en el módulo de la velocidad del viento, omitiendo la dirección. En el presente informe se alcanzó a procesar el ángulo medio mensual de procedencia del viento, como se observa en la figura 13. La dirección se obtiene promediando las componentes del viento meridionales y latitudinales, para luego sacar el ángulo. A simple vista se observa una correlación entre cambios en la dirección predominante y la intensidad del viento, sobretodo cuando baja el viento promedio. Se observa además que el cambio en la dirección del viento ocurre esporádicamente, y su análisis en una serie temporal ayudaría a indentificar eventos climáticos significativos. Además, analizando la componente angular se puede estudiar la variabilidad en la producción del parque debido al efecto estela, que ocurre cuando la dirección del viento queda alineada con las turbinas.

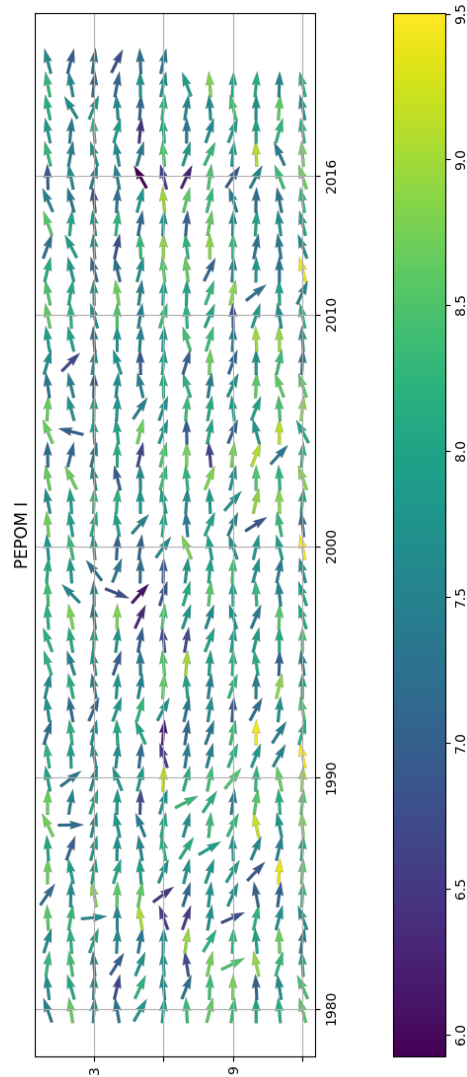


Figura 13: Velocidad media mensual en Pomona para los últimos 40 años, graficados junto con la dirección promedio. La escala de colores indica la velocidad media del viento en m/s

Referencias

- [1] Khaled H Hamed. Trend detection in hydrologic data: the mann–kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of hydrology*, 349(3-4):350–363, 2008.
- [2] Christopher Torrence and Gilbert P Compo. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(1):61–78, 1998.
- [3] Ross C Phillips and Denise Gorse. Cryptocurrency price drivers: Wavelet coherence analysis revisited. *PloS one*, 13(4):e0195200, 2018.