

NAP Costas

Plan Nacional de
Adaptación Costera
de Uruguay

Documento preparatorio

**Variabilidad de vientos regionales y relación
con lluvias en Montevideo y nivel del mar en
la costa**





Proyecto “Fortalecer las Capacidades de Uruguay para la Adaptación al Cambio Climático en la Zona Costera”

Variabilidad de vientos regionales y relación con lluvias en Montevideo y nivel del mar en la costa

Producto 3

Marcelo Barreiro
Fernando Arizmendi, Romina Trinchín
Yilian Montesino, Rafael Santana

Departamento de Ciencias de la Atmósfera
Instituto de Física, Facultad de Ciencias
Universidad de la República



Enero 2020

1. Regímenes de circulación de viento regionales

Desde mediados de siglo se sabe que la atmósfera tiende a organizarse en patrones de circulación recurrentes que pueden persistir por varios días. Estos patrones de viento, o regímenes de circulación (“Weather Regimes”, WR), caracterizan el clima de una región y su frecuencia de ocurrencia puede depender de modos de variabilidad climáticos globales. Así, en este capítulo se determinarán los WR que ocurren en forma más frecuente en la región subtropical de Sudamérica y se estudiará cómo El Niño, el Modo Anular del Sur, la Oscilación Decadal del Pacífico y el Atlántico Tropical Sur impactan sobre las estadísticas asociadas a estos regímenes de circulación (frecuencia de ocurrencia, duración, etc). El análisis se realizará por estaciones del año.

Asimismo estudiaremos la relación de los regímenes de viento con las lluvias en Montevideo y nivel del mar en la costa de Uruguay. Por último estudiaremos las tendencias en la frecuencia de ocurrencia de los regímenes de viento, lo que permitirá vincular con los cambios observados en otras variables meteorológicas.

1.1 Metodología

Para calcular los regímenes de circulación regionales se usó datos diarios de presión en superficie del re-análisis atmosférico de NCEP-CDAS1 durante el período 1948-2017. La elección de este reanálisis se basó en que es el que cubre un período de tiempo más extenso y permite comparar con las variaciones en las temperaturas y precipitación descrita en el Producto 2. Los regímenes se determinaron combinando Análisis de Componentes Principales y técnicas de “clustering” aplicados a la presión en superficie. Es bueno resaltar que la literatura indica que para la región no hay una técnica que se destaque muy por encima de las otras para la determinación de regímenes de circulación.

La metodología consta primero de un preprocesamiento de los datos y luego del cálculo específico de los regímenes. El pre-procesamiento realizado consistió en calcular las anomalías con respecto al ciclo estacional, remover la tendencia lineal, elegir la estación del año y quitar la variabilidad inter-anual a través de remover el promedio estacional de cada año. Este preprocesamiento asegura que los regímenes de circulación sean de escalas sinóptica a intraestacional.

Luego, a este conjunto de datos preprocesado se le aplica un análisis de componentes principales para reducir la dimensión del espacio, considerándose los primeros 10 modos (EOFs) ya que estos explican más del 90% de la varianza total en todos los casos considerados. Finalmente, a partir del método de *clustering K-means* se calculan los regímenes de tiempo obteniéndose las configuraciones que ocurren con más frecuencia. Para determinar el número de *clusters* a elegir se realizó un estudio de reproducibilidad. Esta metodología para encontrar los regímenes de viento se ha usado en la literatura, por ej. Arizmendi et al (2017).

2. Climatología y tendencia de vientos en superficie

Los vientos medios en superficie en nuestra región cambian de acuerdo a la estación del año: mientras que en verano son predominantemente del noreste, en invierno tienen componente oeste. En las estaciones intermedias de otoño y primavera la dirección predominante es del noreste aunque más débiles que en verano pues son muy variables (Simionato et al 2005). La figura 1 muestra los vientos medios para cada temporada.

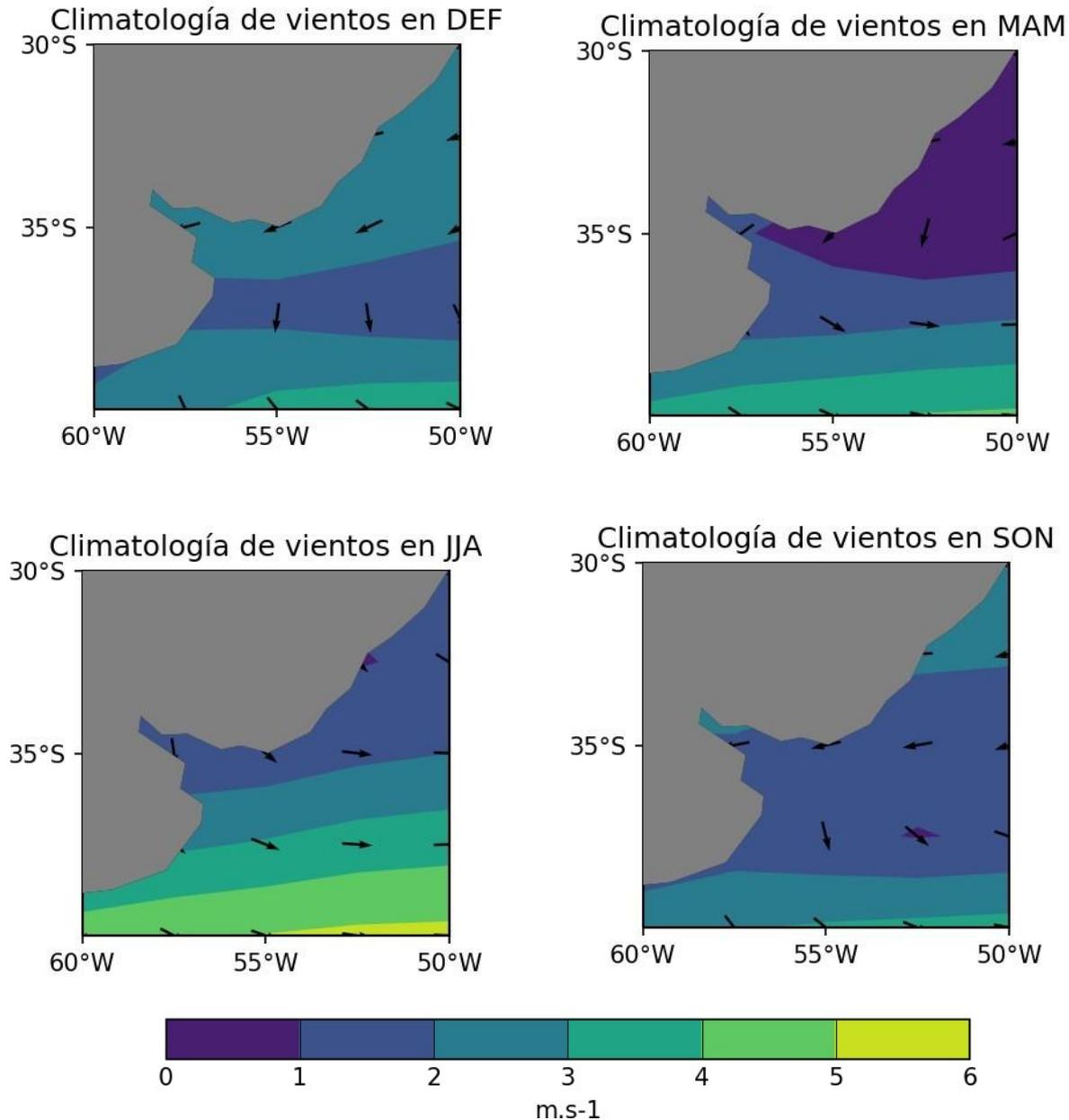


Figura 1 – Climatología de vientos en superficie.

La tendencia lineal de los vientos en superficie (1000 hPa) durante el periodo 1948-2017 se muestra en la figura 2. Considerando la climatología, la tendencia durante verano (DEF) muestra un debilitamiento en la componente norte de los vientos y una intensificación de la componente este. Durante otoño los cambios son similares al verano pero con mayor tendencia. En primavera se observa una leve intensificación en la componente este de los vientos. Invierno (JJA) presenta una intensificación de los vientos del sur en la costa Atlántica de Uruguay y un debilitamiento de la componente oeste en el estuario.

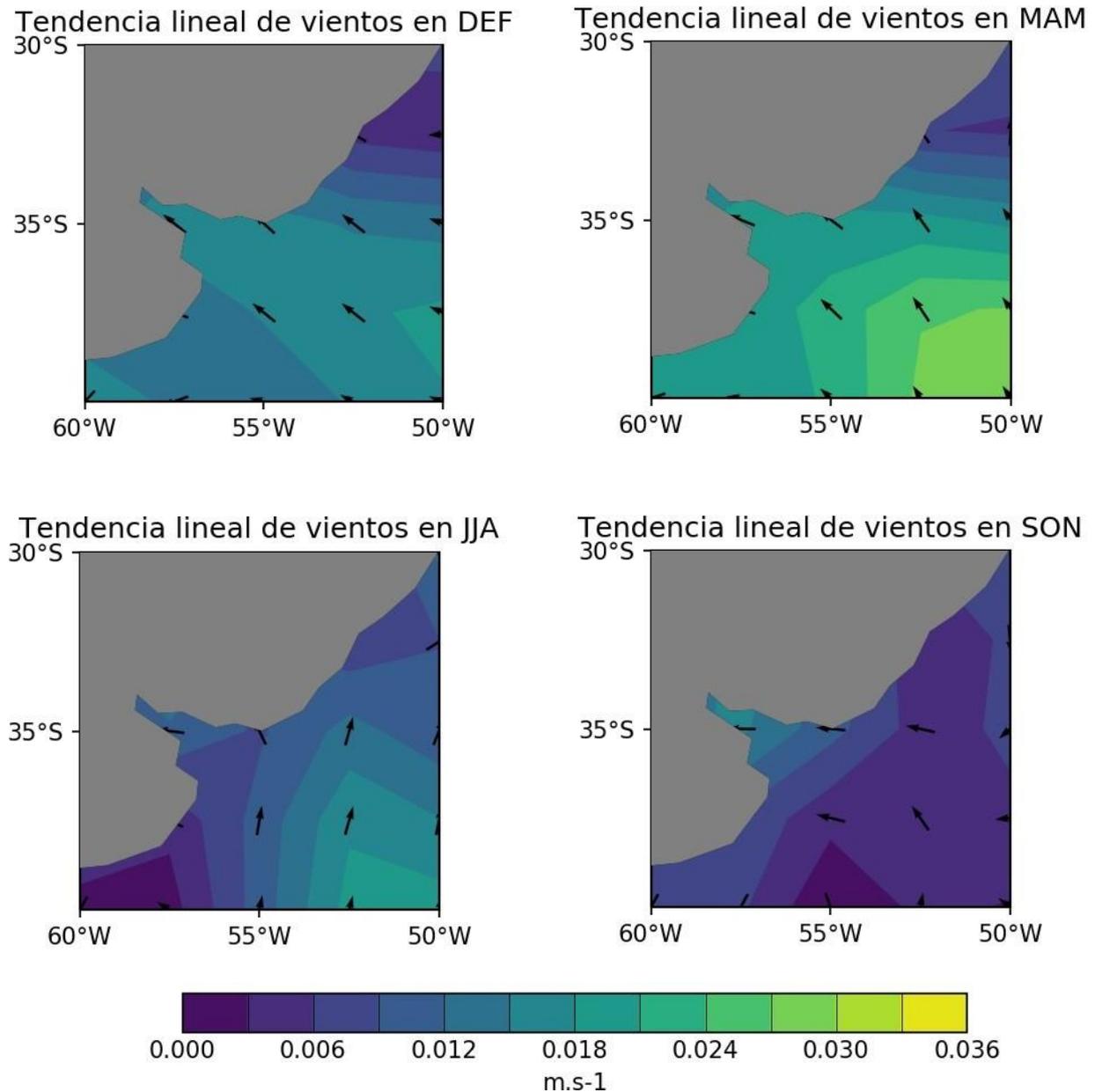


Figura 2 – Tendencia lineal de los vientos para cada temporada del año. La dirección se indica con flechas y la magnitud en colores.

3. Regímenes de viento

3.1 Verano

Durante esta estación el estudio de reproducibilidad indicó que el número de WR a elegir es 5, los cuales se muestran en la figura 3. Si bien los WR se calculan utilizando la presión en superficie, se muestra el campo de vientos asociado para facilitar la comprensión de la influencia del régimen de circulación en nuestra región.

El WR1 está caracterizado por una circulación ciclónica con centro justo al sur de Uruguay, de tal forma que los vientos sobre nuestro país son relativamente débiles, y dos regiones de alta presión sobre el Pacífico y Atlántico. El WR2 está caracterizado por una circulación anticiclónica sobre el océano Atlántico que induce vientos del este-noreste en las costas de Uruguay.

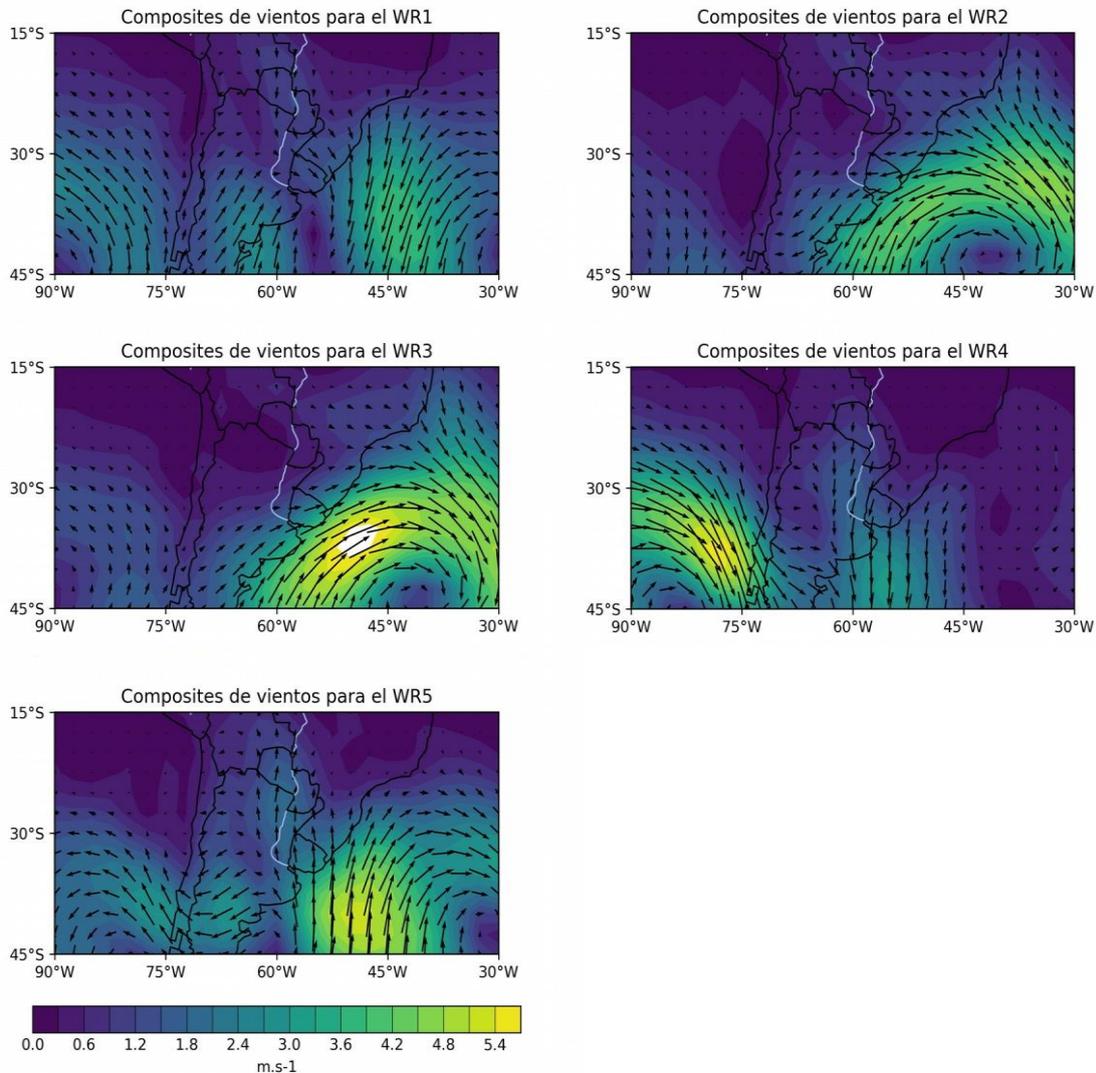


Figura 3 – Regímenes de circulación durante verano.

El WR3 está caracterizado por una circulación ciclónica situada sobre el océano Atlántico, resultando en vientos del suroeste sobre nuestro país. El WR4 muestra una circulación ciclónica en el océano Pacífico y un gradiente de presión que tiene asociados vientos del norte sobre Uruguay. Por último, el WR5 muestra una circulación anticiclónica al sur de Uruguay y una ciclónica sobre el océano Atlántico lo cual resulta en intensos vientos de componente sur sobre nuestro país.

La frecuencia de ocurrencia de los WR no es la misma. El WR2 es el mas frecuente y ocurre 40% mas del tiempo que el WR3, que es el menos frecuente. Los otros tres WR tienen una frecuencia de ocurrencia intermedia y similar (figura 4). Asimismo, la matriz de transiciones entre WRs muestra que el WR2 tiende a preceder al WR1, el WR4 precede el WR1 y que el WR5 transiciona hacia el WR2, las cuales se pueden interpretar dinámicamente. Por ejemplo, el WR4 muestra el desarrollo de un sistema de baja presión en el norte de Argentina, que según las condiciones en altura se puede profundizar y dar lugar a un ciclón que se desplazará hacia Uruguay (WR1). Se puede observar también que las transiciones WR2→WR3 y WR3→WR2 no ocurren, lo cual también tiene sentido físico.

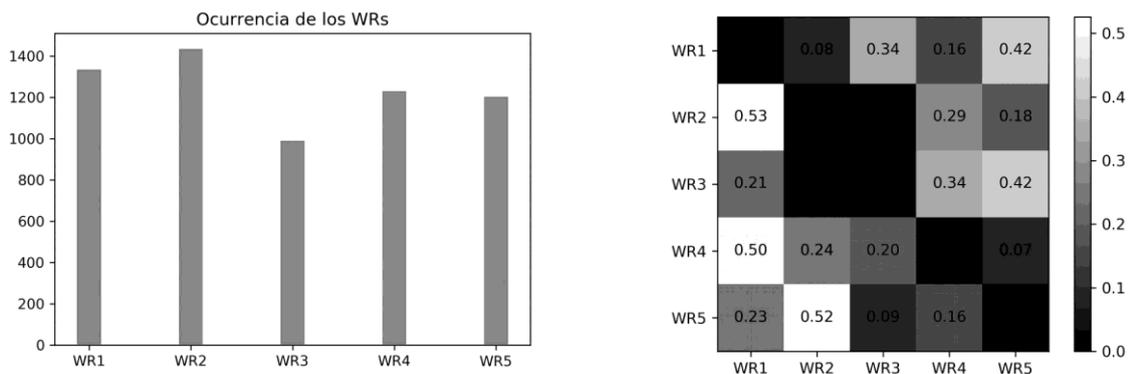


Figura 4 – Frecuencia de ocurrencia (panel izquierda) y matriz de transiciones entre WRs (panel derecha).

ENSO modula la frecuencia de ocurrencia de los WRs en un 10-20% (figura 5). Se observa, por ejemplo, que durante años neutros el WR3 es cerca de un 15% mas frecuente que durante años Niña, mientras que el WR5 es 10% mas frecuente durante años Niño que años neutros. En el caso de La Niña, el WR2 es el mas favorecido frente a años neutros. Se observa también que durante años neutros la transición mas probable es entre el WR2 y el WR1, mientras que durante años Niño lo es la transición WR5 → WR2.

Los regímenes de viento describen situaciones sinópticas en la atmósfera y por lo tanto algunos de ellos serán tales que impactarán sobre las lluvias en Uruguay. Para ver esto consideramos las lluvias diarias en la estación meteorológica del aeropuerto de Carrasco como representativa del área metropolitana. El WR4 es el régimen de circulación mas asociado a lluvias durante verano (figura 6): cerca del 27% de los días de lluvia ocurren en este WR, lo cual es consistente con la presencia de viento norte que trae humedad a la región. Por otro lado, los WR3 y WR5 contienen solo el 16% de los días de lluvia cada uno.

La estadística es similar para los días anterior (-1) y posterior (+1) al evento, excepto en el caso del WR1. El WR1 muestra un gran aumento en el porcentaje de días de lluvia para el día -1 (31%) frente al día 0 (21%), lo cual puede deberse a que WR2 y WR4 tienden a transicionar hacia el WR1 por lo que el día -1 del WR1 puede ser una situación sinóptica del tipo WR2 o WR4, siendo este último el que concentra la mayor cantidad de días de lluvia.

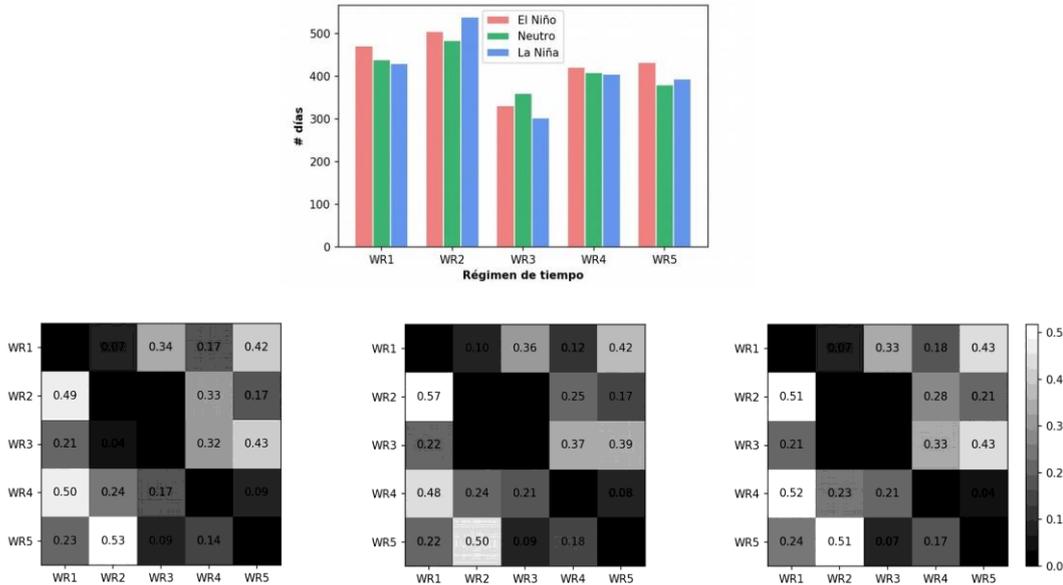


Figura 5 – Frecuencia de ocurrencia de WR (arriba) y transiciones entre WRs según años Niño (izquierda), Neutros (centro) y Niña (derecha).

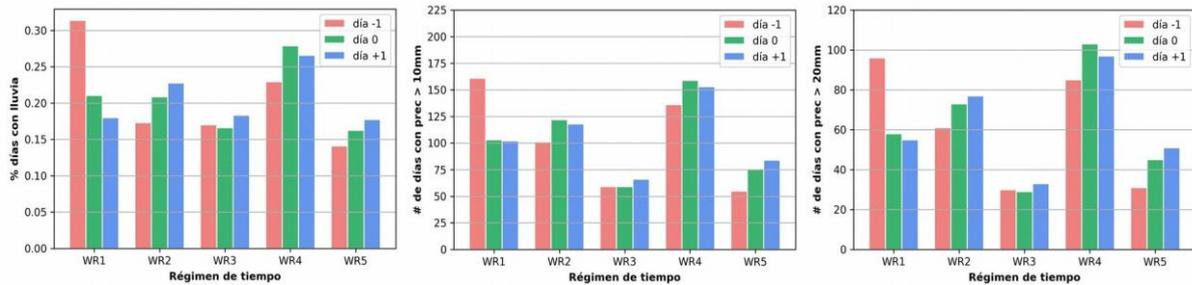


Figura 6 – Impacto de los WRs sobre las lluvias diarias en Carrasco.

El WR4 es además el régimen de circulación con mayor acumulado de lluvia asociada y mayor dispersión hacia valores extremos. Esto último se puede observar contando el número de días con eventos de lluvia mayores a 10 mm y 20 mm (figura 6). Para ambos umbrales asociados a eventos de lluvia extremos el WR4 concentra el mayor número de casos. Por otro lado, el WR3 casi no está asociado a eventos extremos de lluvia.

Es interesante notar que el día (-1) del WR1 es el que presenta el mayor % de días de lluvia para todos los WRs, y además contiene un gran número de eventos extremos. Esto es consistente con el desarrollo de un sistema de baja presión sobre Uruguay en el día previo al WR1, el cual muestra que dicho sistema ya se movió hacia el sur de nuestro país.

Para estudiar el impacto de los modos de variabilidad climáticos se calculó tres estadísticas para cada temporada de verano desde 1948 a 2017: número de días en cada WR, número de eventos de cada WR y duración en días de cada WR. Las figuras 7, 8 y 9 muestran la evolución año a año de estas estadísticas. Luego, estas series temporales fueron correlacionadas con los índices que caracterizan a ENSO, PDO, SAM y las anomalías de temperatura de superficie del mar en el Atlántico tropical sur (TSA). Valores de correlación mayores a 0.23 son significativos al 5% en un *T-test* de dos colas.

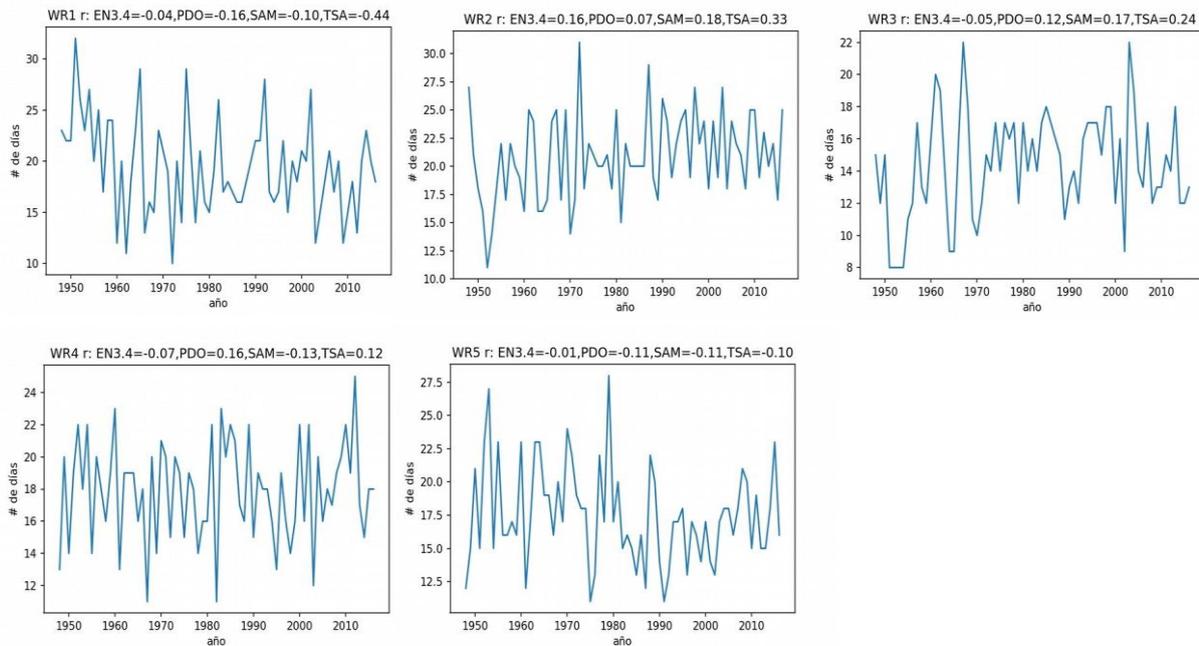


Figura 7 – Evolución interanual del número de días en cada WR. Correlaciones en el título.

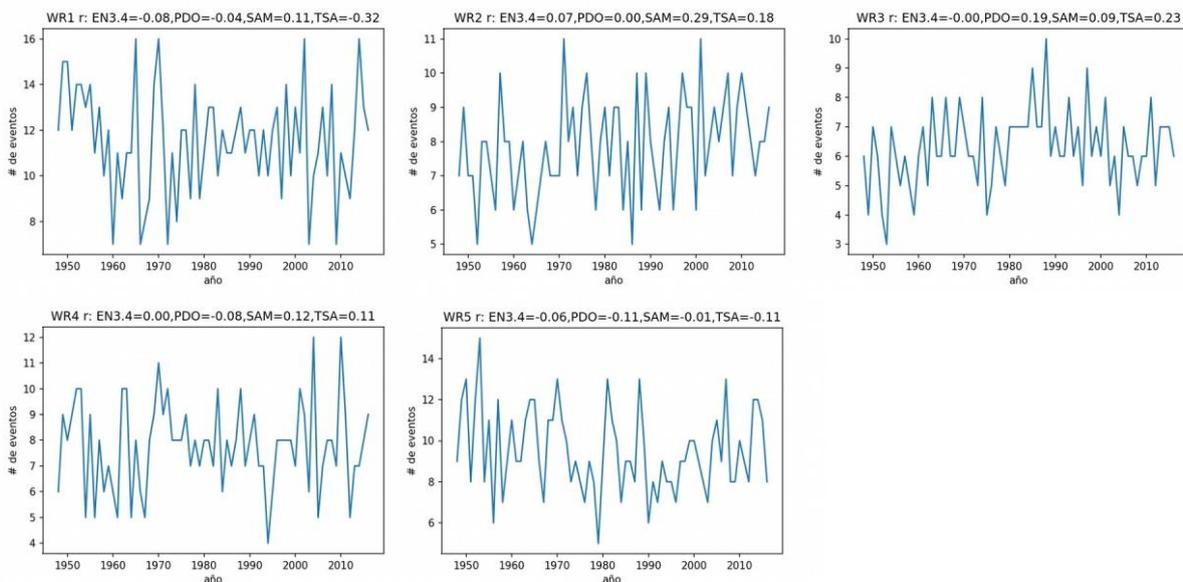


Figura 8 – Evolución interanual del número de eventos de cada WR. Correlaciones en el título.

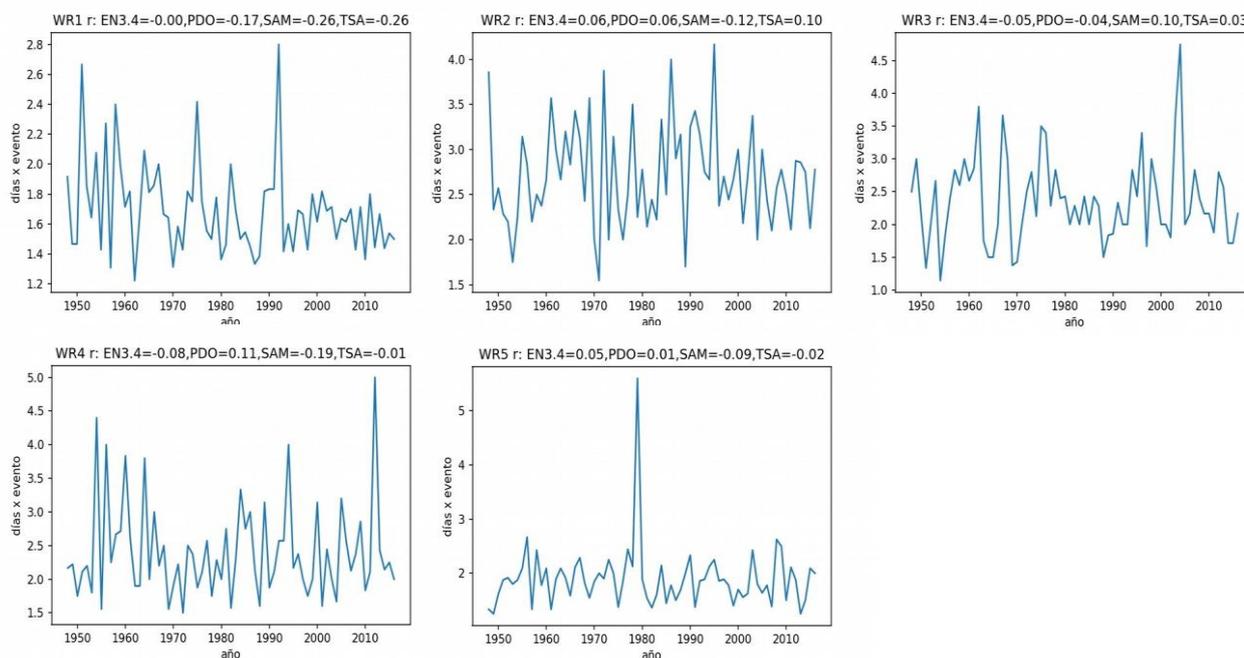


Figura 9 – Evolución interanual del número de días por evento (duración o persistencia) de cada WR. Las correlaciones se indican en el título.

Las figuras muestran que la frecuencia de ocurrencia de los WR tiene una gran variabilidad interanual con cambios pico a pico del orden de 2.5 a 3 veces. Por ejemplo, el WR3 ocurrió solo 8 días durante el verano de 1952 y 22 días durante 2003. El número de eventos de los WR también tiene gran variabilidad interanual, con cambios año a año del orden de 2 veces. La persistencia de los WR es del orden de 2-3 días, excepto para el WR1 que es más baja, cercana a 1-2 días. Esto último es esperable ya que el WR1 representa el desarrollo de un ciclón en superficie sobre Uruguay, lo cual ocurre en escalas de 1 a 2 días.

En el caso del número de días de ocurrencia del WR se encontró que el WR2 y el WR3 están correlacionados positivamente y el WR1 negativamente con el TSA.

En el caso del número de eventos:

- el WR1 está correlacionado negativamente con el TSA
- el WR2 se correlaciona positivamente con el SAM
- WR3, WR4 y WR5 no están correlacionados con ningún índice.

En el caso de la duración la única relación estadísticamente significativa encontrada fue que el WR1 está correlacionado negativamente con SAM y TSA.

Estas correlaciones sugieren una relación entre las estadísticas de los WRs y los modos de variabilidad climáticos pero no indican la causalidad. Por lo tanto son necesarios más estudios para entender las relaciones encontradas.

3.2 Otoño

Los regímenes de circulación para esta estación son similares a los de verano y se muestran en la figura 10. Por otro lado, las frecuencias de ocurrencia de cada WR son un poco diferentes pues cuatro de los WRs tienden a ocurrir en forma similar. Sin embargo, el WR3, que representa una circulación ciclónica al sureste de Uruguay es el patrón que ocurre menos frecuentemente (un 30-40% menos), al igual que en verano (figura 11).

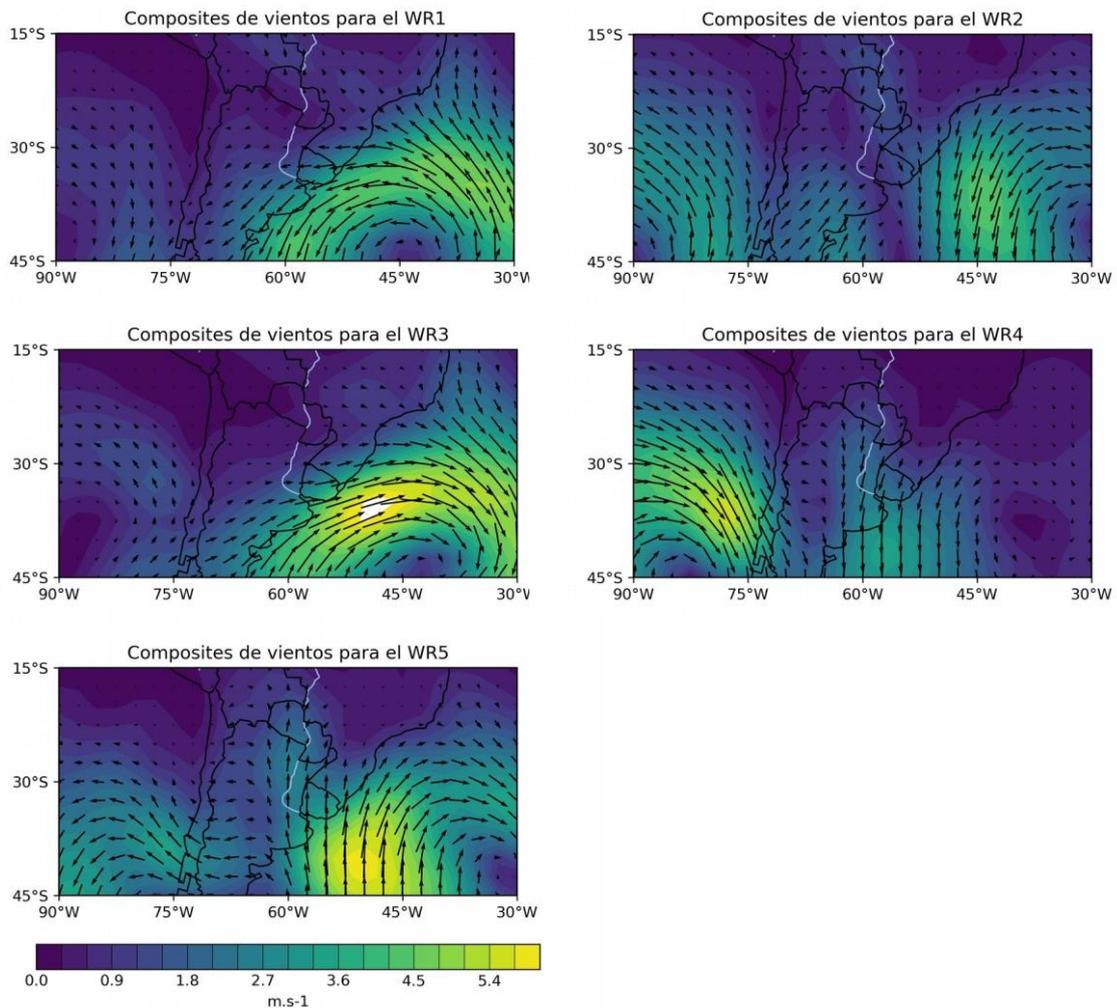


Figura 10 – Regímenes de circulación durante otoño.

Las transiciones más frecuentes entre WR son del WR5 al WR1 y del WR1 al WR2, lo que representa la entrada de un sistema de alta presión por el suroeste sobre nuestra región y su posterior desplazamiento hacia el este (figura 11). Asimismo, la transición de WR4 al WR2 es también muy frecuente, caracterizada por la profundización de un sistema de baja presión sobre nuestro país. Estas son las mismas transiciones más frecuentes durante verano.

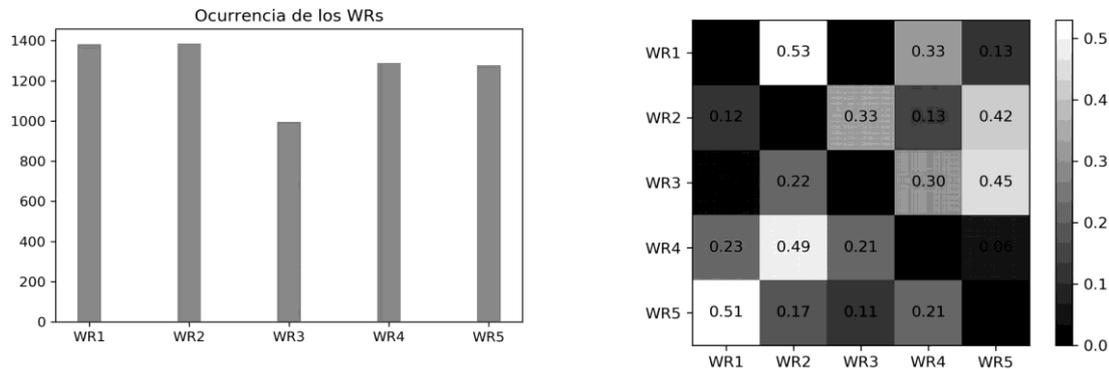


Figura 11 – Frecuencia de ocurrencia de los WR y sus transiciones.

ENSO modula la actividad algunos WR durante otoño: el WR4 es mas frecuente durante La Niña, mientras que WR2 y WR5 son mas frecuentes durante El Niño, con variaciones cercanas a un 15-20% (figura 12). En cuanto a las transiciones, durante años Niña se desfavorece la transición desde el WR1 al WR2 y se favorece del WR3 al WR5 (al igual que durante años Niño), frente a los años neutros. Al igual que en verano la transición entre patrones de WR1 a WR3, y viceversa, no se observa.

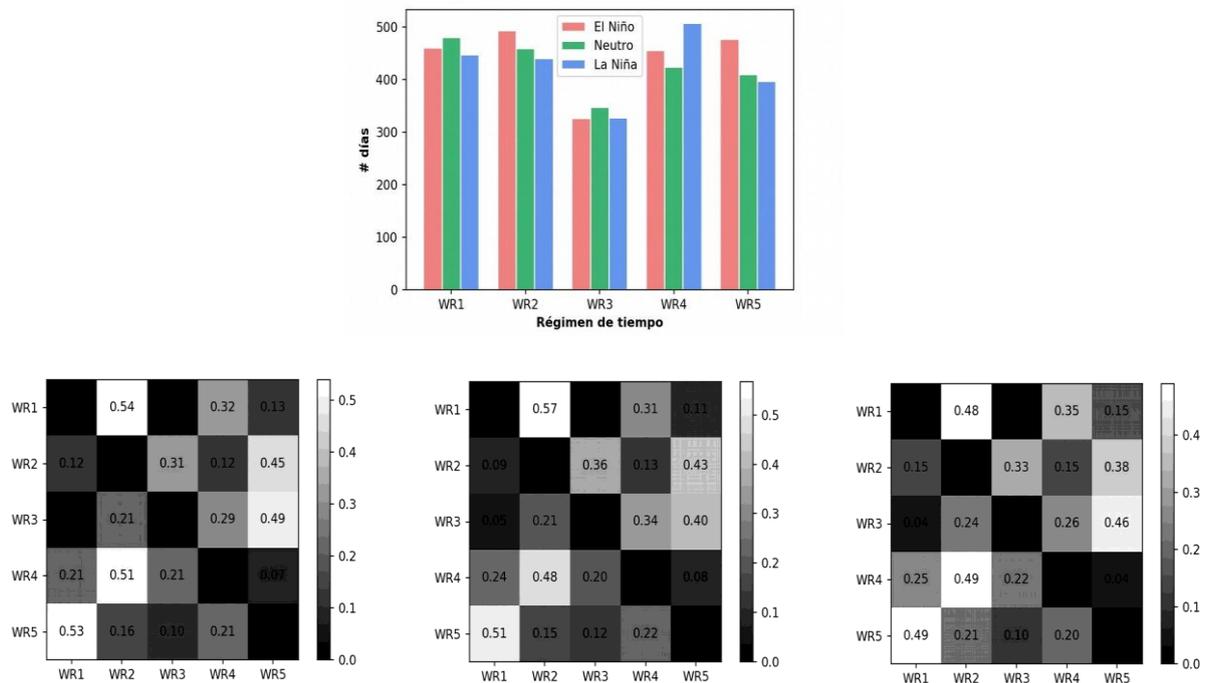


Figura 12 – Frecuencia de ocurrencia de WR (arriba) y transiciones entre WRs según años Niño (izquierda), Neutros (centro) y Niña (derecha).

Los regímenes de circulación mas asociados con lluvias en Carrasco son el WR4 y el WR2 cada uno con 25% del total de días (figura 13). Estos regímenes están caracterizados por un transporte de calor y humedad desde el norte y por una baja presión sobre nuestro país, respectivamente, condiciones que favorecen la inestabilidad y lluvias. Asimismo, para el día -1 se observa un máximo en el número de días con lluvia asociado al WR2, consistente con la importante frecuencia de transición del WR4 al WR2 mostrada antes. Por otro lado el WR3 y WR5, caracterizados por vientos de componente sur, rondan en cerca del 16% del total de días de lluvia.

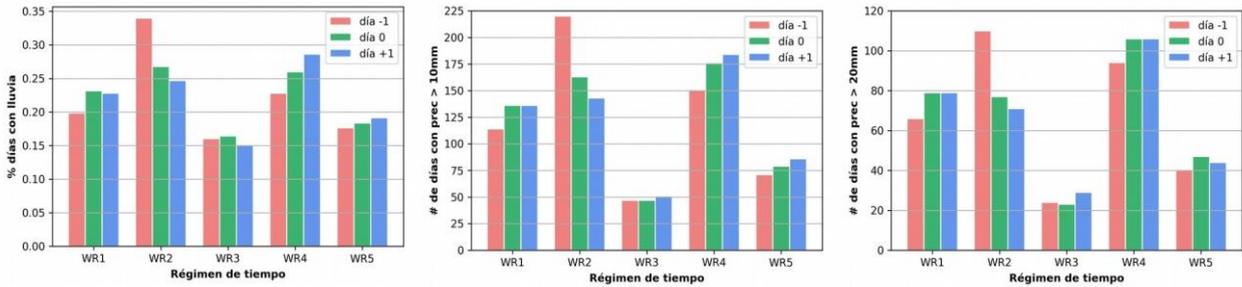


Figura 13 - Impacto de los WR sobre las lluvias diarias en Carrasco.

En cuanto a precipitaciones extremas la importancia de WR2 y WR4 es aun mayor, acompañado también por el WR1 (figura 13). Los regímenes con componente de viento sur (WR3 y WR5) tienen, por el contrario, asociados muy pocos días de lluvia extrema.

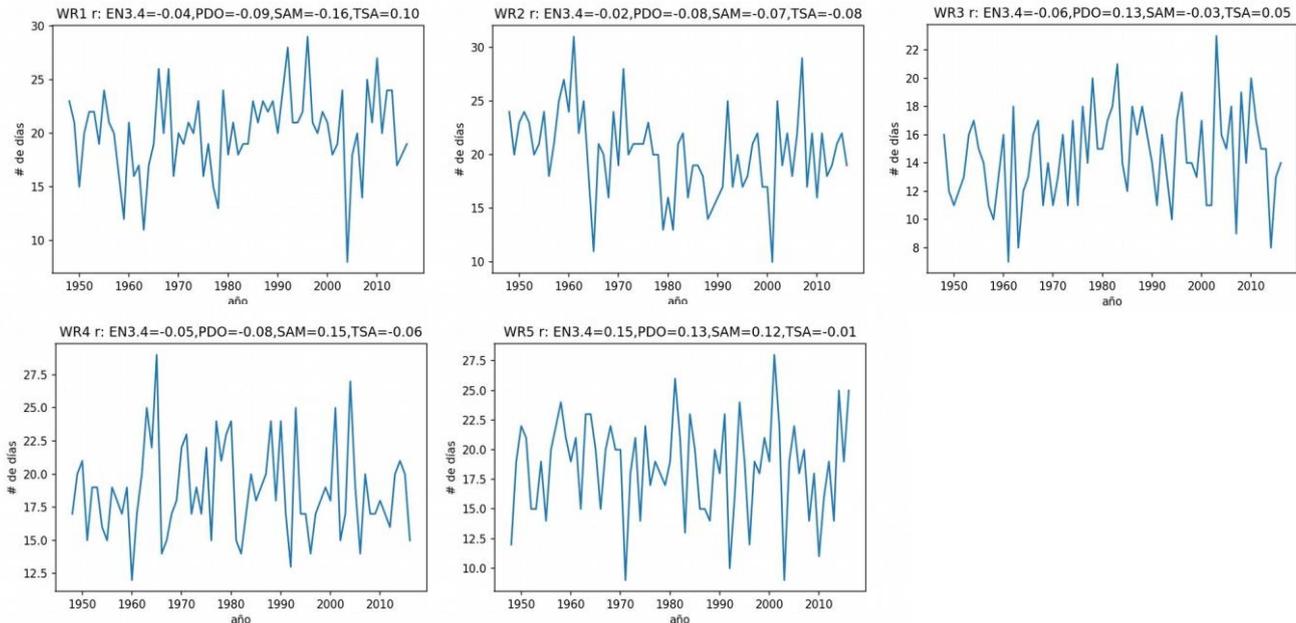


Figura 14 - Evolución interanual del número de días en cada WR. Correlaciones en el título.

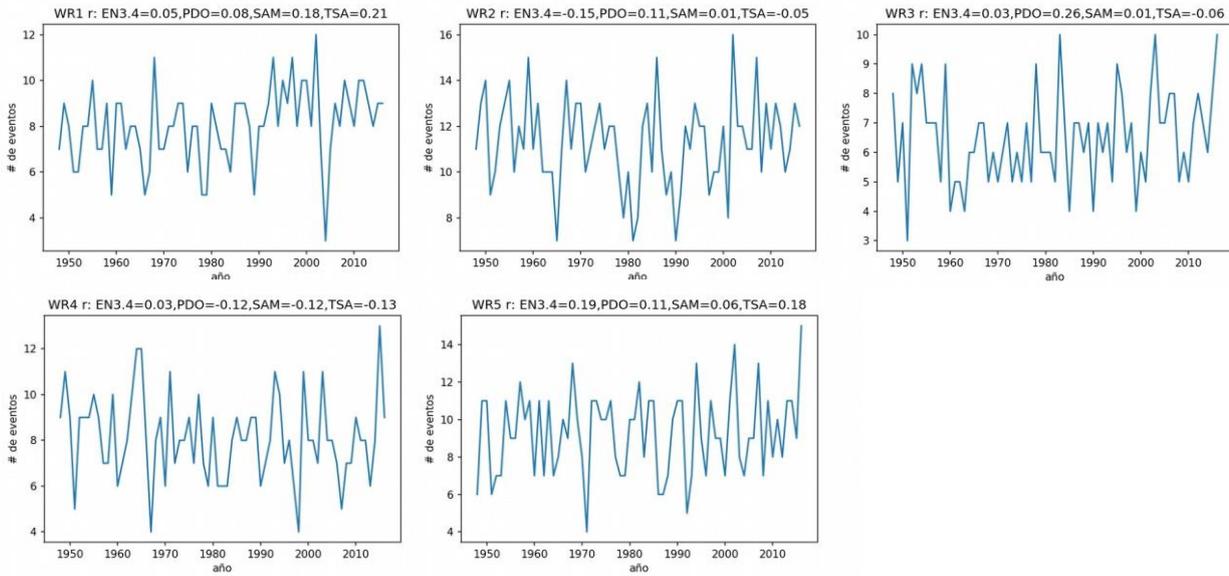


Figura 15 - Evolución interanual del número de eventos de cada WR. Correlaciones en el título.

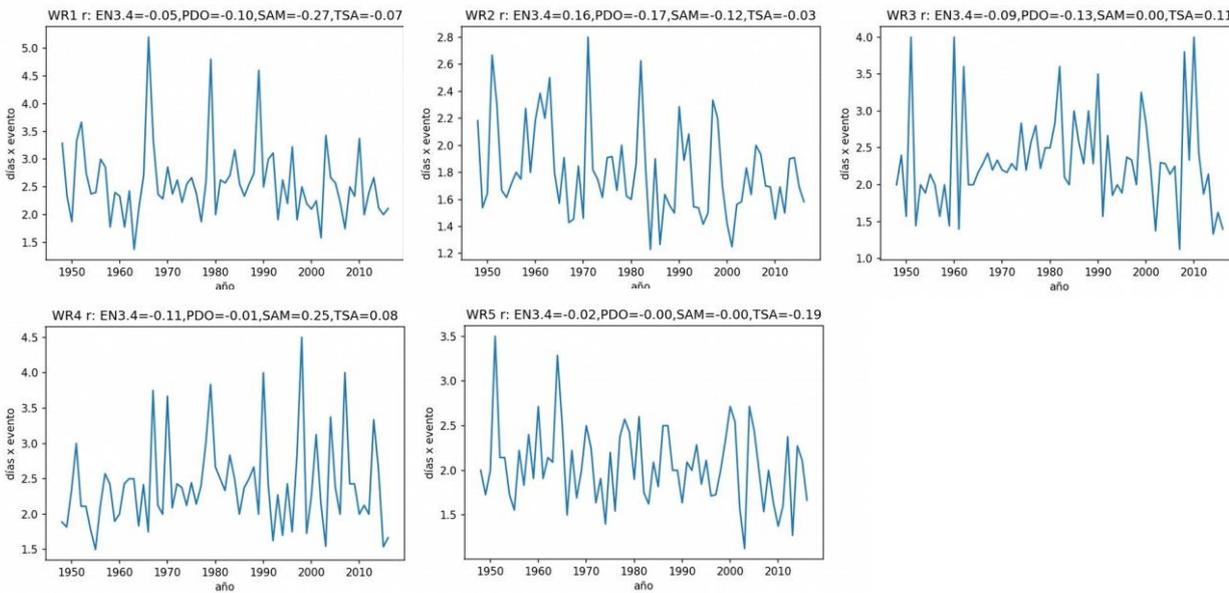


Figura 16 - Evolución interanual del número de días por evento (duración o persistencia) de cada WR. Las correlaciones se indican en el título.

Al igual que en verano el número de días en cada WR, el número de eventos y su persistencia muestra gran variabilidad interanual y los valores medios son también similares entre estaciones del año (figuras 14, 15 y 16).

En cuanto a correlaciones con los modos de variabilidad globales, se encontró que el número de días no muestra correlación significativa con ninguno de ellos. En el caso de número de eventos el WR3 se correlaciona positivamente con la PDO. Por último en el caso de la duración de los WR, los WR1 y WR4 están correlacionados negativa y positivamente con SAM, respectivamente.

3.3 Invierno

Durante esta estación el número de regímenes de circulación que identificó el análisis fue siete, los cuales se muestran en la figura 17. El mayor número de WR durante invierno refleja una mayor variabilidad atmosférica en la región, consistente con una actividad sinóptica más intensa. La mayoría de los patrones de circulación tienen sus análogos en las estaciones de verano y otoño aunque igualmente pueden notarse diferencias entre ellos, que pueden ser debido a cambios en el flujo medio entre estaciones o a la metodología empleada.

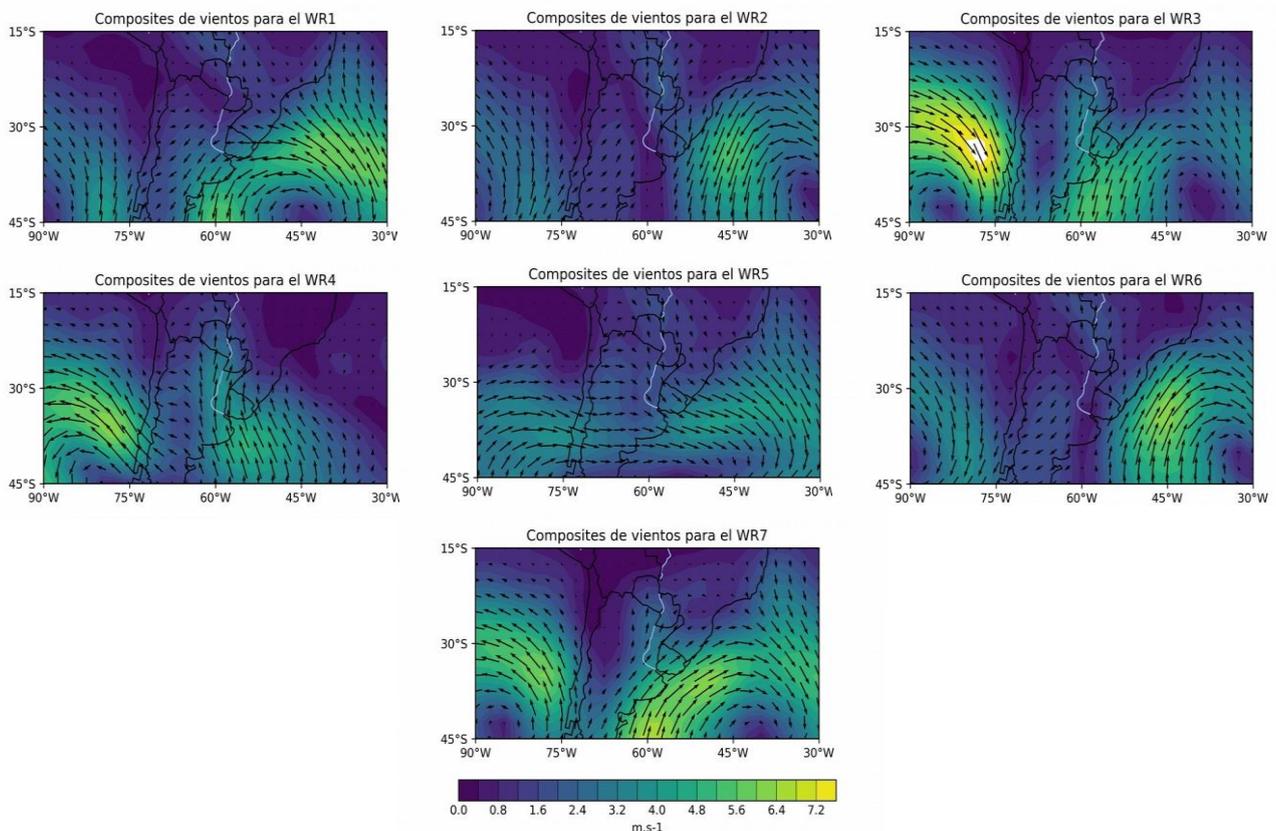


Figura 17 – Regímenes de circulación durante invierno.

En cuanto a ocurrencia, el WR2 es cerca de un 50% mas frecuente que los otros WR, lo cual refleja la alta ocurrencia de sistemas de baja presión sobre nuestro país durante el invierno (figura 18). Los otros WRs tienden a ocurrir en forma igualmente probable. La transición mas común entre WRs es del WR3 al WR2, que muestra la profundización de la baja en superficie sobre Uruguay.

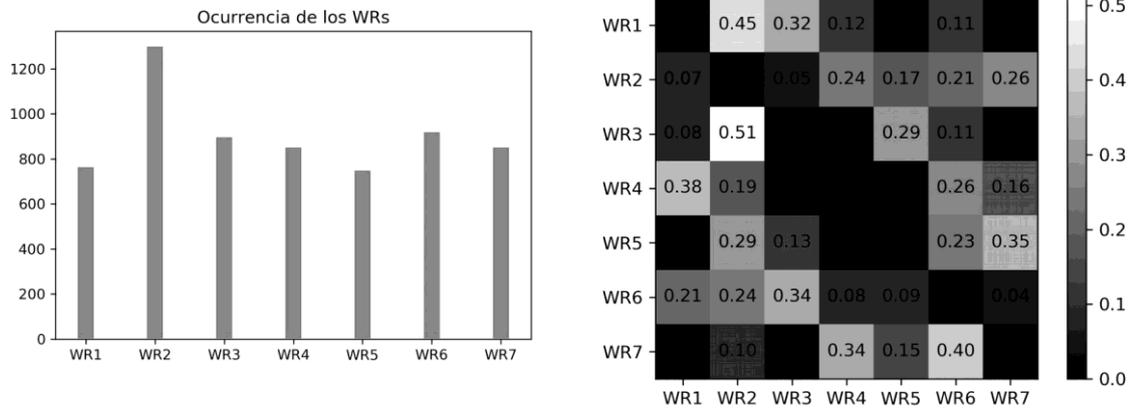


Figura 18 – Frecuencia de ocurrencia de los WR y sus transiciones.

ENSO modula la frecuencia de ocurrencia del WR2, siendo este régimen de circulación mas frecuente durante El Niño que durante La Niña (figura 19). El otro WR que muestra un cambio significativo con las fases de ENSO es el WR7 que es significativamente más frecuente durante La Niña que durante años neutros y años Niño. A nivel de transiciones, se observa que la transición WR1 a WR2, muy común durante años neutros, disminuye en cantidad durante años Niño y más aún durante años Niña. Esta disminución en el número de transiciones hacia WR2 es consistente con su menor ocurrencia durante años La Niña.

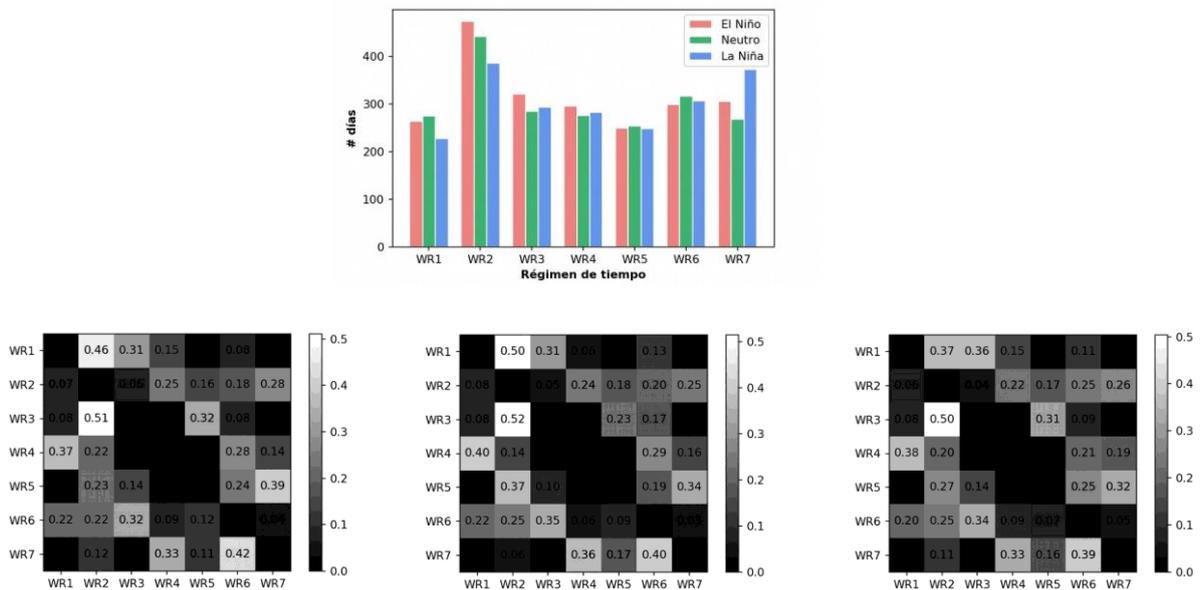


Figura 19 – Frecuencia de ocurrencia de WR (arriba) y transiciones entre WRs según años Niño (izquierda), Neutros (centro) y Niña (derecha).

Los regímenes de circulación mas asociados a eventos de lluvia en Carrasco son el WR2, WR3 y WR4, y los menos asociados son el WR6 y WR7 (figura 20). En el caso de WR2 y

WR4 tiende a llover más el día previo al de la ocurrencia del patrón de circulación y menos el día siguiente. Esto podría deberse a que el patrón del WR4 se asemeja a la entrada de una alta pos-frontal. La transición WR3 → WR2 podría explicar por qué las lluvias son más frecuentes el día previo al de la ocurrencia del WR2.

En cuanto a extremos, WR2 y WR3 son los que están mas asociados a eventos de lluvia intensa, mientras que el WR7 es el menos asociado a lluvias extremas. El día previo (-1) al WR2 es el que está mas asociado, por lejos, a lluvias intensas. Para los días posteriores se observa que el día (+1) del WR6 está asociado a lluvias extremas lo cual puede estar relacionado con que este WR tiende a transicionar hacia WR3.

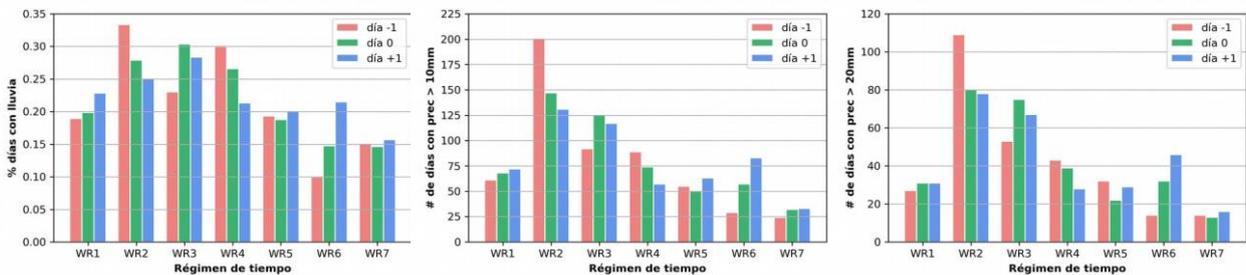


Figura 20 - Impacto de los WR sobre las lluvias diarias en Carrasco.

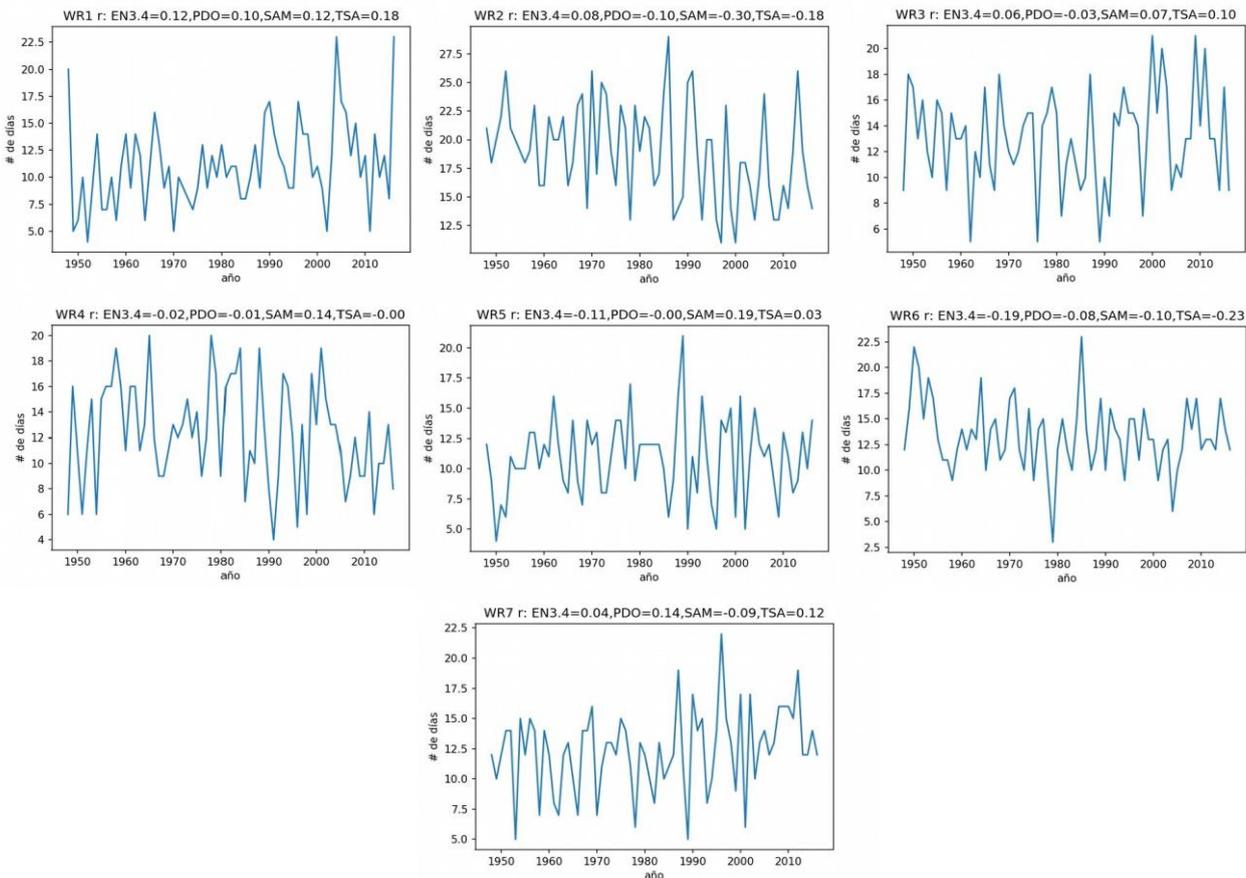


Figura 21 - Evolución interanual del número de días en cada WR. Correlaciones en el título.

En cuanto a correlaciones con los modos de variabilidad globales, se encontró que la ocurrencia en número total de días y la duración de los eventos del WR2 están negativamente correlacionados con el SAM. Asimismo, el número de eventos del WR2 se correlaciona negativamente con la PDO. El TSA está correlacionado negativamente con la frecuencia de ocurrencia del WR6 y positivamente con el número de eventos de los WR5 y WR7 (figuras 21, 22 y 23).

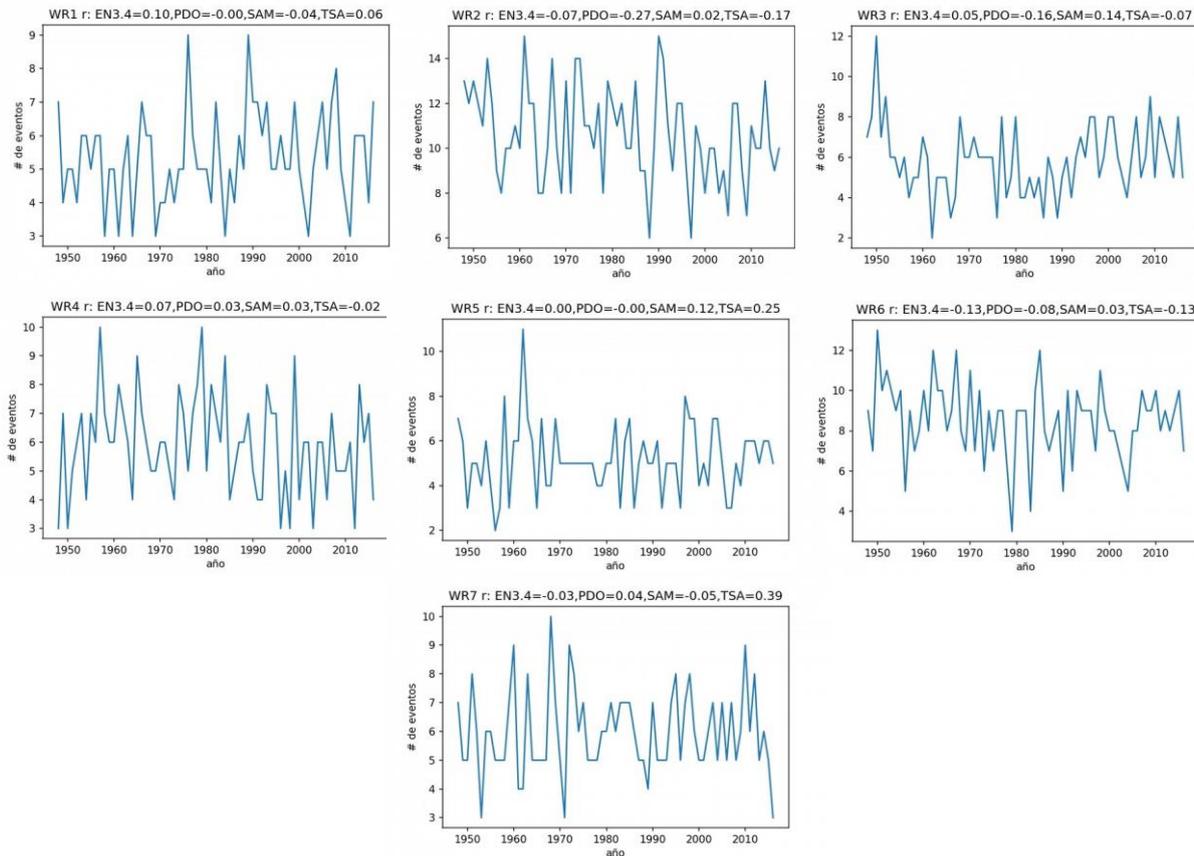


Figura 22 - Evolución interanual del número de eventos de cada WR. Correlaciones en el título.

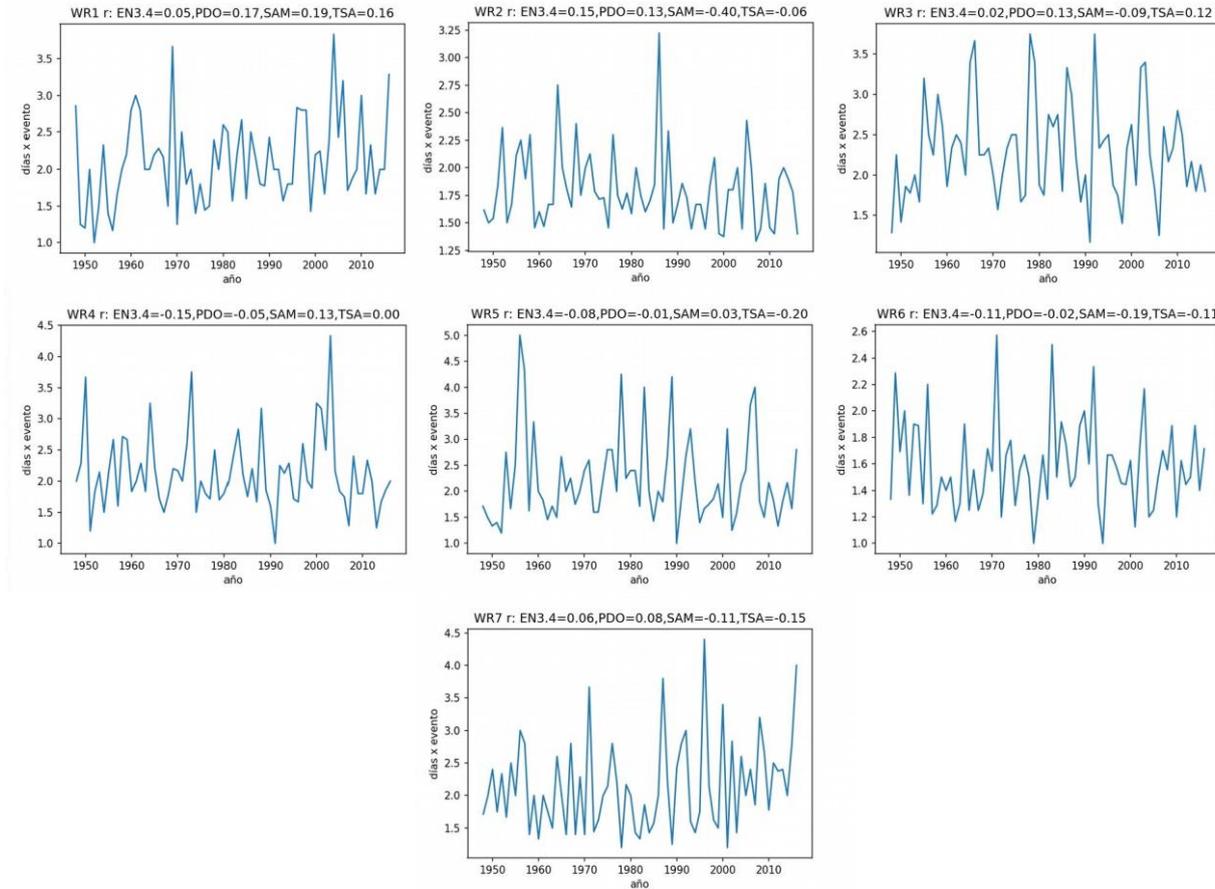


Figura 23 - Evolución interanual del número de días por evento (duración o persistencia) de cada WR. Las correlaciones se indican en el título.

3.4 Primavera

Los regímenes de circulación identificados por la metodología durante la primavera son cinco, con patrones muy parecidos a los de verano y otoño (figura 24). No obstante la frecuencia de ocurrencia de cada WR durante esta estación difiere de las otras. En primavera el WR2 es el más frecuente, seguido del WR5, mientras que el WR3 es el menos frecuente, aunque las diferencias no superan el 30%. Las transiciones más frecuentes son del WR1 al WR5, y del WR5 al WR4 que representa el ingreso de un anticiclón por el suroeste, que luego se desplaza hacia el este, dando lugar a vientos con componente norte y finalmente el desarrollo de un sistema de baja presión sobre nuestro país (figura 25).

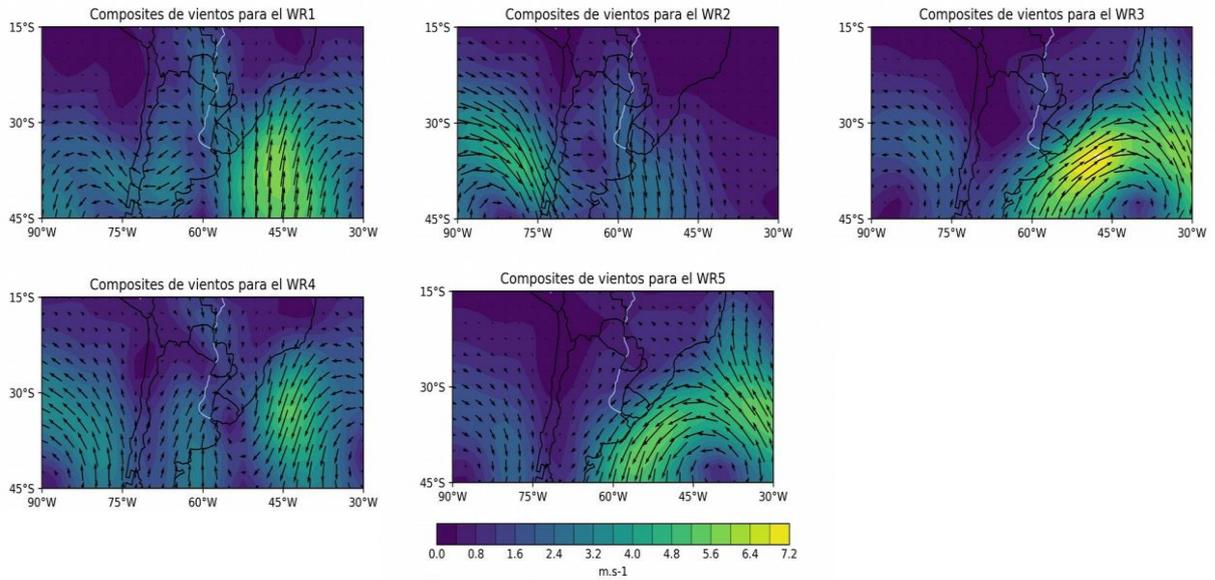


Figura 24 – Regímenes de circulación durante primavera.

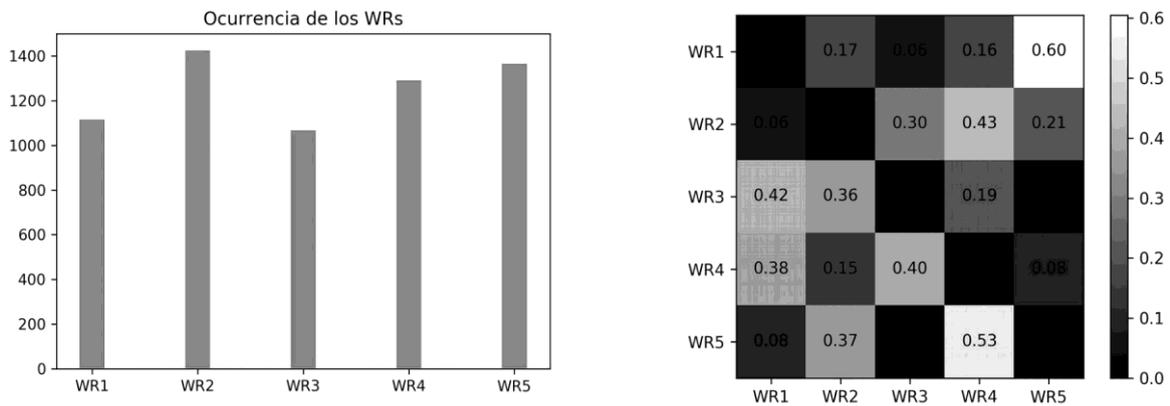


Figura 25 – Frecuencia de ocurrencia de los WR y sus transiciones.

La modulación por parte de ENSO de la frecuencia de ocurrencia de cada WR se muestra en la figura 26. Se observa que el WR2 es más frecuente durante años Niño que durante años neutros y Niña, y el WR4 es más frecuente durante años Niña. A nivel de transiciones, el WR1 tiende a preceder el WR5 en mayor medida durante años Niño que años Niña (figura 26).

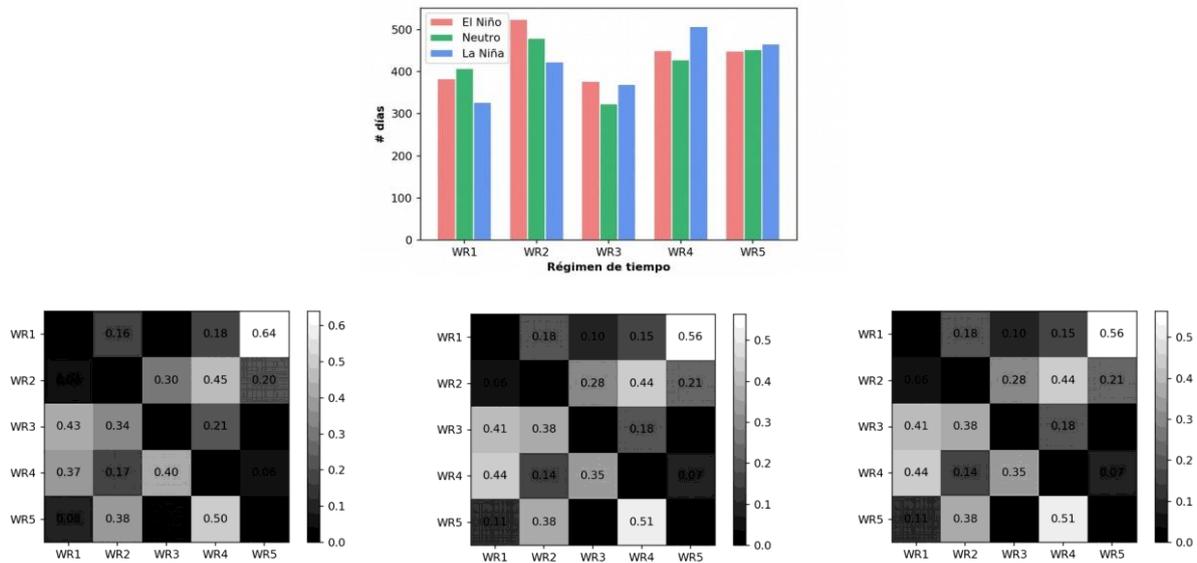


Figura 26 - Frecuencia de ocurrencia de WR (arriba) y transiciones entre WRs según años Niño (izquierda), Neutros (centro) y Niña (derecha).

En el día de ocurrencia el régimen de circulación mas asociado a eventos de lluvia en Carrasco es el WR2, que presenta vientos anómalos del norte, y es además el que tiene acumulados mayores. Por otro lado, el WR3 es el patrón menos asociado a lluvias y tiene acumulados significativamente menores al WR2 (figura 27). Sin embargo en el día previo (-1) a la ocurrencia del WR, el WR4 es el que está mas asociado a eventos de lluvia en Carrasco, al igual que en otras temporadas. En cuanto a extremos, el WR2 y WR4 son los patrones que tienen mayor número de días con acumulados mayores a 10 mm y 20 mm. Los patrones WR1 y WR3 son los menos asociados a lluvias extremas.

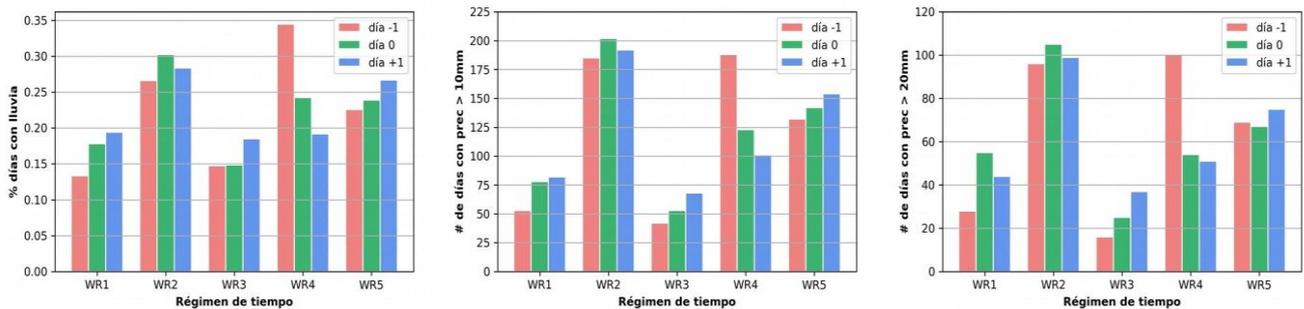


Figura 27 - Impacto de los WR sobre las lluvias diarias en Carrasco.

La frecuencia de ocurrencia del WR2 se correlaciona positivamente con ENSO, PDO y el TSA, así como negativamente con el SAM. Asimismo, la frecuencia de ocurrencia en días y el número de eventos del WR5 está correlacionado con un SAM positivo (figuras 28 y 29). La duración de los WR no muestra correlaciones significativas con los modos de variabilidad globales (figura 30).

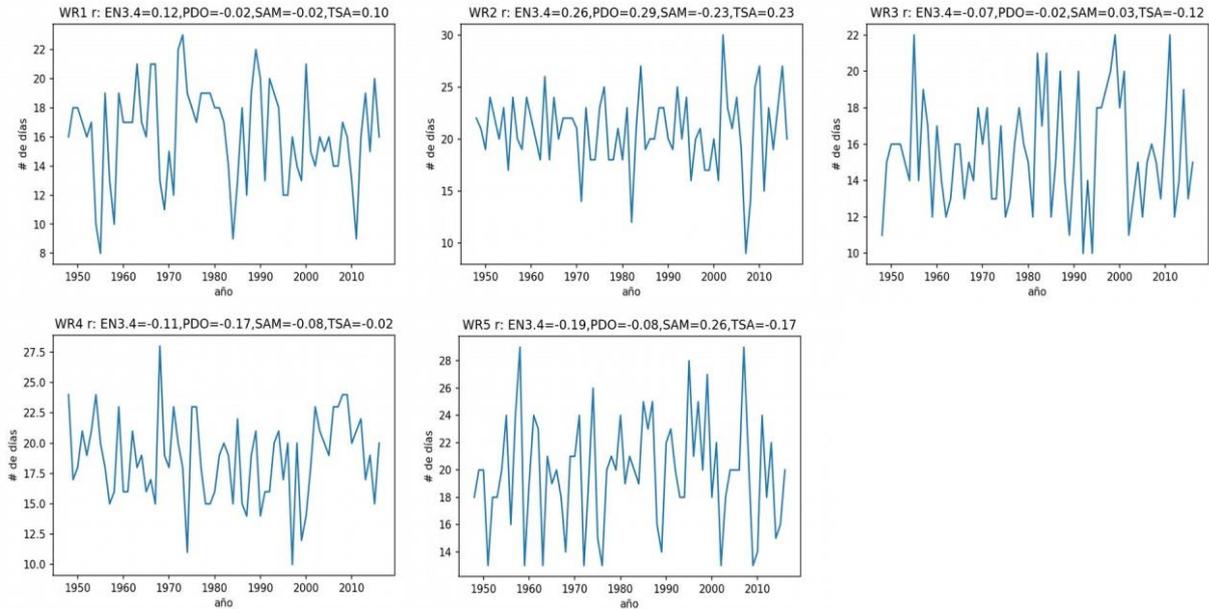


Figura 28 - Evolución interanual del número de días en cada WR. Correlaciones en el título.

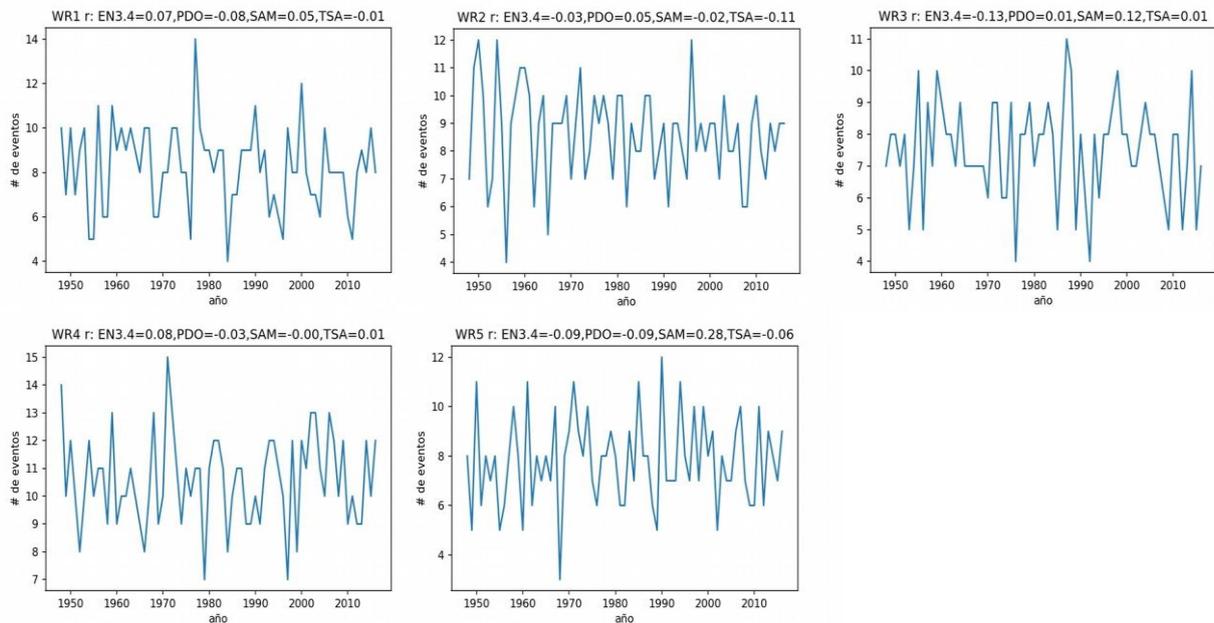


Figura 29 - Evolución interanual del número de eventos de cada WR. Correlaciones en el título.

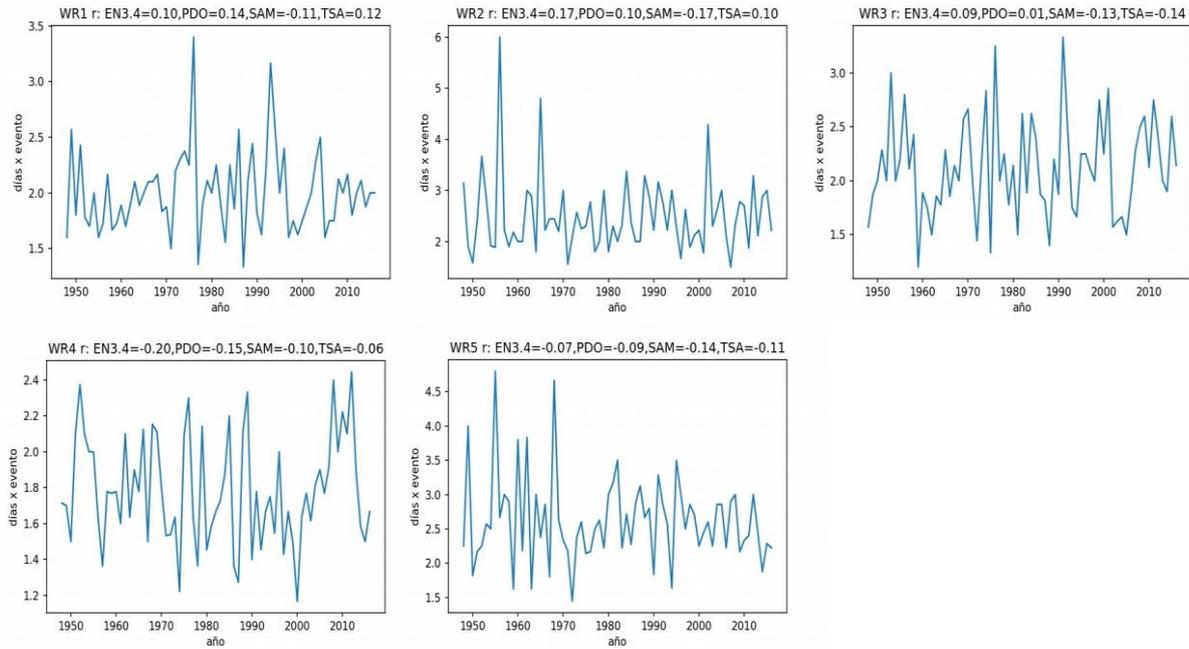


Figura 30 - Evolución interanual del número de días por evento (duración o persistencia) de cada WR. Las correlaciones se indican en el título.

4. Impacto de los regímenes de viento sobre altura de nivel del mar

Los regímenes de circulación tienen un efecto directo sobre los cambios en la altura del nivel del mar de la costa uruguaya. Para estudiar el impacto de los regímenes de circulación sobre la altura de nivel del mar se utilizó la base de datos grillada obtenida a través de altimetría satelital para el océano global, y que se puede acceder a través del sitio web de Copernicus. Estos datos son diarios y cubren el período 1/1/1993 hasta 1/2019. Para estudiar el impacto se realizó un composite de las anomalías de altura de nivel del mar para los días de ocurrencia de cada WR en cada temporada del año.

Un análisis de correlación con series observadas *in situ* revela que las variaciones temporales del nivel del mar estimado por satélite es razonable contra la costa (figura 31).

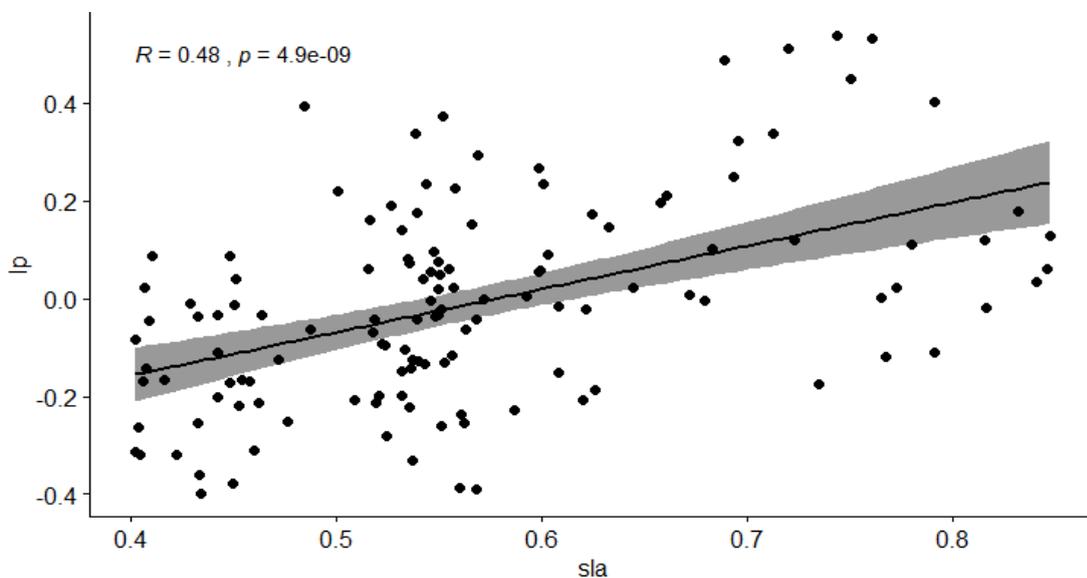


Figura 31 – *Scatter plot* y correlación entre la altura de nivel del mar observada *in situ* en La Paloma y la altura de nivel del mar estimada por altimetría en un punto cercano. Período 01/09/2018 al 09/01/2019.

Sin embargo, la amplitud de los cambios estimados por satélite son menores. En el caso mostrado en la Figura 31 los datos *in situ* tienen amplitudes que oscilan entre -0.4 m y 0.5 m, mientras que los satelitales tienen variaciones cercanas a la mitad. En otros puntos de la costa los datos satelitales pueden tener una varianza hasta un orden de magnitud menor que los observados *in situ*. Por lo tanto, los composites se muestran para indicar el patrón espacial de cambios en el nivel del mar asociado a cada WR, pero no su magnitud.

4.1 Verano

La figura 32 muestra las anomalías de altura de nivel del mar asociados a los WRs de verano mostrados en la figura 3. Claramente, se observa una acumulación de agua en el Río de la Plata y zona costera atlántica para el WR3, caracterizado por fuerte vientos del suroeste. El caso opuesto se da para el WR2, caracterizado por vientos del noreste

asociados a un anticiclón sobre el Atlántico. Los otros WRs tiene impactos de menor magnitud sobre la costa uruguaya.

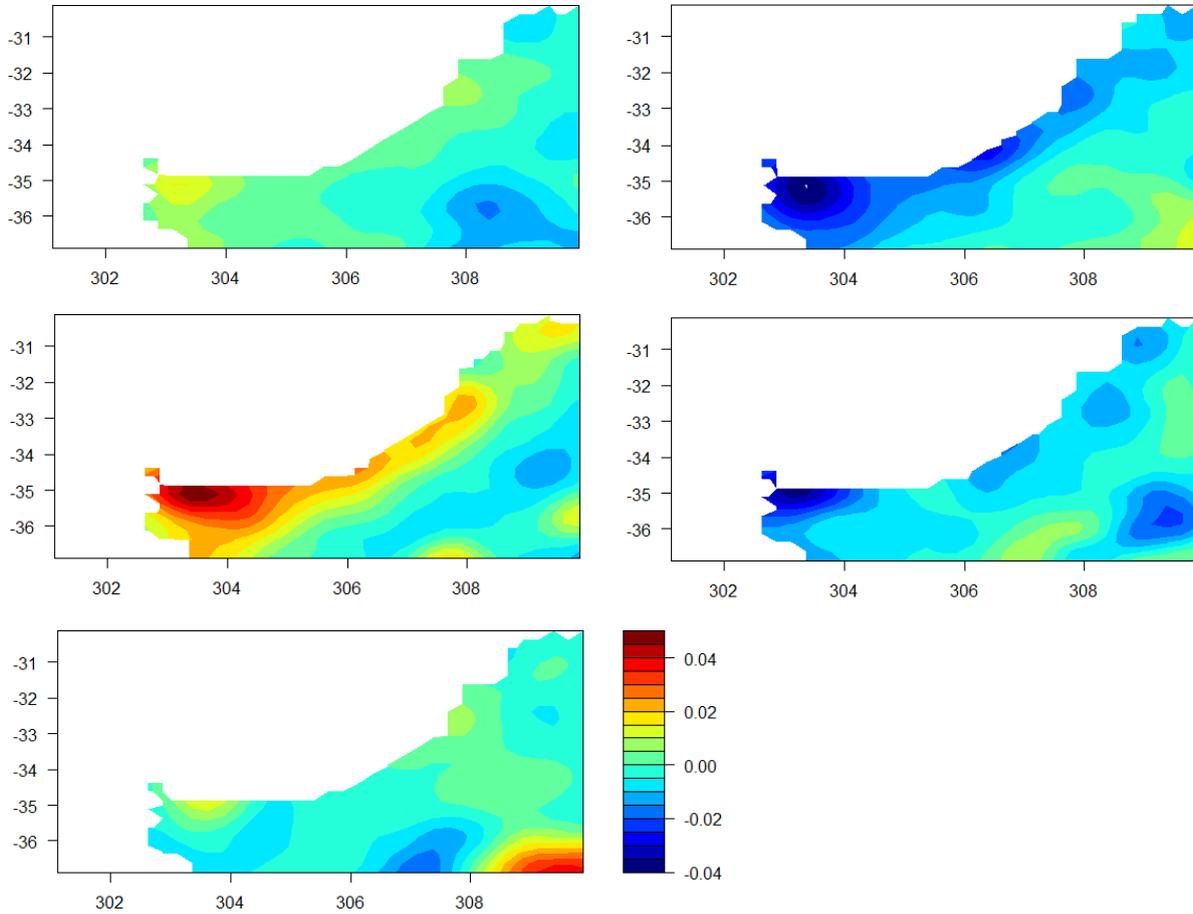


Figura 32 – Composite de anomalía de altura de nivel del mar asociados a los WRs de verano.

4.2 Otoño

En el caso de otoño la figura 33 muestra los patrones de anomalía de altura de nivel del mar para cada uno de los WRs mostrados en la figura 10. Al igual que en verano cuando el WR tiene vientos de componente sur tiende a apilar agua en el Río de la Plata y costa atlántica uruguaya, mientras que cuando tiene componente norte se observa un descenso del nivel del mar contra la costa. Las diferencias en la respuesta del nivel del mar está asociada a la ubicación precisa de los centros de alta y baja presión que caracterizan a los WRs.

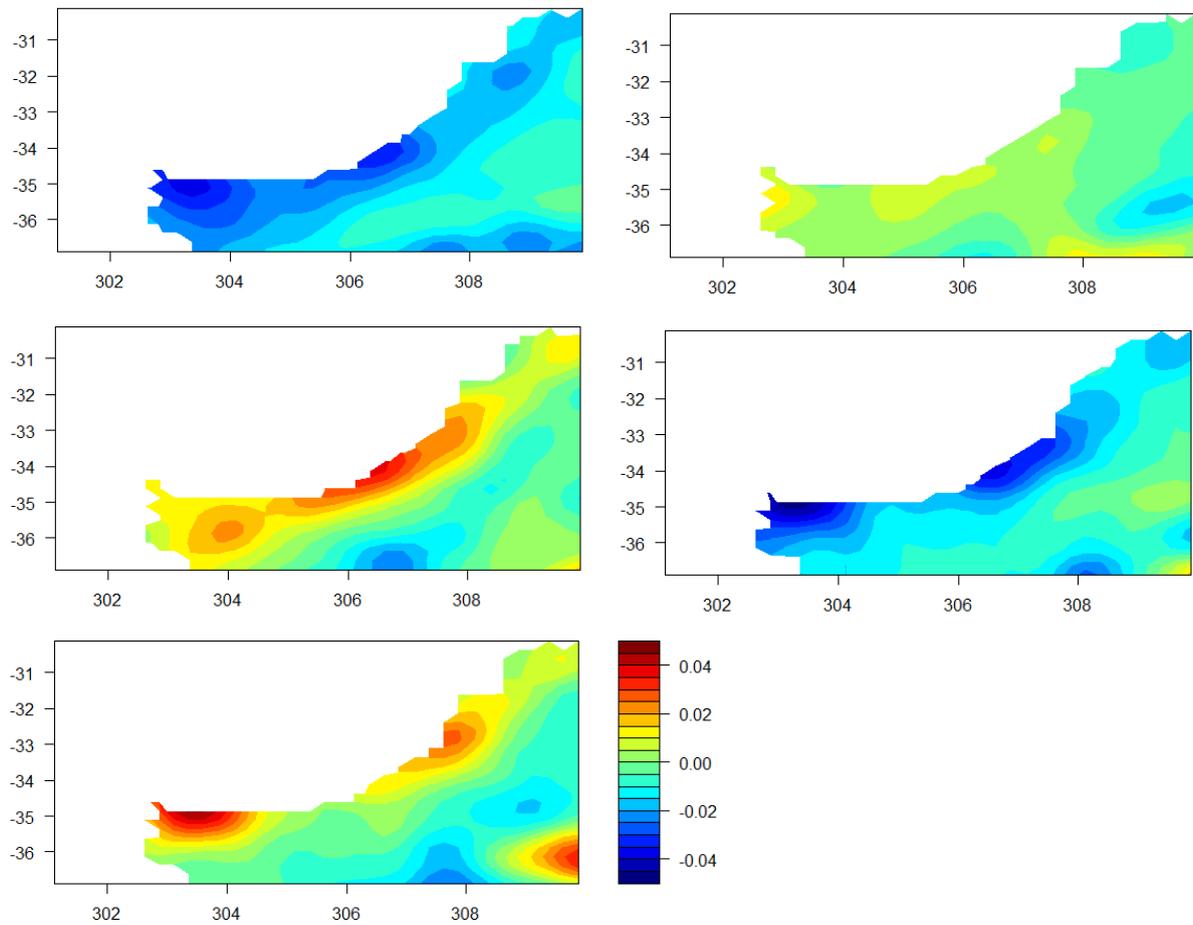


Figura 33 – Composite de anomalía de altura de nivel del mar asociados a los WRs de otoño.

4.3 Invierno

Esta estación está caracterizada por la presencia de un mayor número de WRs, probablemente debido a la gran variabilidad atmosférica inherente del invierno. Los WR1 y WR3 están caracterizados por un anticiclón en el océano Atlántico que dan lugar a vientos con componente norte sobre nuestro país lo cual genera una disminución de la altura del nivel del mar contra la costa (ver figura 17). Notar que los vientos mas zonales de WR1 generan una mayor disminución en el Río de la Plata, mientras que los vientos más meridionales de WR3 concentran la disminución del nivel del mar en la costa atlántica, como es esperable de la respuesta del océano al esfuerzo de los vientos (figura 34).

Por el contrario, el WR7 está caracterizado por la presencia de un sistema de baja presión en el océano Atlántico lo cual genera vientos del suroeste y un aumento del nivel del mar contra la costa uruguaya.

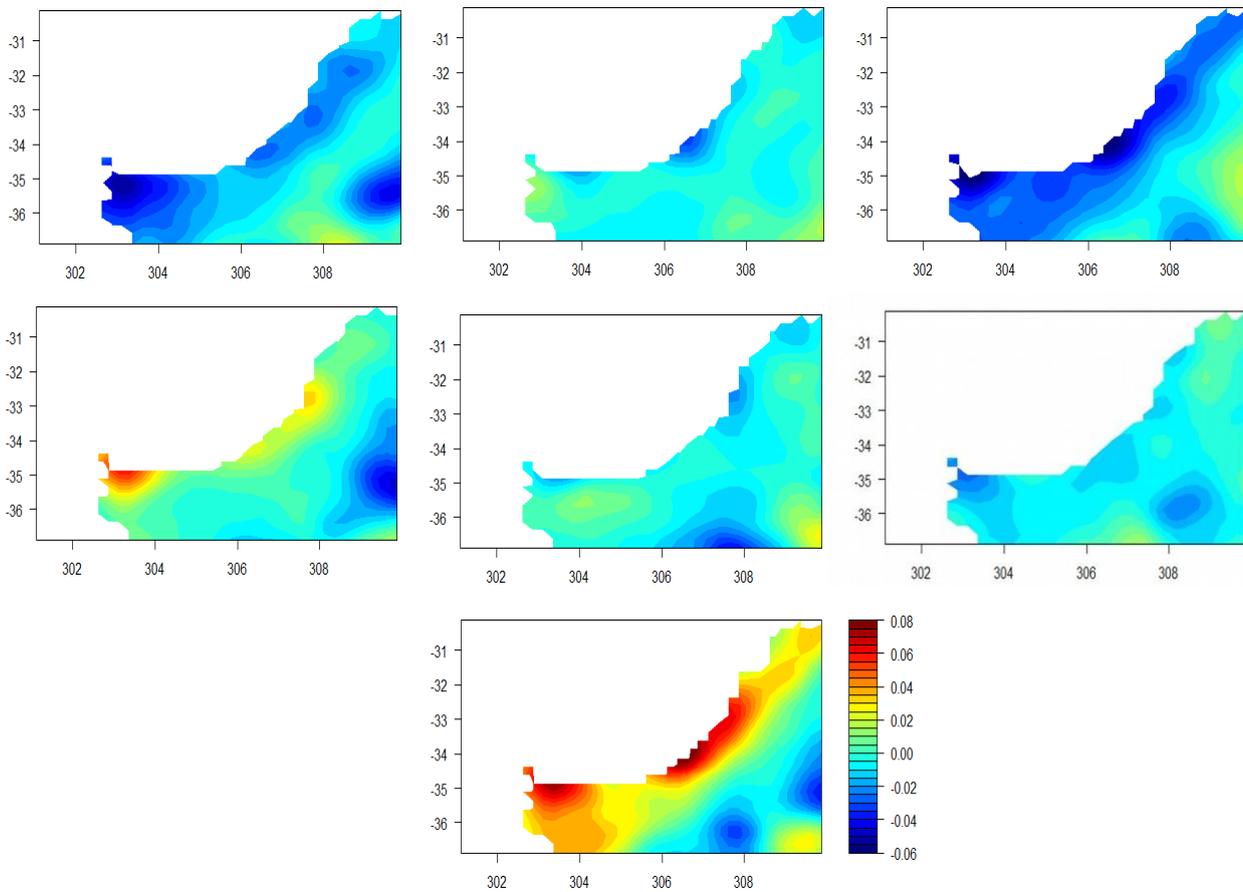


Figura 34 – Composite de anomalía de altura de nivel del mar asociados a los WRs de invierno.

4.4 Primavera

Esta estación es similar a verano. Se observa un aumento en el nivel del mar en el Río de la Plata asociado al WR3 que está caracterizado por un sistema de baja presión en el Atlántico (ver figura 24). Por otro lado, el WR5 está asociado a una disminución en la altura del nivel del mar en el Río de la Plata, debido a los vientos del noreste que caracterizan el anticiclón (figura 35).

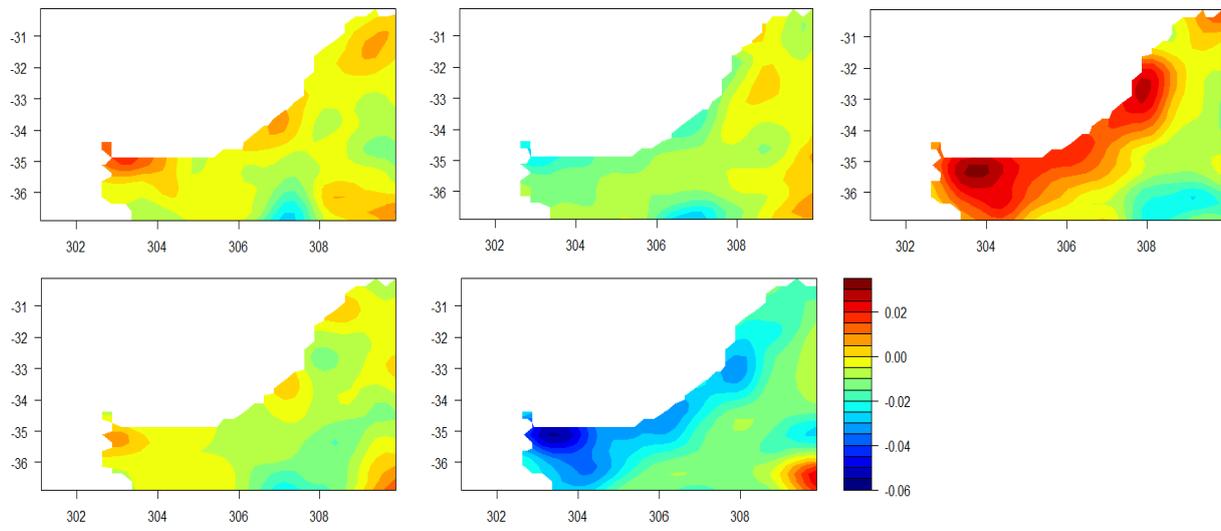


Figura 35 – Composite de anomalía de altura de nivel del mar asociados a los WRs de primavera.

5. Tendencias en la ocurrencia de regímenes de viento

Inspeccionando las curvas de frecuencia de ocurrencia de los WRs en las diferentes estaciones del año es posible notar que algunas de ellas exhiben tendencias tanto positivas como negativas. En esta sección se cuantifican estas tendencias para determinar si son significativas o no.

5.1 Verano

Durante esta estación los WR1 y WR2 mostraron tendencias significativas (figura 36); los otros WR no. El WR1 muestra una tendencia negativa, es decir, se observa que este régimen de viento ha mostrado un descenso en su frecuencia de ocurrencia anual: mientras que en la década del '50 el WR1 ocurría cerca de 25 días por temporada, en los últimos 10 años ocurre cerca de 18 días por temporada. Esto indica que durante verano hay una tendencia negativa en el desarrollo de sistemas de baja presión al sur de Uruguay.

Por otro lado, el WR2 muestra un aumento en la frecuencia de ocurrencia en las últimas décadas. Esto indica un corrimiento hacia el sur del anticiclón semipermanente sobre el Atlántico y por ende un corrimiento hacia el sur de los vientos del este. Este resultado es consistente con un aumento en los vientos con componente este durante verano, como se mostró en la figura 2.

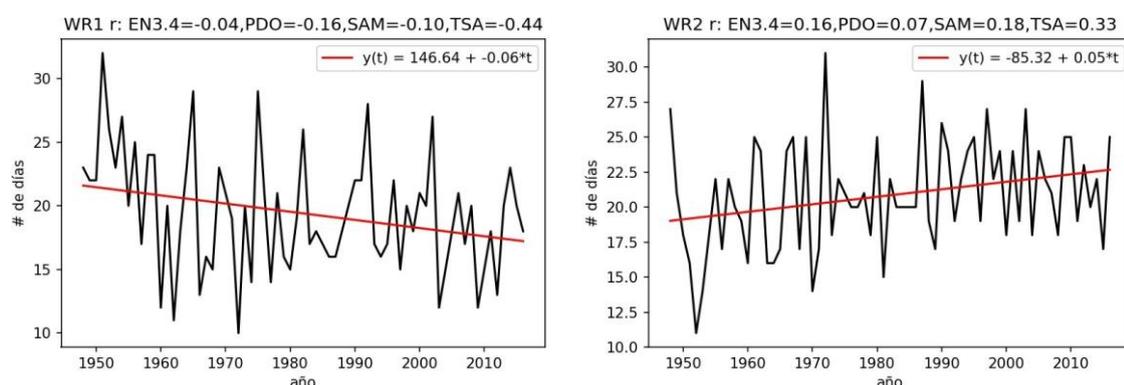


Figura 36 – Evolución interanual y tendencia en el número de días de ocurrencia de WR1 (izquierda) y WR2 (derecha).

5.2 Otoño

En esta estación WR2 mostró una tendencia negativa significativa (figura 37). Por lo tanto, esto indica que ha descendido el número de días por temporada en el cual se desarrollan sistemas de baja presión al sur de Uruguay, al igual que en verano. Asimismo, esto indica que ha habido una disminución en la frecuencia de ocurrencia de vientos con componente norte, lo cual es consistente con un aumento de los vientos de componente sur durante otoño (figura 2).

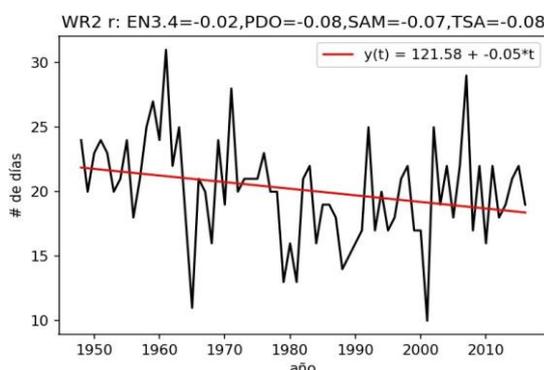


Figura 37 – Evolución interanual y tendencia en el número de días de ocurrencia de WR2.

5.3 Invierno

Tres de los siete regímenes de viento mostraron tendencias significativas durante invierno (figura 38). El WR1, que representa un anticiclón situado al sureste de nuestro país muestra una tendencia positiva. El WR7, que está caracterizado por una circulación ciclónica situada al sureste de Uruguay presenta tendencia positiva en su ocurrencia. Por último, el WR2, caracterizado por vientos del norte muestra una tendencia negativa. Estos cambios son consistentes con reducción de lluvias sobre Uruguay (principalmente al norte) durante el invierno y aumento en los vientos de componente sur.

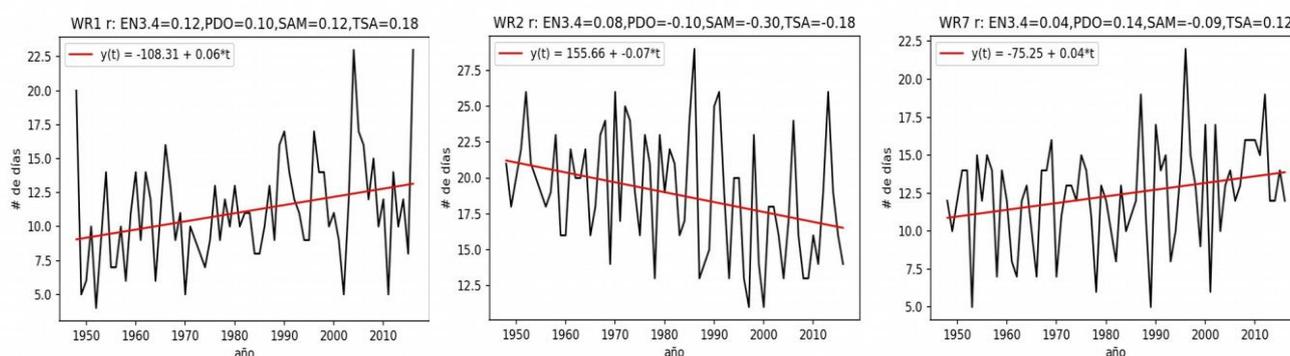


Figura 38 - Evolución interanual y tendencia en el número de días de ocurrencia de WR1 (izquierda), WR2 (centro) y WR7 (derecha).

5.4 Primavera

Durante primavera no se observan tendencias significativas en la frecuencia de ocurrencia de los regímenes de viento. Notar que en esta estación es mínima la tendencia en los vientos medios climatológicos (figura 2).

Referencias

- Arizmendi F., M. Barreiro, 2017: ENSO teleconnections in the southern hemisphere: A climate network view. Chaos 27, doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5004535>.
- Simionato, C., C. Vera, F. Siegmund, 2005: Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Rio de la Plata. J. Coastal Res. 21 (4), 770-783.