



CONVENIO PNUD-UDELAR Proyecto URU/18/002 “Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay”

Análisis de la proyección de los vientos sobre Uruguay para el siglo XXI

Marcelo Barreiro¹
Fernando Arizmendi^{1,2}, Nicolas Díaz¹, Romina Trinchin^{1,2}

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera
Instituto de Física, Facultad de Ciencias

²Instituto Uruguayo de Meteorología

Entregable 3

Agosto 2021

1. Introducción

En este Entregable nos centraremos en el estudio de los eventos de viento extremos ya que son los más destructivos y por ende tienen mayor impacto socio-económico. Las preguntas que queremos responder son (i) ¿ha cambiado la frecuencia de ocurrencia de los eventos extremos de viento? y (ii) ¿qué indican las proyecciones climáticas sobre estos eventos?

Los eventos extremos son por definición eventos que ocurren en forma esporádica y por lo tanto su estudio necesita de series largas de tiempo y de muy buena calidad. Los datos observados con los que contamos, del 2000 al 2020, representan un período demasiado corto para estudiar la variabilidad y su posible tendencia. Por lo tanto, para estudiarlos combinaremos los datos observados con un reanálisis atmosférico.

Los eventos de viento extremo están asociados a ciertas condiciones atmosféricas de mesoescala o sinóptica que son adecuadamente representadas por los reanálisis atmosféricos. Entonces, la metodología que utilizaremos en esta parte del trabajo tiene varios pasos que se resumen a continuación:

- (i) calcular los regímenes de circulación atmosféricos recurrentes para nuestra región a partir de datos de reanálisis
- (ii) asociar la ocurrencia de los extremos de viento observados a la ocurrencia de los diferentes patrones de circulación recurrentes durante el período de tiempo común.
- (iii) estudiar el cambio en la frecuencia de ocurrencia pasada de los regímenes de viento durante todo el período de tiempo disponible del reanálisis. Esto permite inferir un cambio en la ocurrencia de extremos de viento.
- (iv) estudiar el cambio proyectado en la frecuencia de ocurrencia de los regímenes de viento en los modelos climáticos de última generación. Esto permite inferir los cambios en los extremos de viento a futuro.

Los datos utilizados en este entregable se describen en la sección 3 del Entregable 2.

2. Patrones de circulación atmosférica recurrentes

Una forma de caracterizar la circulación atmosférica es a través de patrones regionales recurrentes. Es decir, la circulación regional, si bien es diferente para cada día, se puede clasificar como perteneciente a un número reducido de grupos con patrones similares. La metodología para encontrarlos se describe en detalle en informes anteriores preparados en el marco del Convenio con NAP-Costas y se encuentra también en Arizmendi et al (2021), por lo que no se repetirá aquí. En resumen, la metodología consta de un pre-procesamiento y del cálculo de los patrones. El pre-procesamiento de los datos incluye (i) cálculo de las anomalías diarias, (ii) remoción de la tendencia lineal, (iii) elección de la temporada del año (DEF, MAM, JJA, SON) y (iv) remoción de la variabilidad interanual restando la media estacional de ese año a los valores diarios. Con los datos obtenidos se calculan los regímenes de circulación realizando los siguientes pasos: (i) reducción de la

dimensión espacial a través del cálculo de componentes principales, conservando solamente los 10 primeros componentes que en todos los casos explican el 90% de la varianza total y (ii) uso de técnicas de análisis de clusters para encontrar los patrones más recurrentes. Este procedimiento es aplicado sobre el campo de presión a nivel del mar e identifica un número finito de patrones espaciales que son representativos de la circulación regional.

Los patrones recurrentes (WRs, por su sigla en inglés) se calculan para la región [90W-30W, 45S-15S] encontrándose que cinco patrones representan adecuadamente la variabilidad diaria durante primavera, verano y otoño. Estos patrones se muestran en la figura 2.1 donde se observa que haciendo foco en nuestro país están caracterizados por (WR1) viento norte, (WR2) viento del noreste debido a la presencia de un anticiclón ubicado en el Atlántico, (WR3) viento del suroeste asociado a un ciclón en el Atlántico, (WR4) viento sur, y (WR5) zona frontal y desarrollo de un sistema de baja presión. La configuración de cada patrón sugiere que el patrón 3 inducirá vientos sostenidos intensos de escala sinóptica sobre todo el país, mientras que los otros patrones pueden generar vientos intensos pero además propician y organizan la convección y tendrán vientos extremos asociados a sistemas de mesoescala.

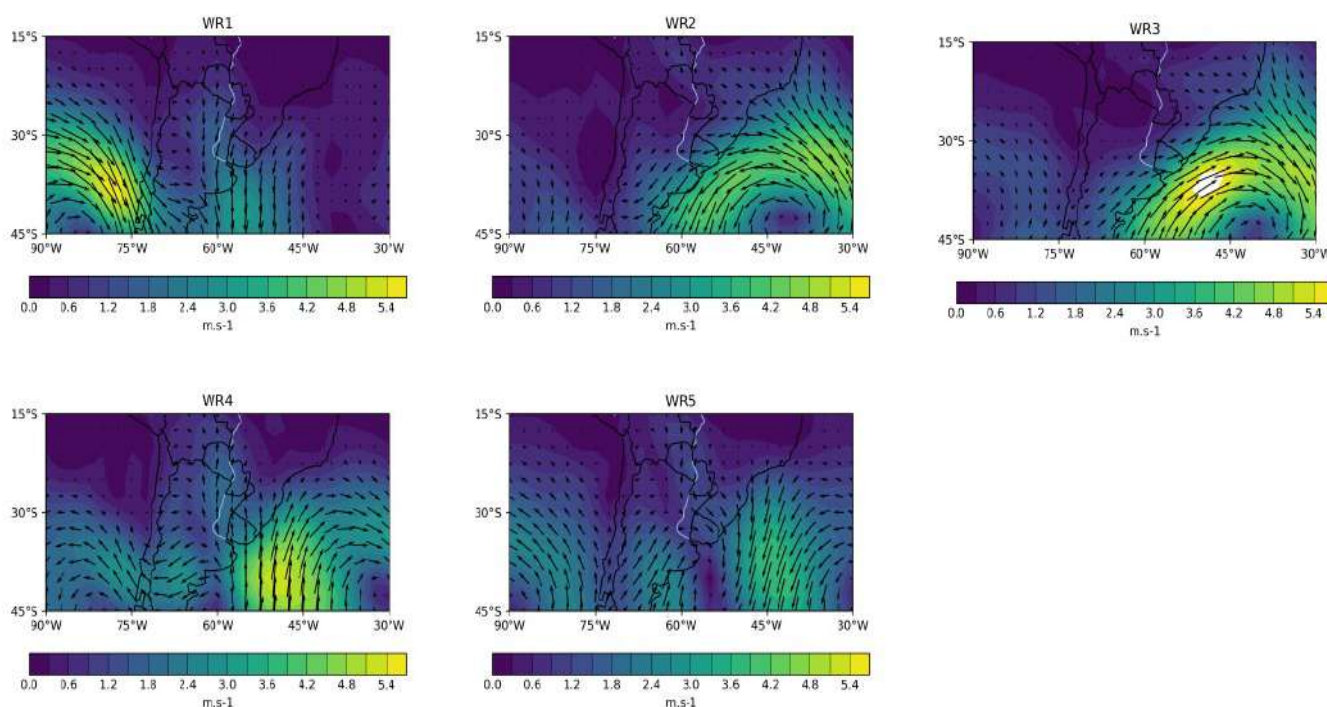


Figura 2.1 – Patrones de circulación recurrentes (WRs) para las temporadas de primavera, verano y otoño.

Durante invierno la metodología utilizada encuentra siete patrones recurrentes, en lugar de cinco, posiblemente debido a la mayor variabilidad atmosférica durante esta temporada (figura 2.2). Cinco de los patrones son muy parecidos a los de las otras temporadas del

año, mientras que los dos nuevos patrones están caracterizados por vientos del noroeste y del sur, respectivamente.

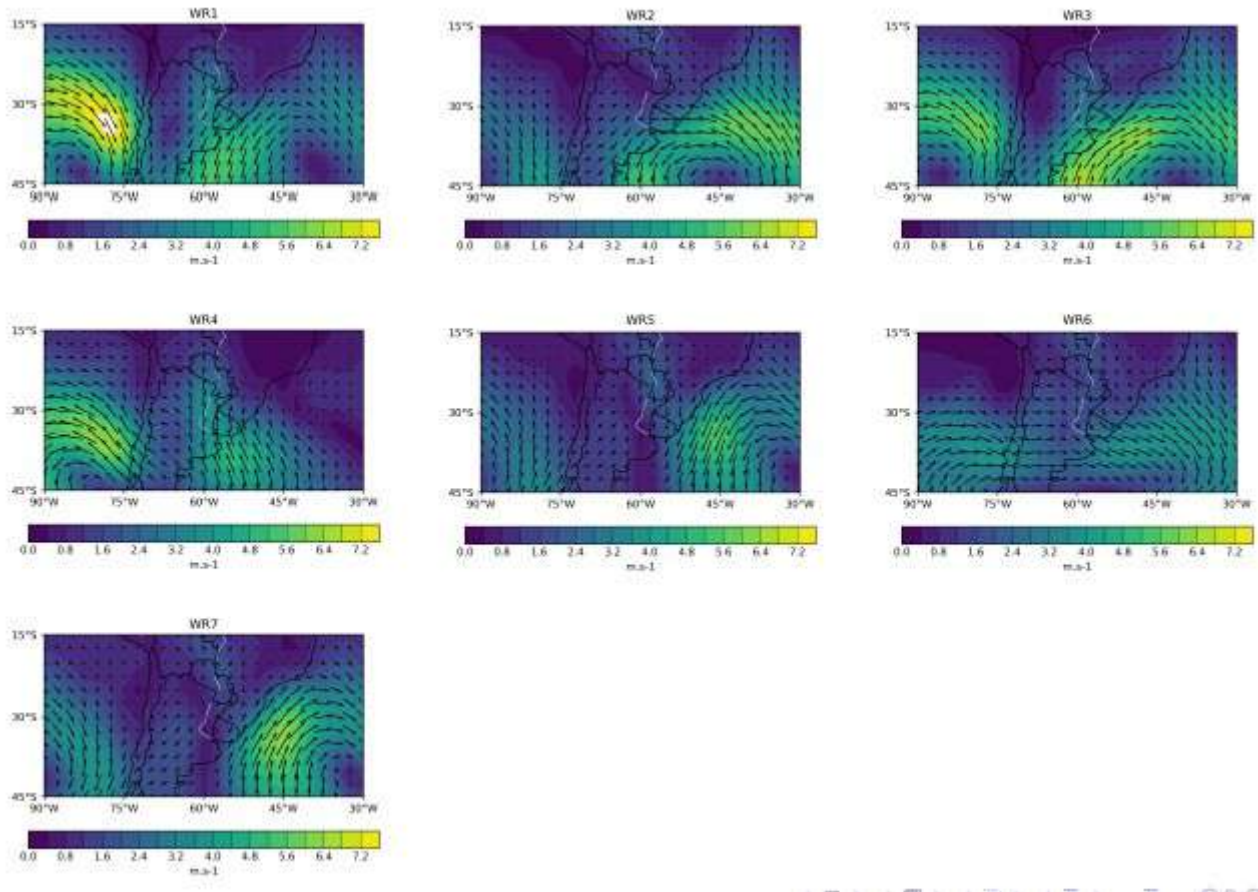


Figura 2.2– Patrones de circulación recurrentes (WRs) para las temporadas de invierno.

La frecuencia de ocurrencia de cada WR es diferente y varía año a año debido, por un lado, a la variabilidad regional intrínseca de la atmósfera y, por otro lado, al impacto de modos de variabilidad climáticos globales como El Niño-Oscilación Sur, el Modo Anular del Sur y la Oscilación Decadal del Pacífico que modulan la circulación regional. Si existe, la señal del cambio climático se encontrará inmersa bajo esa gran variabilidad.

La figura 2.3 muestra la frecuencia de ocurrencia de cada WR para verano e invierno calculada en base a la correlación espacial de cada patrón con el reanálisis de ERA5. Por ejemplo, se observa que durante verano el WR2 es el patrón más frecuente, con una mediana de 22 días ocurrencia por año, pero existen años en los que ocurre solamente 16 días, mientras que en otros ocurre 34 días. En invierno, por otro lado, WR1 y WR3 son los patrones más frecuentes.

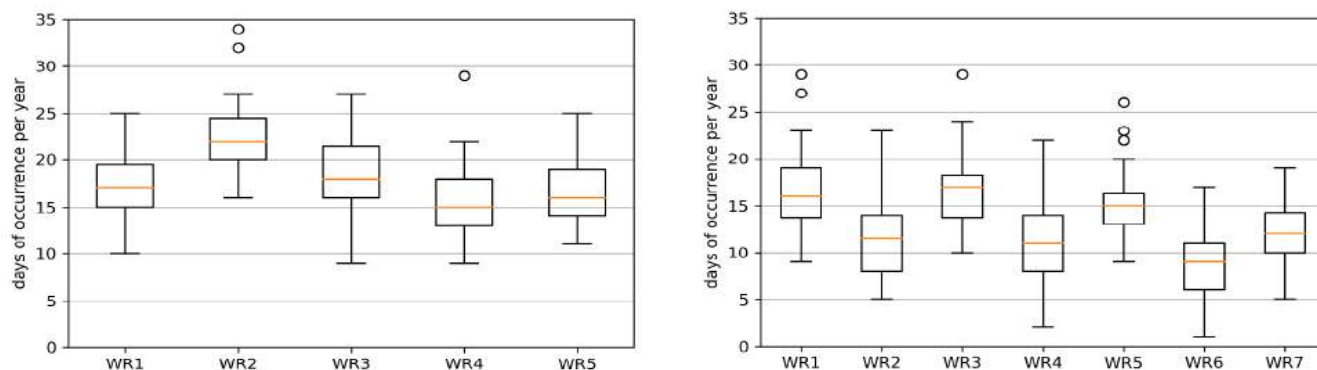


Figure 2.3 – Diagrama de cajas mostrando la variabilidad interanual del número de días con ocurrencia de cada WR durante verano (izquierda) e invierno (derecha). Los bigotes indican los puntos extremos de la distribución y los círculos indican valores atípicos.

3. Relación de los patrones de circulación con los extremos de viento

En esta sección estudiamos la frecuencia de ocurrencia de extremos de viento en función de los patrones de circulación (WR). Es decir, usando el reanálisis ERA5 queremos responder las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el WR más asociado a eventos extremos de viento?
- Dado un WR, ¿cuál es la probabilidad de que ocurra un extremo de viento? Esta pregunta se diferencia de la anterior en que toma en cuenta la frecuencia de ocurrencia climatológica de cada WR.
- ¿Hay WRs específicos asociados a eventos extremos de viento de mayor duración?

Para realizar este análisis consideraremos un evento extremo de viento como aquel cuya intensidad es mayor al percentil 90 (p90) de la distribución horaria para cada temporada. El estudio se realizará considerando las 6 estaciones meteorológicas convencionales (Colonia, Prado, Carrasco, Rocha, Paysandú y Rivera). También se repite el análisis con los datos de las estaciones automáticas usando la intensidad de viento máxima (U_{\max}) considerando un evento extremo cuando el valor máximo diario de U_{\max} supera el p90. Debido a que las series son más cortas en este caso se calcula el p90 de todo el año.

Se utiliza p90 para definir los eventos de viento extremo debido a la corta duración de las series de tiempo observadas. Los valores de p90 para cada estación se muestran en la figura 4.27 y, si bien el valor depende de la ubicación, estos rondan los 13 nudos, es decir los 24 km/h. Si bien son valores no muy altos hay que considerar que estos son los vientos persistentes que, de acuerdo a lo estudiado anteriormente, tendrán asociados rachas cercanas a los 40-50 km/h. En la sección 4 estudiamos los eventos extremos de viento que superan el percentil 99 (p99) utilizando otra aproximación.

3.1 Verano

La figura 3.1 indica el porcentaje de ocurrencia de extremos de viento asociados a los diferentes WRs para las diferentes localidades de las estaciones convencionales. Se observa que en esta época del año los cinco WRs están asociados en forma similar a la ocurrencia de extremos de viento, estando todos cerca del 20%, siendo WR2 el patrón un poco más frecuente. Por otro lado, en el caso de las estaciones automáticas, si bien la estadística es mucho más reducida, se detecta un claro predominio del WR5 en la mayoría de las localidades, particularmente para Prado y Colonia, que son las que presentan mayor número de casos.

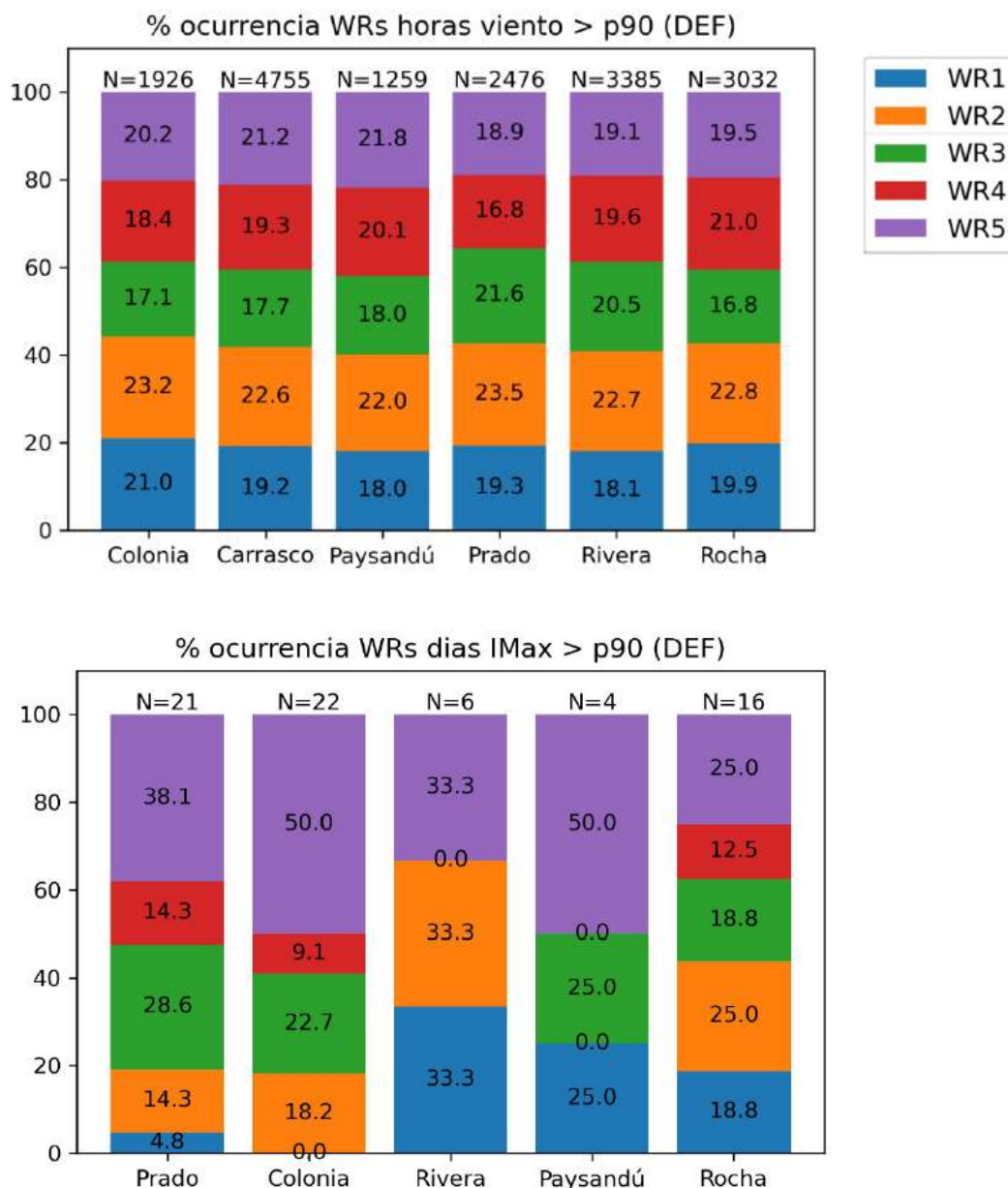


Figura 3.1 – Porcentaje de ocurrencia de eventos de viento extremo en función de los patrones de circulación (WR) para verano. (Arriba) estaciones convencionales, (abajo) estaciones automáticas. Se indica el número de casos (N) para cada estación.

En la figura anterior el WR2 es el patrón más asociado a eventos extremos de viento, pero también vimos de la figura 2.3 que es el patrón que más recurrente durante verano. Para tomar en cuenta la diferencia en la ocurrencia climatológica de los patrones, la figura 3.2 muestra la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo dado un determinado WR. Si bien las diferencias no son grandes, se observa una prevalencia de WR4 y WR5 en casi todo el país, siendo el WR1 también importante en Colonia y Rocha.

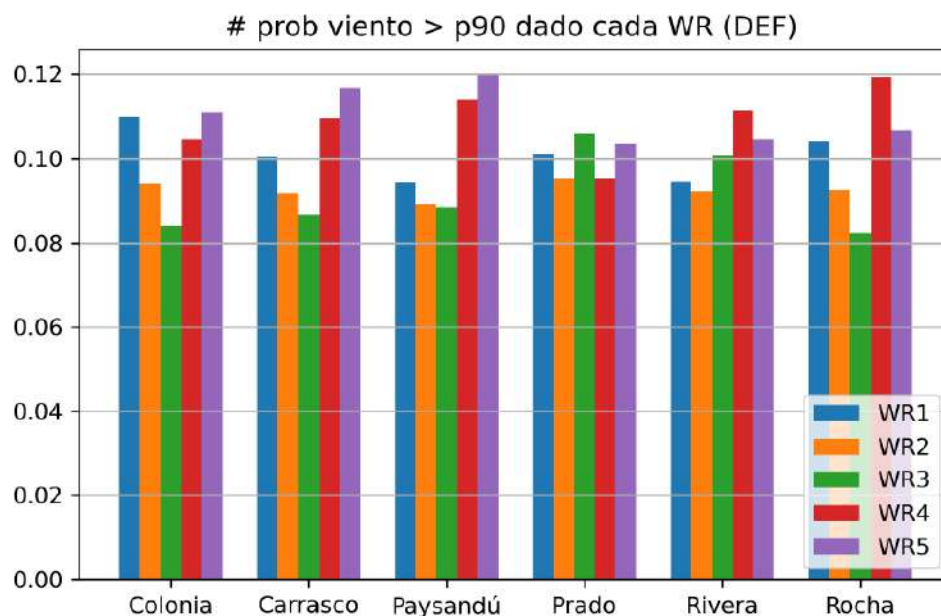


Figura 3.2 - Probabilidad de ocurrencia de un evento extremo dado un WR para las estaciones convencionales.

En cuanto a la duración de los eventos de viento extremo, la figura 3.3 divide el número de eventos en duraciones de 1 hora, de 2 a 5 horas, 6 a 10 horas, y más de 10 horas, para cada localidad. En general se encuentra un mayor número de eventos con duración de 1 hora y una disminución en la ocurrencia a medida que aumentamos la duración. Rocha tiene un claro comportamiento de este tipo. Sin embargo, Paysandú muestra un número similar de eventos de 1 hora y de 2 a 5 horas de duración, y un mayor número de eventos de 6 a 10 horas de duración con respecto a las otras localidades, todo lo cual indica una diferencia en la dinámica atmosférica que da lugar a los eventos de viento extremo. Paysandú muestra además una preponderancia de eventos de 1 hora asociados al WR4, mientras que en las otras estaciones WR2 es el más frecuente.

Como resumen, en esta estación se encuentra que los patrones recurrentes que tienen mayor probabilidad de generar vientos extremos están asociados al desarrollo de una zona frontal sobre nuestro país (WR5), viento sur debido fundamentalmente a la presencia de una circulación ciclónica sobre el Atlántico (WR4) y presencia de viento norte que trae humedad y aire cálido a la región (WR1). Por otro lado, el WR2 es el patrón más asociado a eventos extremos por su mayor ocurrencia climatológica.

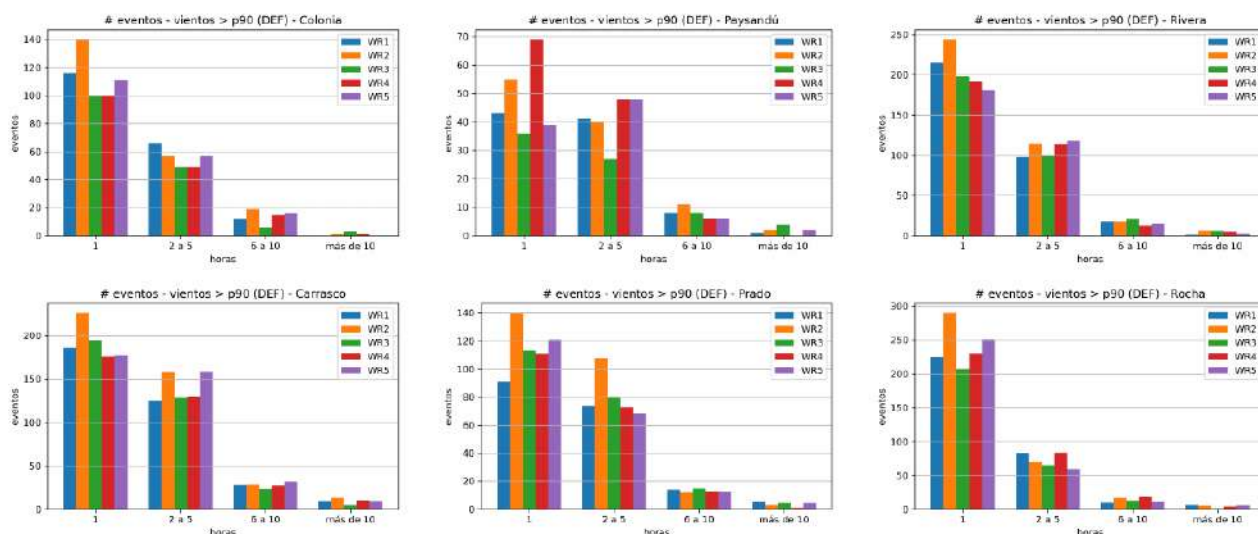
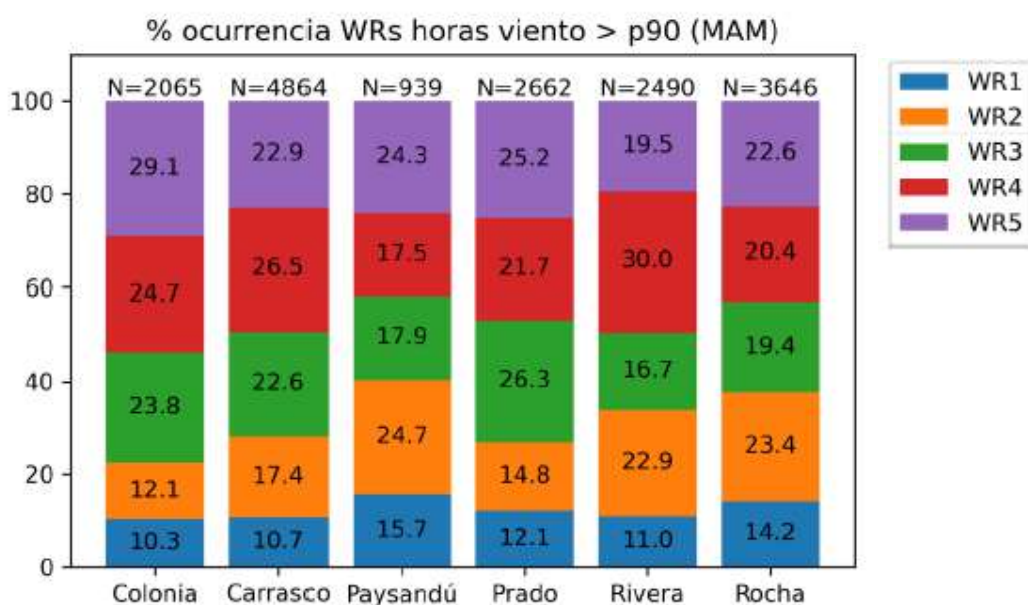


Figura 3.3 – Número de eventos de viento extremo divididos de acuerdo a su duración y su dependencia con los WRs, para las estaciones convencionales.

3.2 Otoño

A diferencia de verano, en otoño aparece una diferencia significativa en el porcentaje de los WRs asociados a los eventos extremos de viento. En general, se observa que los WR3, WR4 y WR5 son los más asociados a la ocurrencia de extremos. El WR2 también juega un rol importante en Paysandú, Rivera y Rocha (Figura 3.4), mientras que el WR1 presenta una baja asociación con extremos. Las estaciones automáticas en el sur del país muestran una clara dependencia de los extremos con la ocurrencia del WR5.



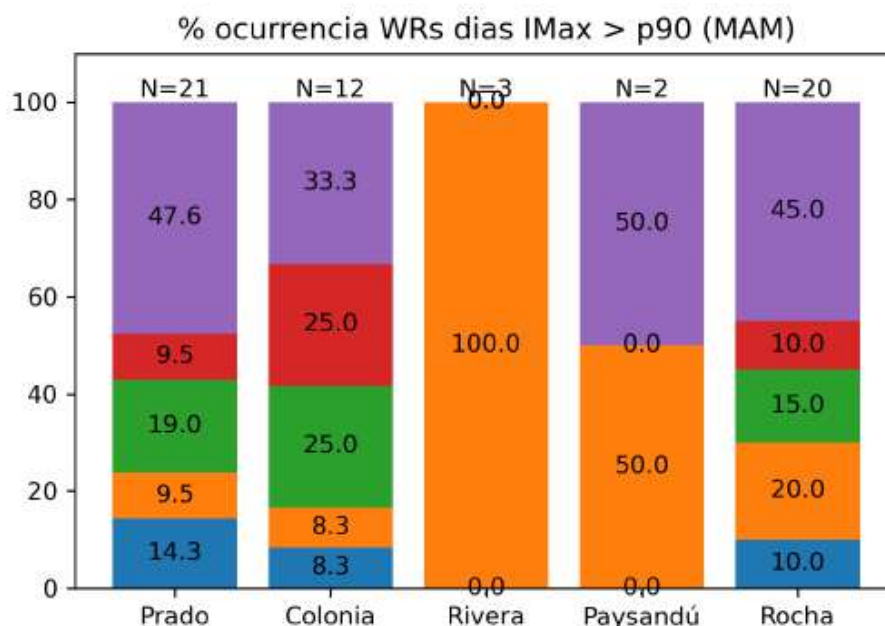


Figura 3.4 - Porcentaje de ocurrencia de eventos de viento extremo en función de los patrones de circulación (WR) para otoño. (Arriba) estaciones convencionales, (abajo) estaciones automáticas. Se indica el número de casos (N) para cada estación.

La ocurrencia de los WR3, WR4 y WR5 es la que tiene una mayor probabilidad de generar extremos de viento en la zona costera, excepto Rocha donde el WR2 también juega un rol (Figura 3.5). En Rivera, por otro lado, el WR4 tiene una probabilidad marcadamente más alta de generar extremos que los otros WRs.

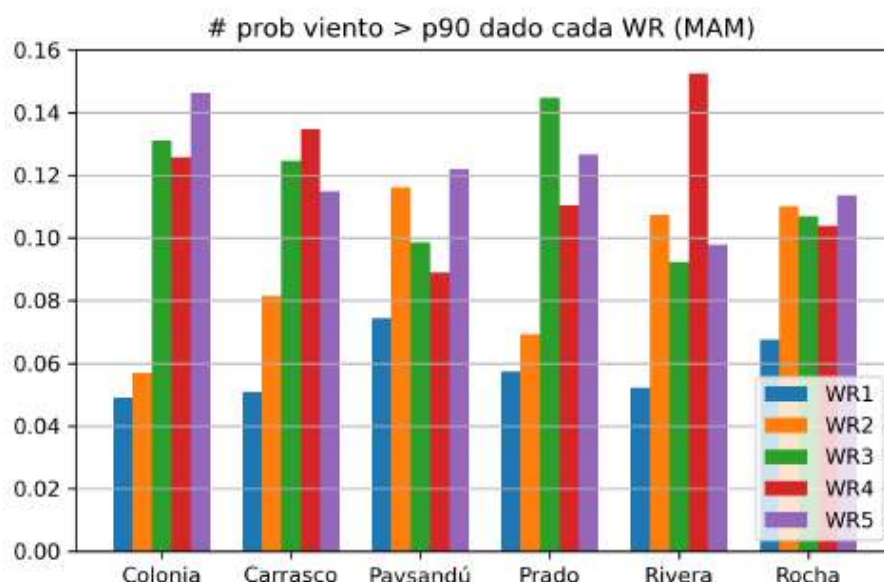


Figura 3.5 - Probabilidad de ocurrencia de un evento extremo dado un WR para las estaciones convencionales.

En cuanto a la duración de los extremos en Rocha y Colonia se observa una clara prevalencia de eventos de 1 hora frente a eventos más largos. En Colonia estos eventos ocurren principalmente durante los WR3, W4 y WR5, mientras que en Rocha la distribución es más uniforme. En las otras localidades, si bien hay más eventos de 1 hora, hay un número parecido de eventos de 2 a 5 horas. Se destaca el WR4 en Rivera, el WR2 en Paysandú y los WR2, WR4 y WR5 en Carrasco, como los patrones más asociados a eventos cortos.

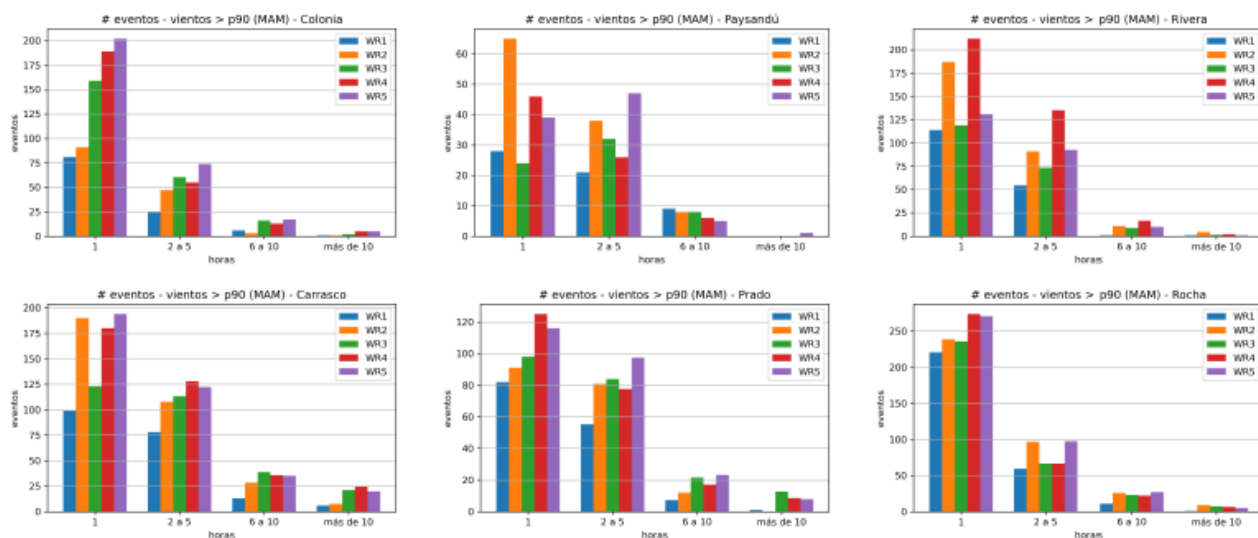


Figura 3.6 – Número de eventos de viento extremo divididos de acuerdo a su duración y su dependencia con los WRs, para las estaciones convencionales.

Como resumen, en esta temporada se encuentra que los patrones recurrentes que tienen mayor probabilidad de generar vientos extremos están asociados al desarrollo de una zona frontal sobre nuestro país (WR5), viento sur debido fundamentalmente a la presencia de una circulación ciclónica sobre el Atlántico (WR4) y presencia de una circulación en el Atlántico (WR3).

3.3 Invierno

Esta temporada del año está caracterizada por 7 WRs, debido a su mayor variabilidad atmosférica. Se destaca sin embargo la importancia del WR3 en la ocurrencia de eventos de viento extremo tanto para las estaciones convencionales como para las automáticas (Figura 3.7). Los otros WRs tienen una participación sustancialmente menor en la generación de extremos. El único caso que rompe esta regla es la estación automática de Paysandú, pero tiene muy pocos casos por lo que la estadística no es robusta.

También se observa que la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo de viento es máxima para WR3 en todas las localidades. El WR4, caracterizado por viento sur, también tiene alta probabilidad de generar eventos extremos (Figura 3.8). En general, el WR1 es el menos asociado a eventos extremos en esta temporada.

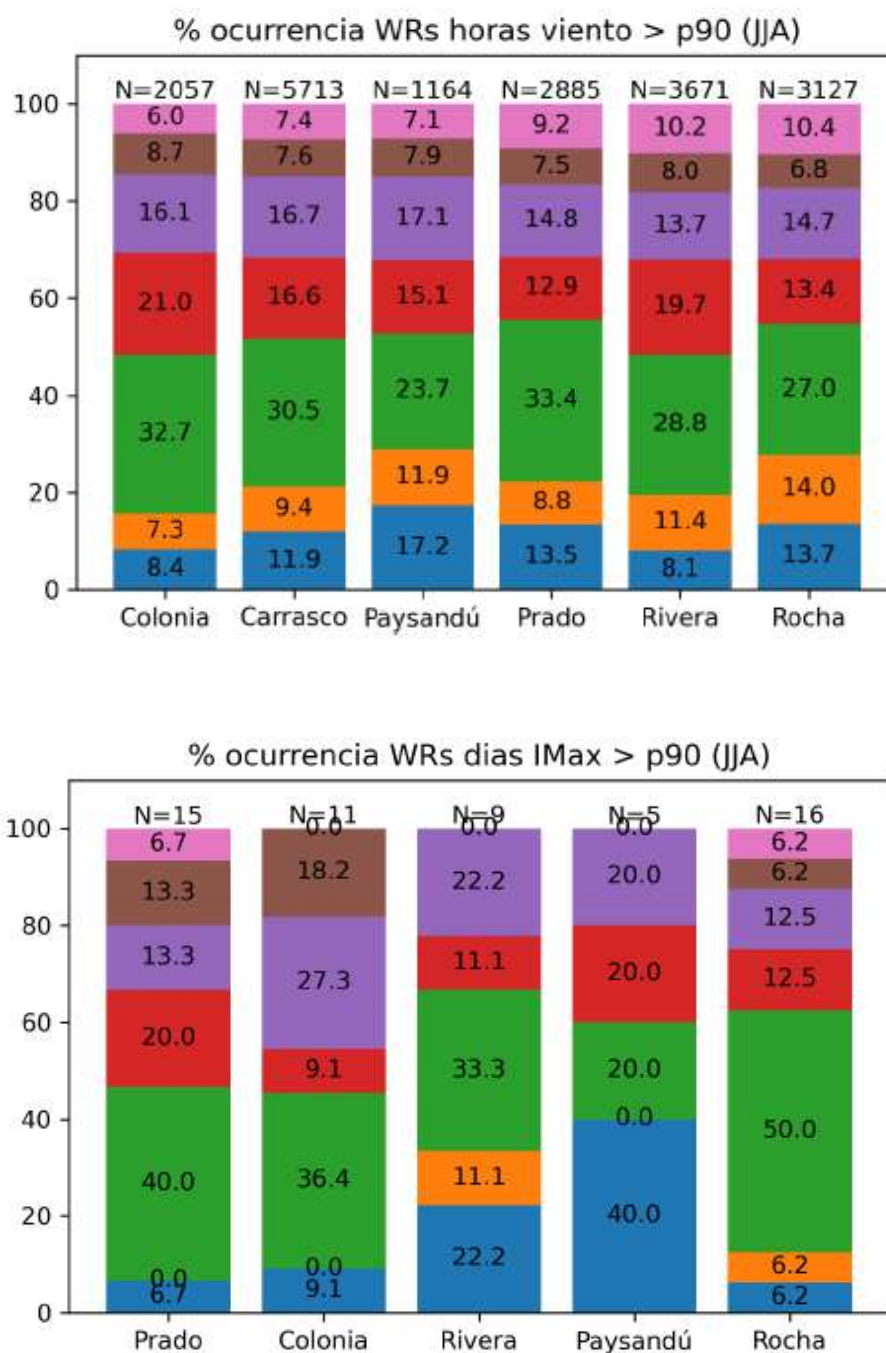


Figura 3.7 - Porcentaje de ocurrencia de eventos de viento extremo en función de los patrones de circulación (WR) para invierno. (Arriba) estaciones convencionales, (abajo) estaciones automáticas. Se indica el número de casos (N) para cada estación.

En cuanto a duración, el WR3 también se destaca en todos los rangos considerados en todas las localidades. Se observa además la alta ocurrencia de eventos extremos de larga duración (6 a 10 horas) asociados al WR3, con máximo en Carrasco.

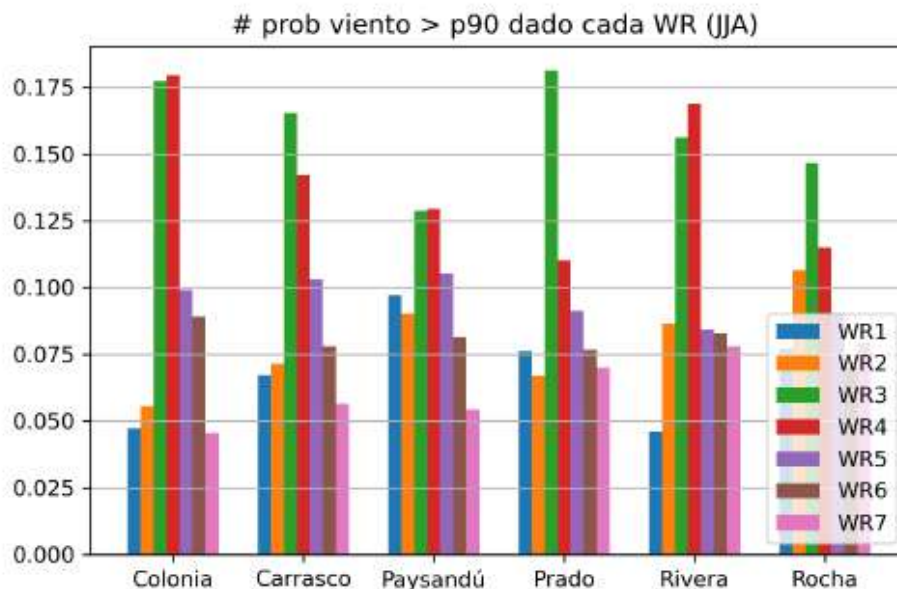


Figura 3.8 - Probabilidad de ocurrencia de un evento extremo dado un WR para las estaciones convencionales.

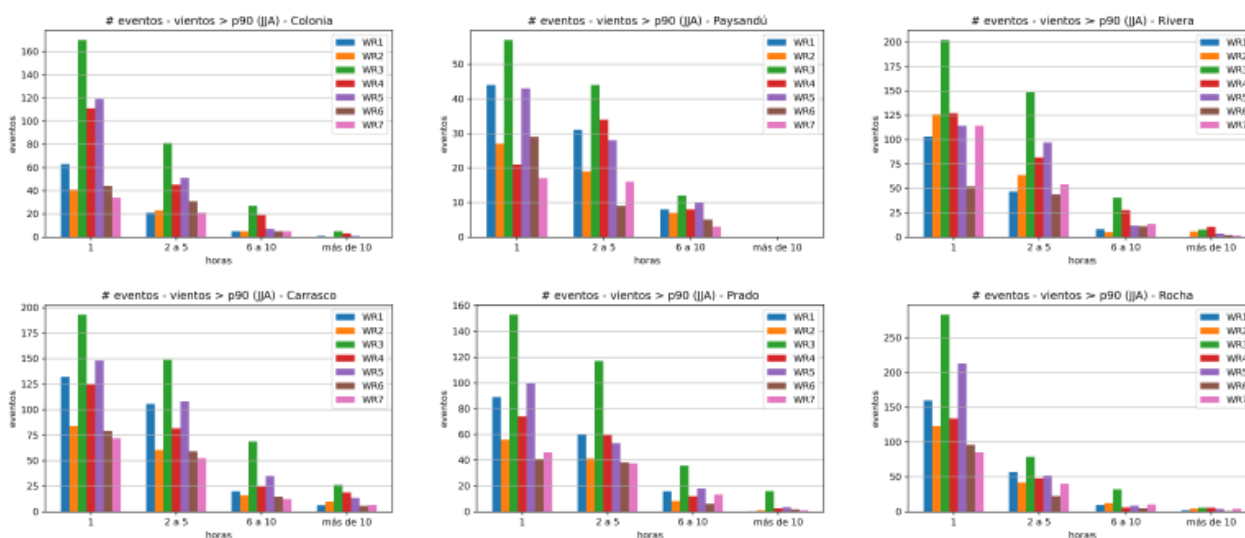


Figura 3.9 – Número de eventos de viento extremo divididos de acuerdo a su duración y su dependencia con los WRs, para las estaciones convencionales.

Como resumen, en esta temporada se encuentra que WR3 es el patrón recurrente que domina la ocurrencia de eventos extremos de viento en todo el país. Este resultado es esperable debido a que en invierno existe una zona de máxima ciclogénesis situada en las costas de nuestro país, lo cual favorece el desarrollo de ciclones extratropicales intensos. La ocurrencia de viento sureste (WR4) también está asociada a la presencia de eventos extremos.

3.4 Primavera

En esta temporada varios patrones de circulación generan extremos (figura 3.10). Colonia, Carrasco y Paysandú tienen una mayor ocurrencia de eventos extremos bajo condiciones del WR5, es decir con el desarrollo de un sistema de baja presión sobre el país con centro en la zona costera. Por otro lado, Rivera tiene mayor influencia del WR3 y WR4, Rocha del WR2 y Prado del WR2, WR3 y WR5. En las estaciones automáticas con mayor número de casos hay una prevalencia de los WR3 y WR5, excepto Rocha donde el WR2 también muestra un porcentaje alto.

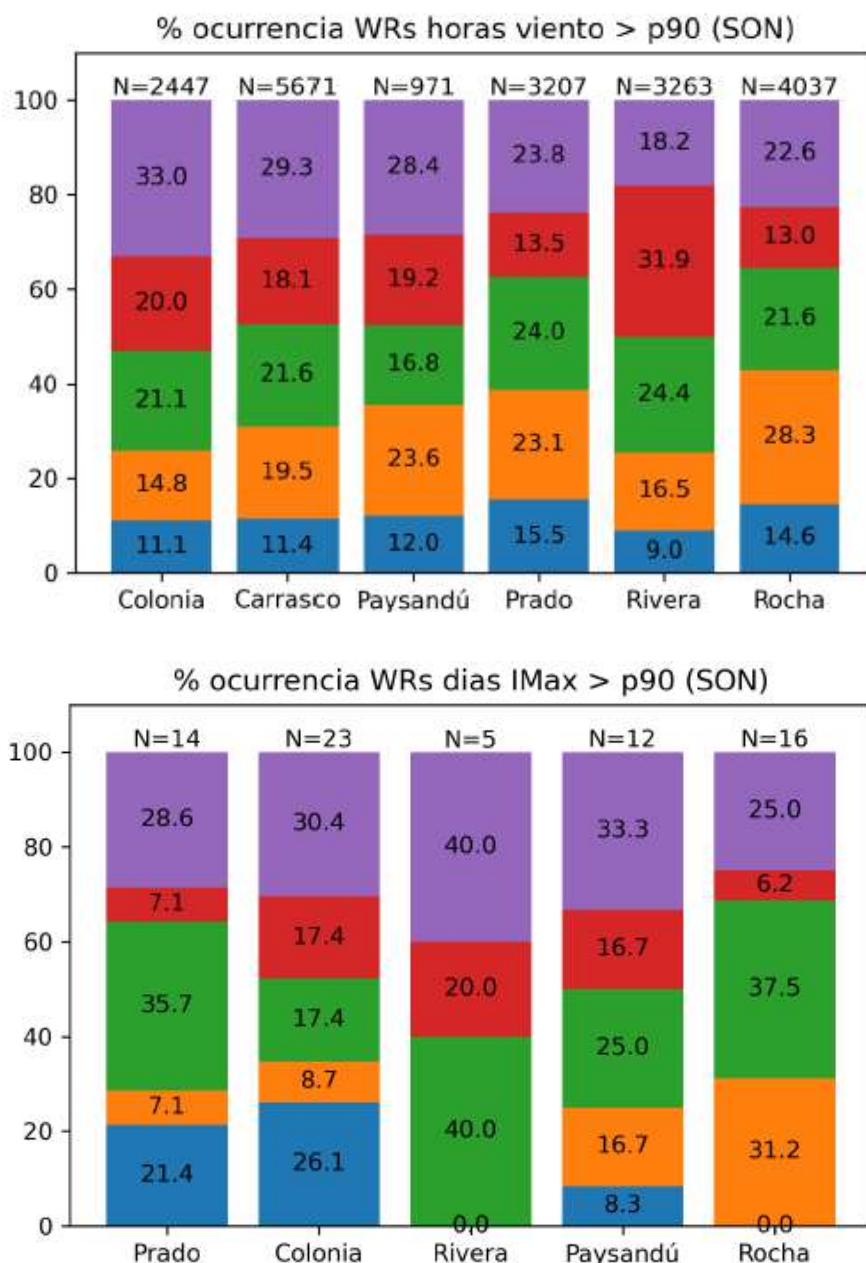


Figura 3.10 - Porcentaje de ocurrencia de eventos de viento extremo en función de los patrones de circulación (WR) para primavera. (Arriba) estaciones convencionales, (abajo) estaciones automáticas. Se indica el número de casos (N) para cada estación.

La importancia del WR5 en la generación de eventos extremos también se observa en la figura 3.11 en la mayoría de las localidades, pero en particular en Colonia, Carrasco y Paysandú. En Rivera la mayor probabilidad de ocurrencia de un evento extremo de viento se da bajo condiciones de WR4, mientras que WR5 es significativamente menos importante.

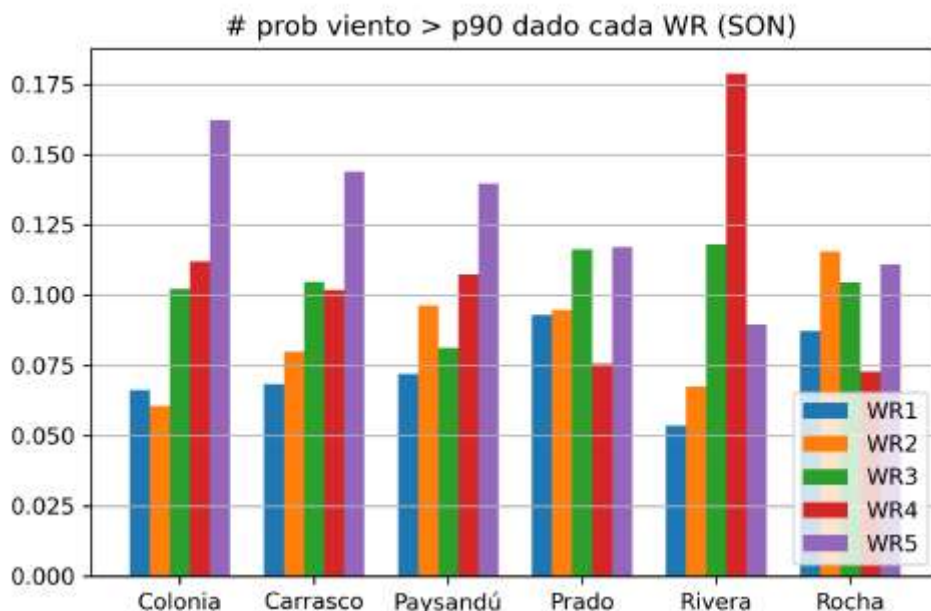


Figura 3.11 - Probabilidad de ocurrencia de un evento extremo dado un WR para las estaciones convencionales.

Rocha es la localidad que muestra un mayor número de eventos extremos de 1 hora y como en otras temporadas la mayor diferencia entre el número de eventos de 1 hora y eventos que duran 2 a 5 horas. El WR5 se destaca en Colonia, Paysandú y Carrasco para los eventos de pocas horas de duración, con WR2 también siendo muy importante en Paysandú. Carrasco es la localidad con mayor número de eventos de larga duración (más de 6 horas) siendo WR5 el patrón que genera en forma más frecuente este tipo de eventos.

Como resumen, en esta temporada se encuentra que WR5 juega un rol importante en la generación de extremos de viento en el sur y litoral del país, mientras que el WR3 se vuelve importante en el este. En el norte el WR4 domina la ocurrencia de eventos extremos. Estos WR representan el desarrollo de un sistema de baja presión sobre el país, un ciclón situado en el océano Atlántico y la presencia de viento sur asociado al ingreso de un sistema de alta presión por el oeste, y la presencia de un ciclón situado al este en la cuenca oceánica. Es bueno resaltar que los tres patrones describen una secuencia típica en la evolución de la circulación regional, es decir una transición entre patrones que sigue el orden de WR5 → WR3 → WR4.

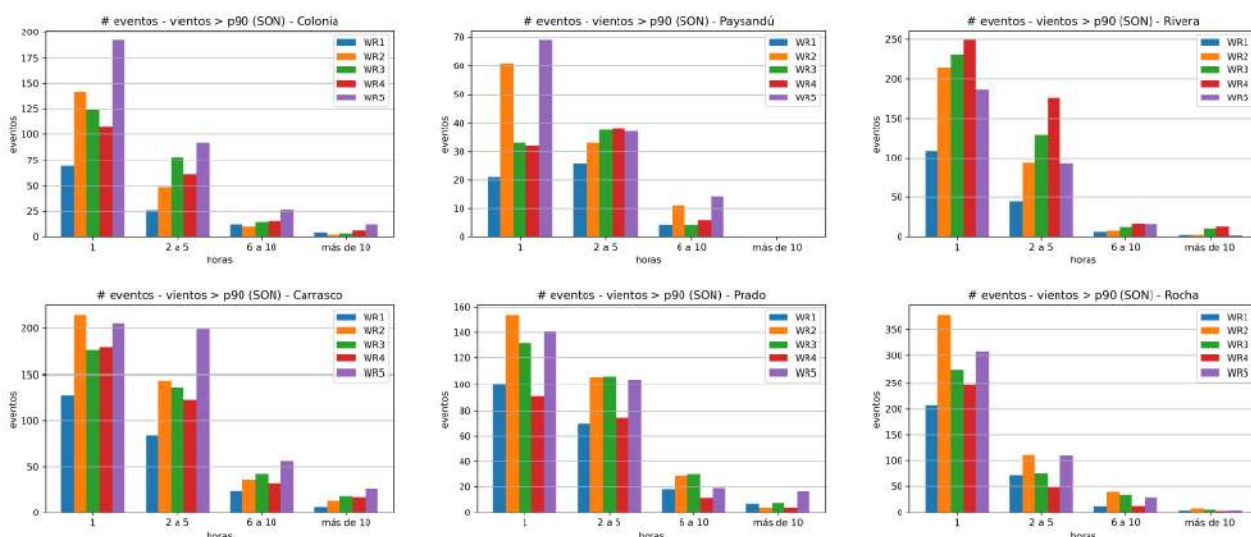


Figura 3.12 – Número de eventos de viento extremo divididos de acuerdo a su duración y su dependencia con los WRs, para las estaciones convencionales.

La tabla 3.1 resume la asociación encontrada en esta sección entre extremos de viento y patrones de circulación recurrentes

	DEF	MAM	JJA	SON
WR1	X			
WR2	Pos		Pos	X
WR3		X / Pos	X / Pos	X
WR4	X	X	X / Neg	X
WR5	X / Neg	X / Neg	Neg	X
WR6				
WR7				

Tabla 3.1 – Se indica con X la asociación entre WRs y eventos extremos de viento definidos como aquellos valores superiores al p90. Asimismo, se indica con las letras **Pos** (**Neg**) si el WR tuvo una tendencia positiva (negativa) estadísticamente significativa en el período 1948-2018.

4. Eventos más extremos de viento

En la sección anterior definimos extremos de viento basados en el p90 de la distribución de viento horaria. En esta sección consideraremos los eventos más extremos, definidos como aquellos cuyo valor de intensidad supera el percentil 99 (p99) de la distribución. Como mencionamos antes, dada la relativamente corta extensión de la serie, los casos

que superan el p99 son pocos y para estudiarlos usamos otra aproximación. En particular, estudiaremos los eventos p99 de la serie horaria de vientos en ERA5 ya que este reanálisis cubre el período 1979-2020 lo cual permite tener una estadística mayor.

En el Entregable 2 validamos ERA5 basado en algunas estadísticas, entre ellos comparando los valores de los percentiles de la distribución del reanálisis con los observados (Figuras 3.26 y 3.27 del Entregable 2) encontrándose que ERA5 representa adecuadamente el p90 observado. En vista de eso, como segundo paso de validación, determinamos la relación entre los eventos de viento extremo p90 en los puntos de grilla de ERA5 más cercanos a las 6 localidades con los patrones recurrentes (WRs) durante 2000-2020. Los resultados se muestran en la figura 4.1 y deben ser contrastados con los paneles superiores de las Figuras 3.1, 3.4, 3.7 y 3.10.

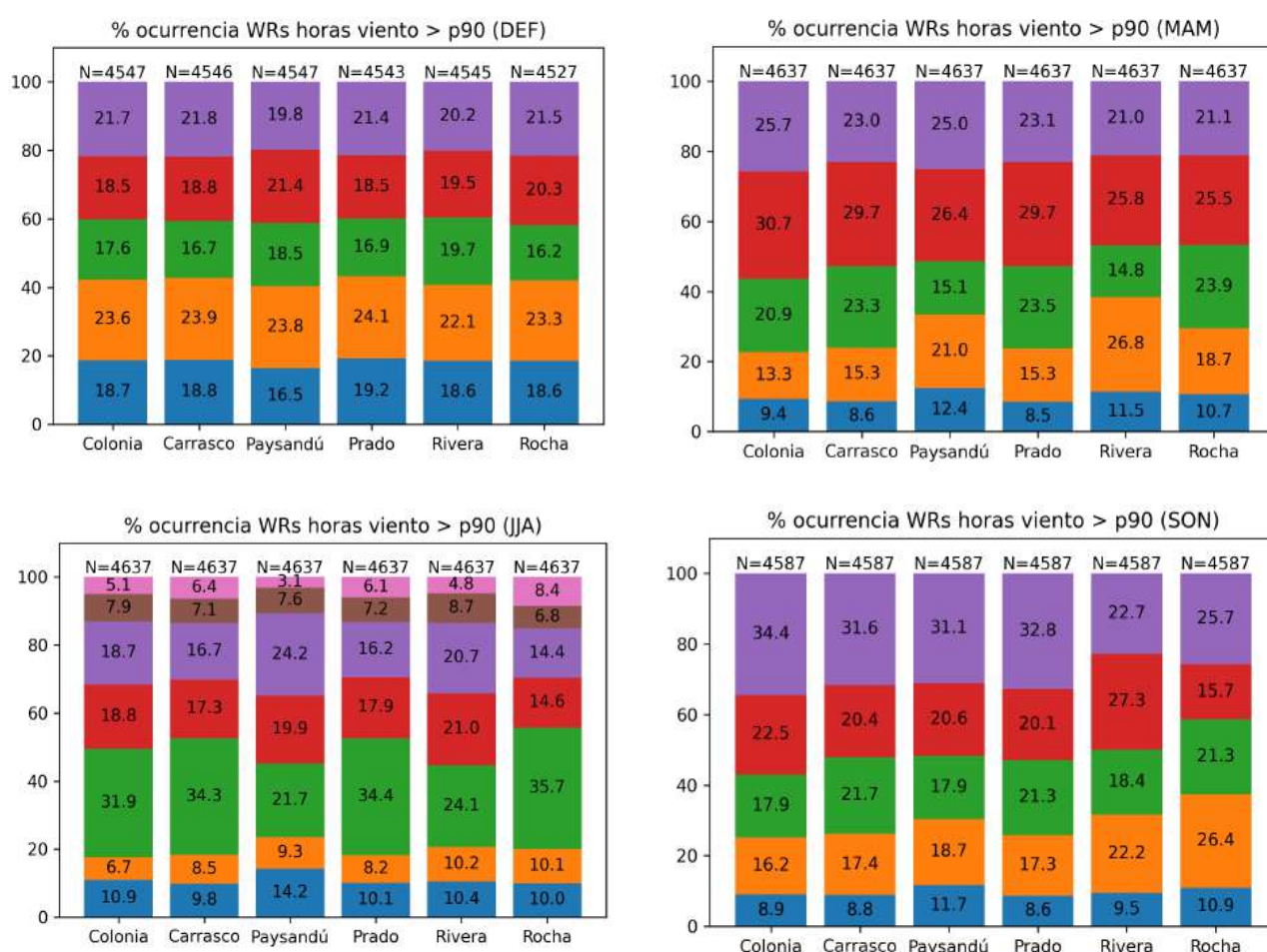


Figura 4.1 - Porcentaje de ocurrencia de eventos de viento extremo (p90) en función de los patrones de circulación (WR) para las 4 temporadas del año para el reanálisis ERA5. Se consideran los puntos de grilla más cercanos a las localidades indicadas.

En general el reanálisis ERA5 logra asociar correctamente los extremos de viento p90 con los patrones recurrentes. En particular,

(i) en verano, al igual que en observaciones, se observa que no existe ningún WR que sea dominante en la generación de extremos de viento, siendo el WR2 el más frecuente con cerca de 23% en todas las localidades.

(ii) en otoño, el WR1 pierde relevancia y aumenta la del WR4 con respecto al verano, al igual que en observaciones. Asimismo, el WR2 mantiene su importancia en Paysandú, Rivera y Rocha, mientras que el WR3 está menos asociado a eventos extremos en el norte del país.

(iii) en invierno, al igual que en observaciones, domina el WR3 en todas las localidades seguido por el WR4 y WR5.

(iv) en primavera el WR5 toma mayor importancia en la generación de vientos extremos en el sur y litoral, al igual que en observaciones, mientras que en Rivera domina el WR4 y en Rocha el WR2.

La muy buena representación de ERA5 de los extremos de viento p90 permite considerar ahora los eventos más extremos, considerados como aquellos vientos horarios que superan el p99 en ERA5, durante todo el período 1979-2020. Si bien los resultados se basan solamente en datos de reanálisis, son una buena aproximación al comportamiento esperable en la región, y permiten superar el escollo de la corta duración de las series observadas para estudiar los vientos más destructivos.

La figura 4.2 muestra la frecuencia de ocurrencia de estos eventos en función de los patrones recurrentes, mientras que la figura 4.3 indica la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo de viento p99 dado un determinado WR. Se observan varias diferencias con respecto a los vientos extremos p90. Por ejemplo,

(i) en verano, los vientos más extremos (p99) están asociados a los patrones WR3, WR4 y WR5. Mientras que en la mayor parte del país hay mayor probabilidad de un evento de viento extremo dado el WR4, en Rocha el WR3 domina.

(ii) en otoño, el WR3 y WR5 aumentan su importancia en detrimento del WR4, y son los patrones que dan una mayor probabilidad de evento extremo.

(iii) en invierno, si bien el WR3 sigue dominando la generación de eventos extremos en el sur del país, el WR5 pasa a tener mayor importancia en el norte. El WR4 también aumenta su importancia en todas las localidades. La mayor probabilidad de un evento extremo en el sur del país ocurre bajo la influencia de WR3 y WR4. Al norte del país esto se da para WR4 y WR5.

(iv) en primavera, el WR5 se vuelve aún más importante en todas las localidades, siendo responsable de más del 40% de los eventos más extremos en el sur y litoral del país. Es además el patrón que domina la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo de viento en todo el país.

En resumen, los vientos más extremos (p99) están en promedio más relacionados con los patrones WR3, WR4 y WR5, que representan un ciclón con centro en el Atlántico, viento

sur y desarrollo de una zona frontal y baja presión sobre Uruguay, respectivamente. Esto concuerda con la experiencia sinóptica de nuestra región.

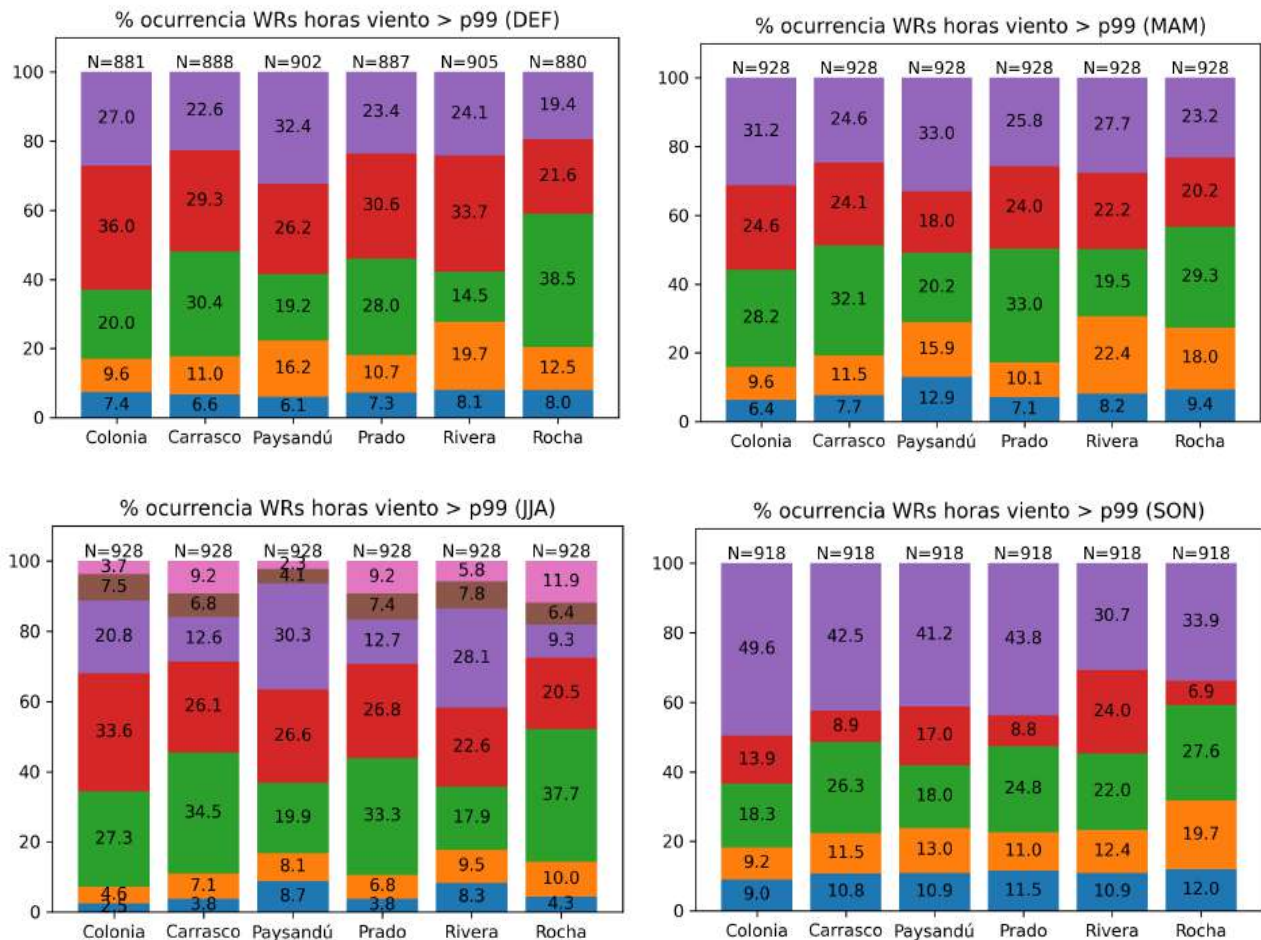


Figura 4.2 - Porcentaje de ocurrencia de eventos de viento extremo (p99) en función de los patrones de circulación (WR) para las cuatro temporadas del año para el reanálisis ERA5. Se consideran los puntos de grilla más cercanos a las localidades indicadas.

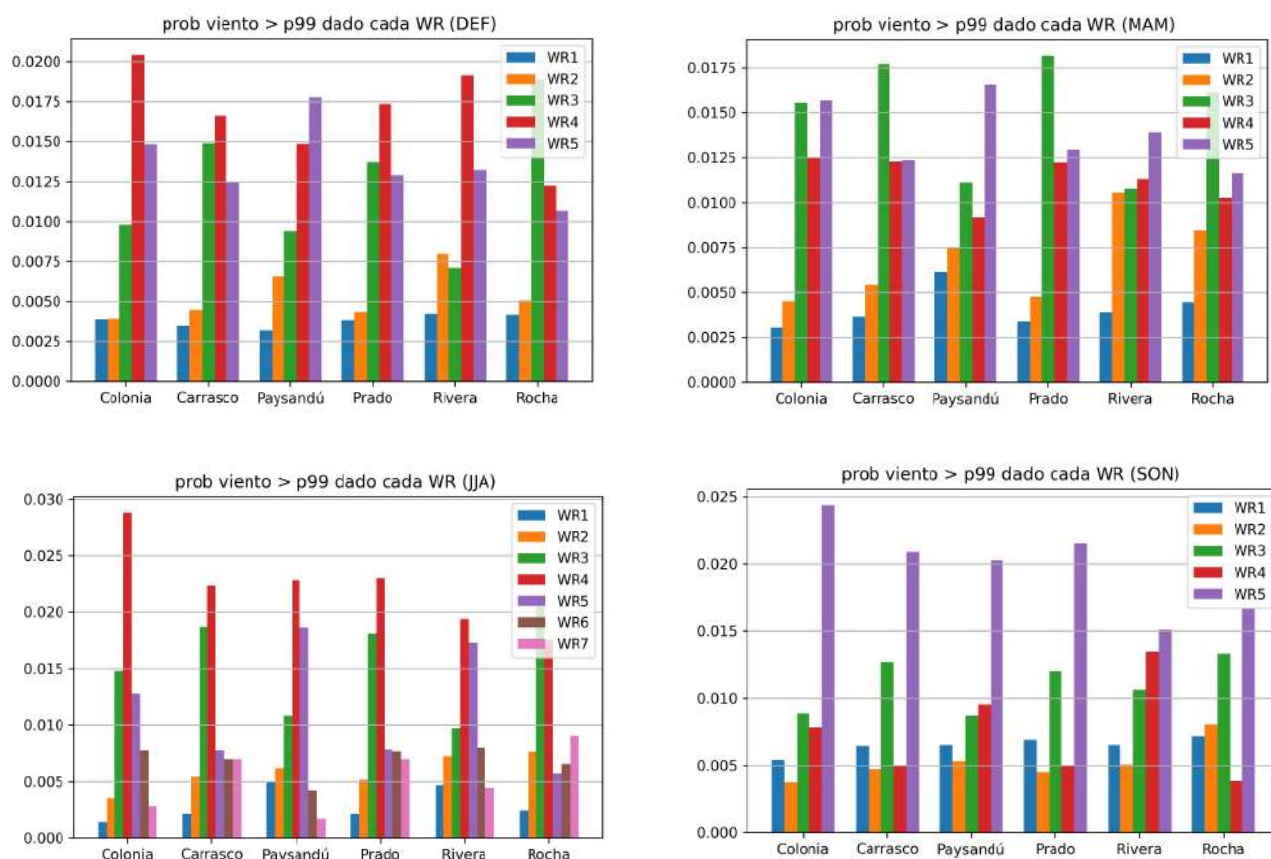


Figura 4.3 - Probabilidad de ocurrencia de un evento extremo dado un WR para ERA5 en las diferentes temporadas del año. Se consideran los puntos de grilla más cercanos a las localidades indicadas.

5. Tendencias en la frecuencia de ocurrencia de los patrones de circulación

El uso del reanálisis NCEP-CDAS1 permite estudiar las tendencias en la frecuencia de ocurrencia de los patrones de circulación recurrentes en las diferentes temporadas durante el período 1948-2018. Se encontró que algunos de los patrones mostraron tendencias significativas del orden del 10-20% (Figura 5.1). En particular, se observó una disminución en la frecuencia de ocurrencia de desarrollo de sistemas de baja presión al sur de Uruguay durante verano, otoño e invierno (WR5), y un aumento en la ocurrencia de ciclones sobre el océano Atlántico durante las dos últimas temporadas (WR3). Esto sugiere un desplazamiento hacia el sur de la región de formación de ciclones, o un aumento en el número de ciclones intensos. En verano el WR2 mostró una tendencia negativa. En invierno por el contrario se detectó un aumento en la frecuencia de ocurrencia del WR2 y disminución del WR4. Como el desarrollo de ciclones en el Atlántico (WR3) es el patrón más asociado a la ocurrencia de extremos de viento durante invierno, estos resultados indican que durante 1948-2018 habría ocurrido un aumento en el número de eventos extremos de viento, fundamentalmente en la zona costera y sur del país.

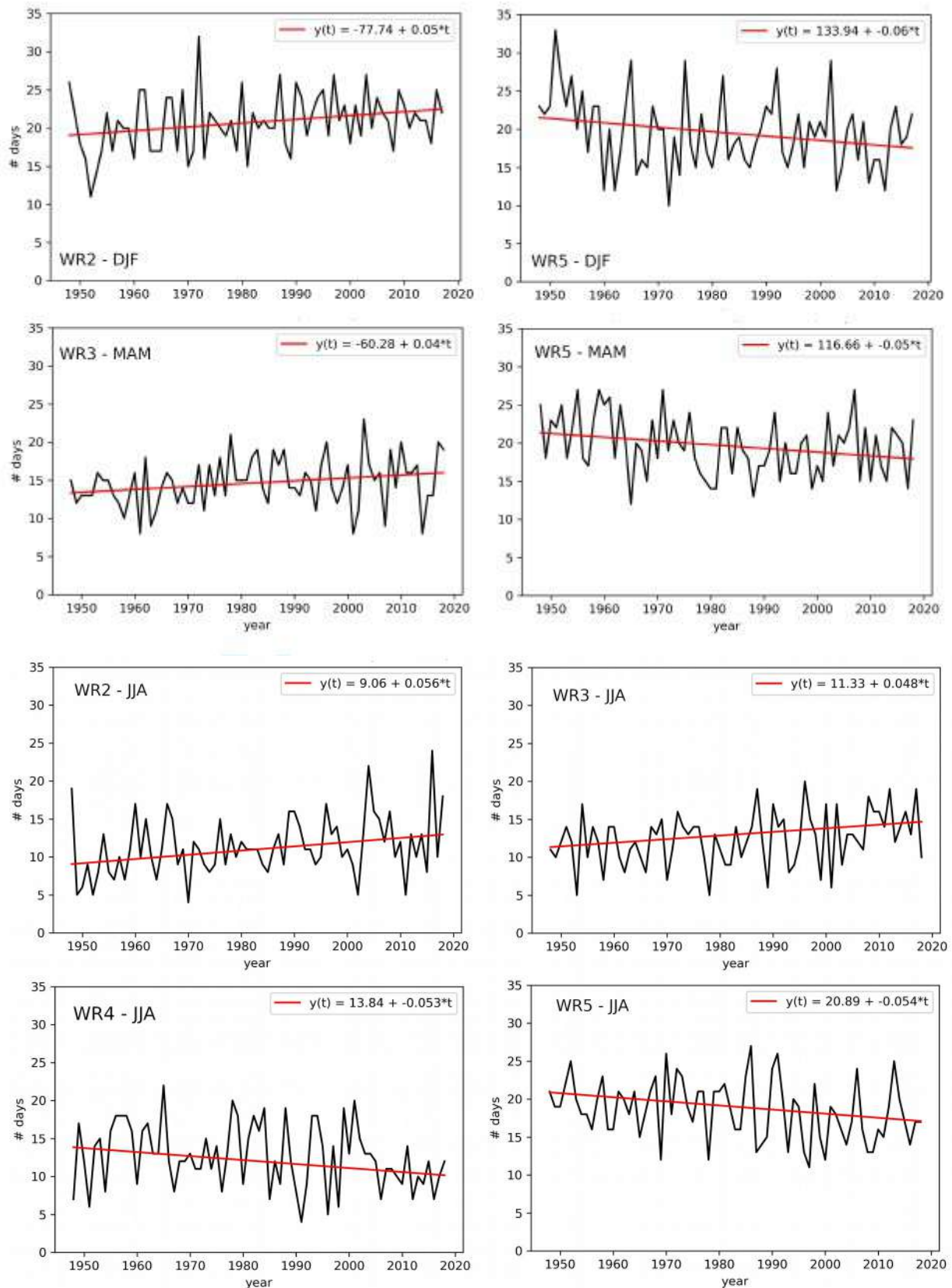


Figura 5.1 – Evolución del número de días por temporada para los WRs que muestran una tendencia significativa en verano (primera fila), otoño (segunda fila) e invierno (tercera y cuarta fila). La tendencia se muestra con una línea roja y la recta ajustada se indica en cada panel.

En base al análisis realizado no es posible establecer si las tendencias observadas en los WRs son atribuibles a la acción humana y, por ende, si es esperable que continúen a futuro. Para poder hacer esta proyección es necesario primero atribuir las tendencias al cambio climático generado por el hombre. Para abordar esta pregunta se utilizó las simulaciones históricas de los modelos climáticos CMIP6 descritos en el Entregable 2. Esas simulaciones reproducen la evolución climática desde 1850 a 2014 imponiendo los forzantes radiativos naturales (cambios en la insolación, efecto de los volcanes) y antropogénicos (gases de efecto invernadero, aerosoles). Para este análisis se usó el período 1948-2014.

Los resultados indican que algunos modelos presentan tendencias significativas en algunos WRs (Tabla 5.1). Hay algunos modelos que muestran tendencias similares a las observadas (comparar Tablas 3.1 y 5.1), pero no se observa un comportamiento consistente entre modelos. Asimismo, para las medias de los ensembles de simulaciones la evolución de los WRs no presenta tendencia significativa en ninguna temporada. Por lo tanto, no se detecta una respuesta robusta en los modelos climáticos con respecto a posibles cambios en el comportamiento de los WRs durante las últimas décadas. En vista de estos resultados no es posible atribuir a la acción humana las tendencias observadas para los WRs en NCEP-CDAS1 durante 1948-2018.

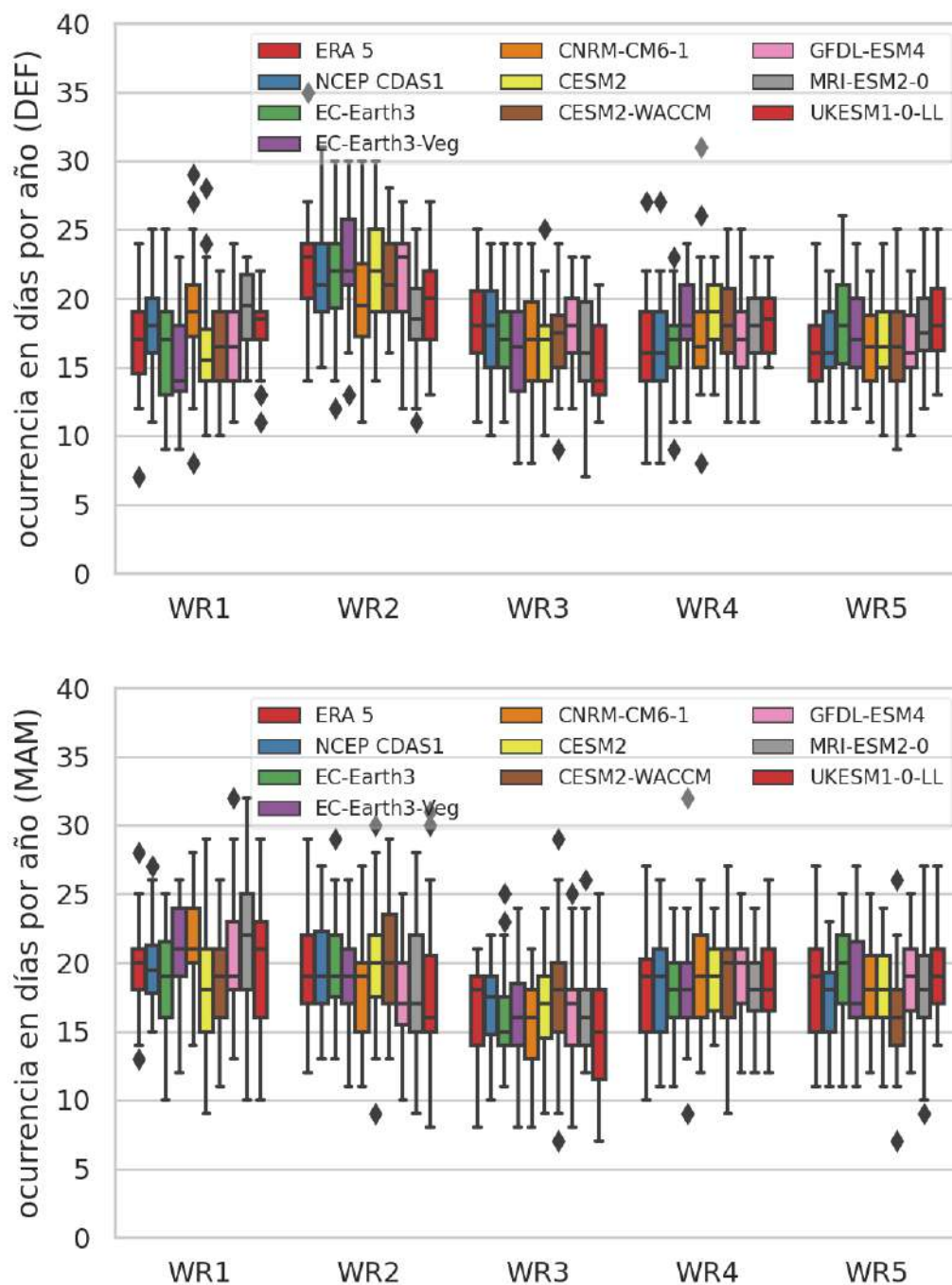
	DEF	MAM	JJA	SON
WR1	EC-Earth3Veg (-)	CNRM-CM6 (+)		EC-Earth3 (-) EC-Earth3Veg (+) CESM2-WACCM (-)
WR2	EC-Earth3Veg (+)	EC-Earth3 (+) EC-Earth3Veg (+)	EC-Earth3 (+) CNRM-CM6 (+)	
WR3		EC_Earth3 (+)	CESM2 (+)	
WR4	CNRM-CM6(-)	MRI-ESM20 (-) UKESM10LL (-)	CNRM-CM6 (-)	EC-Earth3 (+) UKESM10LL (-)
WR5		EC-Earth3 (-) MRI-ESM20 (+) CESM-WACCM (-) UKESM10LL (+)		
WR6				
WR7				

Tabla 5.1 – Tendencias simuladas por los modelos CMIP6 en la frecuencia de ocurrencia de los WRs para las diferentes temporadas durante el período 1948-2014. Se indica solamente los casos en los cuales se detectó una tendencia estadísticamente significativa, ya sea positiva (+) o negativa (-).

6. Proyecciones de patrones recurrentes

El primer paso para realizar proyecciones en base a modelos climáticos es validarlos. En este caso se usaron modelos que ya estaban validados para la temperatura y precipitación sobre Uruguay, y se procedió a validarlos en su representación de los patrones de circulación regionales recurrentes. Para ello se utilizó la corrida histórica de los modelos y se la comparó con los reanálisis atmosféricos.

Los resultados muestran que en general los modelos representan adecuadamente los porcentajes relativos de ocurrencia de cada WR en las diferentes temporadas (Figura 6.1).



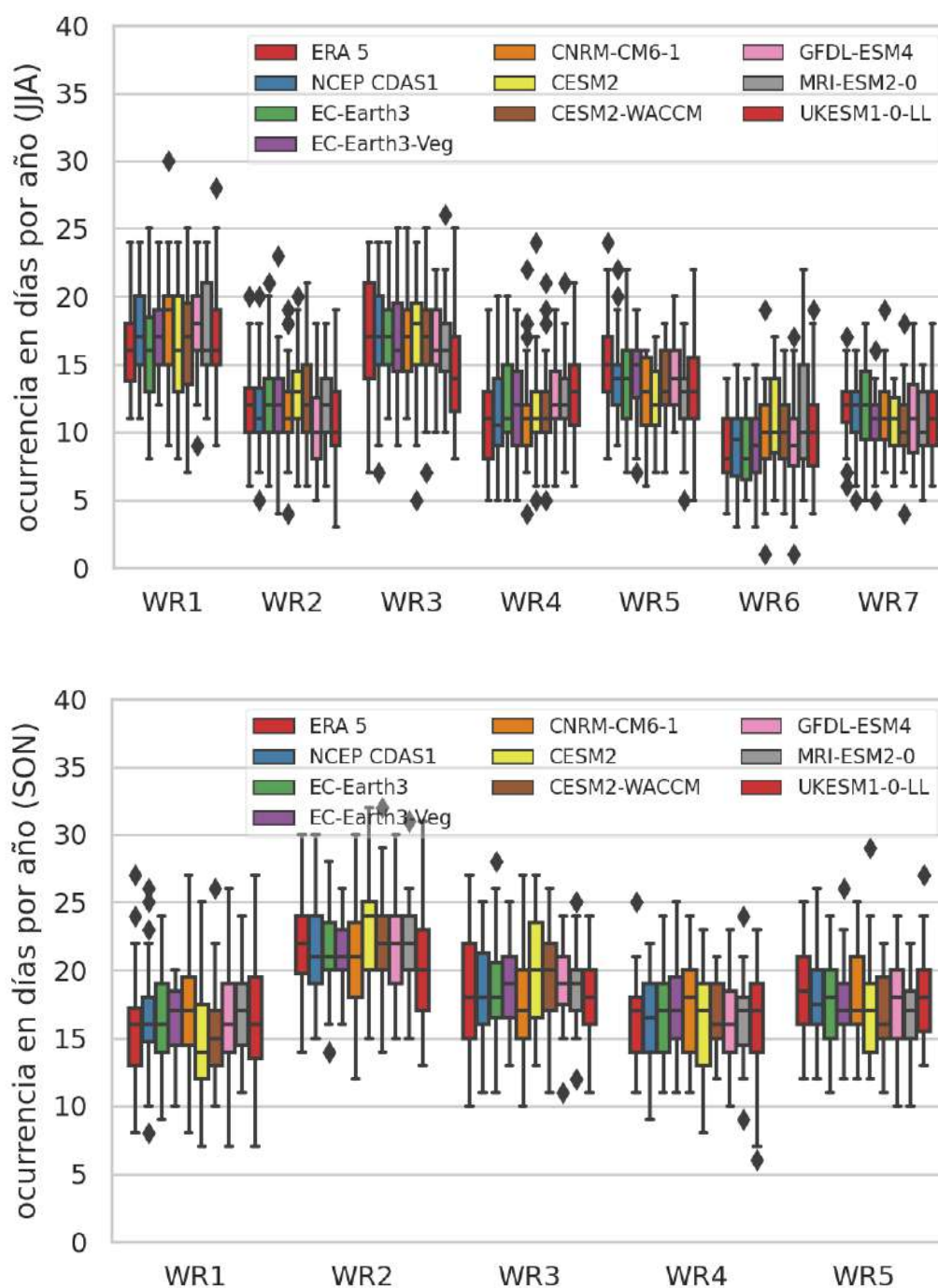


Figura 6.1 – Ocurrencia en día por año de cada WR en las diferentes temporadas para los dos reanálisis (ERA5 y NCEP-CDAS1) y los ocho modelos climáticos indicados.

De hecho, en algunos casos se observa que la diferencia entre modelos y reanálisis es del mismo orden de magnitud que entre ambos reanálisis. No obstante, en algunos casos se detecta diferencias significativas entre reanálisis y modelos. Por ejemplo, el modelo UKESM1-0-LL simula una menor ocurrencia del WR2 durante todas las temporadas, y el CNRM-CM6-1 una mayor ocurrencia del WR1 durante casi todo el año.

En vista de lo anterior es posible entonces usar los modelos para estudiar las posibles tendencias a futuro en la ocurrencia de los patrones recurrentes bajo diferentes escenarios de cambio climático. En este caso utilizaremos los escenarios SSP245 y SSP585, siendo este último el escenario de mayor uso de combustible fósil de los considerados por el IPCC. El SSP245 se considera un escenario medio.

Como se mostró más arriba la frecuencia de ocurrencia de los WRs varía en forma interanual. Por lo tanto, es necesario obtener una medida de la variabilidad natural en la frecuencia de ocurrencia de los patrones para poder comparar con las posibles tendencias a futuro. Para ello se utiliza la corrida pre-industrial. En esta corrida los modelos son forzados únicamente con variaciones naturales, por ej., en la insolación y en la actividad volcánica y no incluyen actividad humana. Por lo tanto, la variabilidad en la ocurrencia de los patrones de circulación es puramente natural y nos permite usarla como referencia.

A fin de obtener una representación gráfica que muestre la evolución en la frecuencia de ocurrencia de cierto WR, las figuras que siguen (figuras 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5) muestran series temporales que incluyen 200 años de corrida pre-industrial (considerada de 1650 a 1849), 165 años de corrida histórica (1850-2014) y 86 años del escenario SSP585 (2015-2100). O sea, que cada serie temporal tiene 451 años de duración.

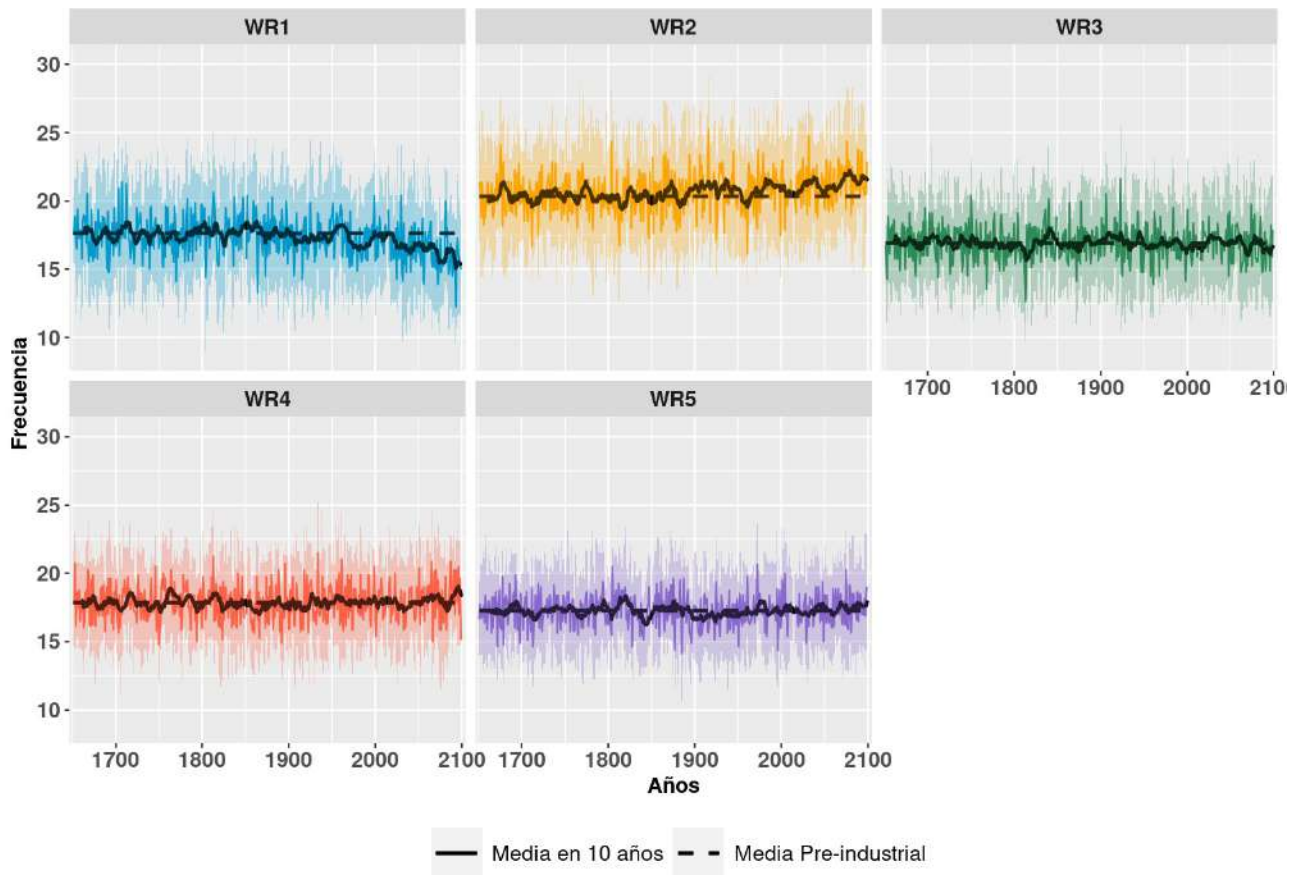


Figura 6.2 – Evolución temporal de la frecuencia de ocurrencia durante verano de los patrones recurrentes. Cada serie temporal incluye: corrida pre-industrial (200 años), corrida histórica (165 años) y escenario SSP585 (86 años). El sombreado indica el comportamiento de los 8 modelos, mientras que la línea fina más oscura es el comportamiento de su promedio. La línea gruesa indica el comportamiento del promedio de los modelos suavizado con una ventana de 10 años.

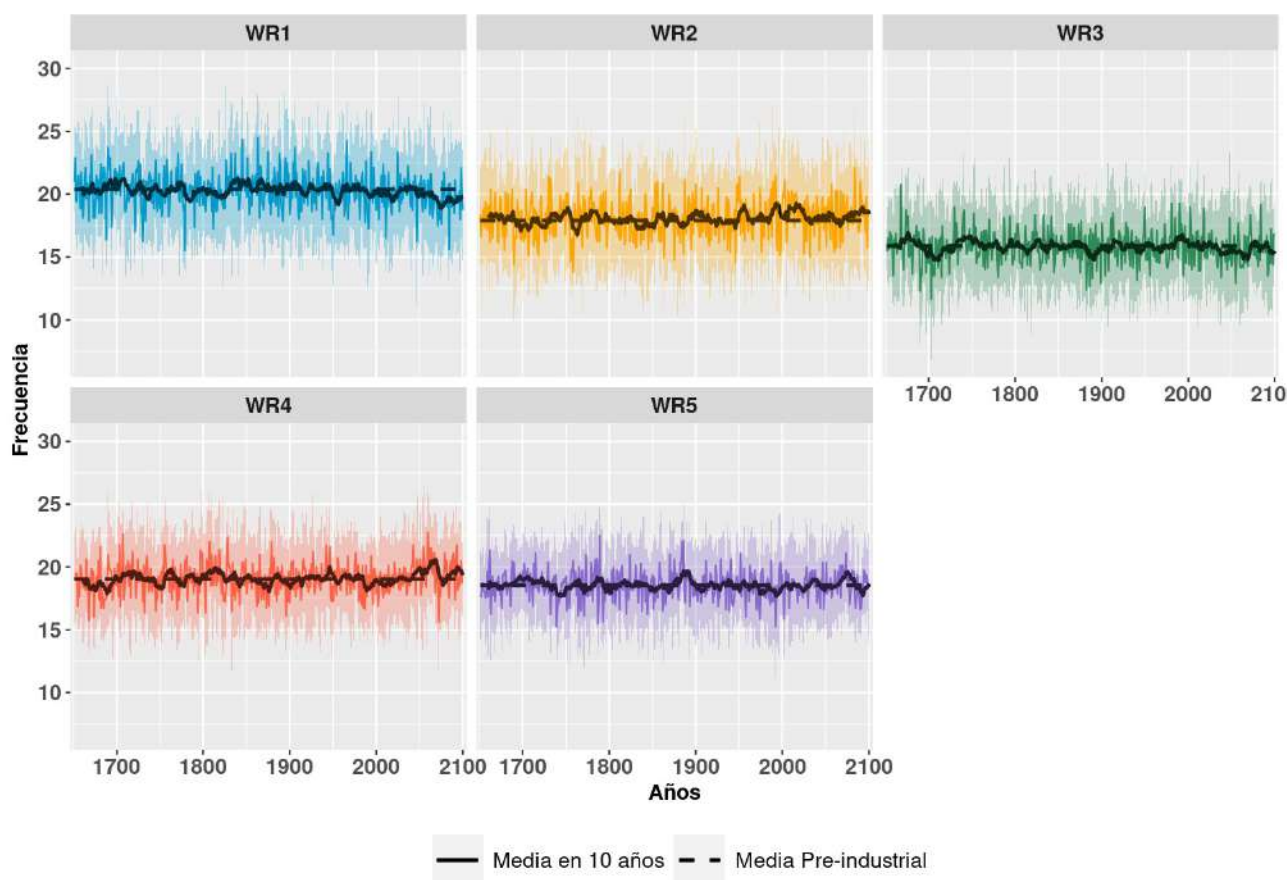


Figura 6.3 – Evolución temporal de la frecuencia de ocurrencia durante otoño de los patrones recurrentes. Cada serie temporal incluye: corrida pre-industrial (200 años), corrida histórica (165 años) y escenario SSP585 (86 años). El sombreado indica el comportamiento de los 8 modelos, mientras que la línea fina más oscura es el comportamiento de su promedio. La línea gruesa indica el comportamiento del promedio de los modelos suavizado con una ventana de 10 años.

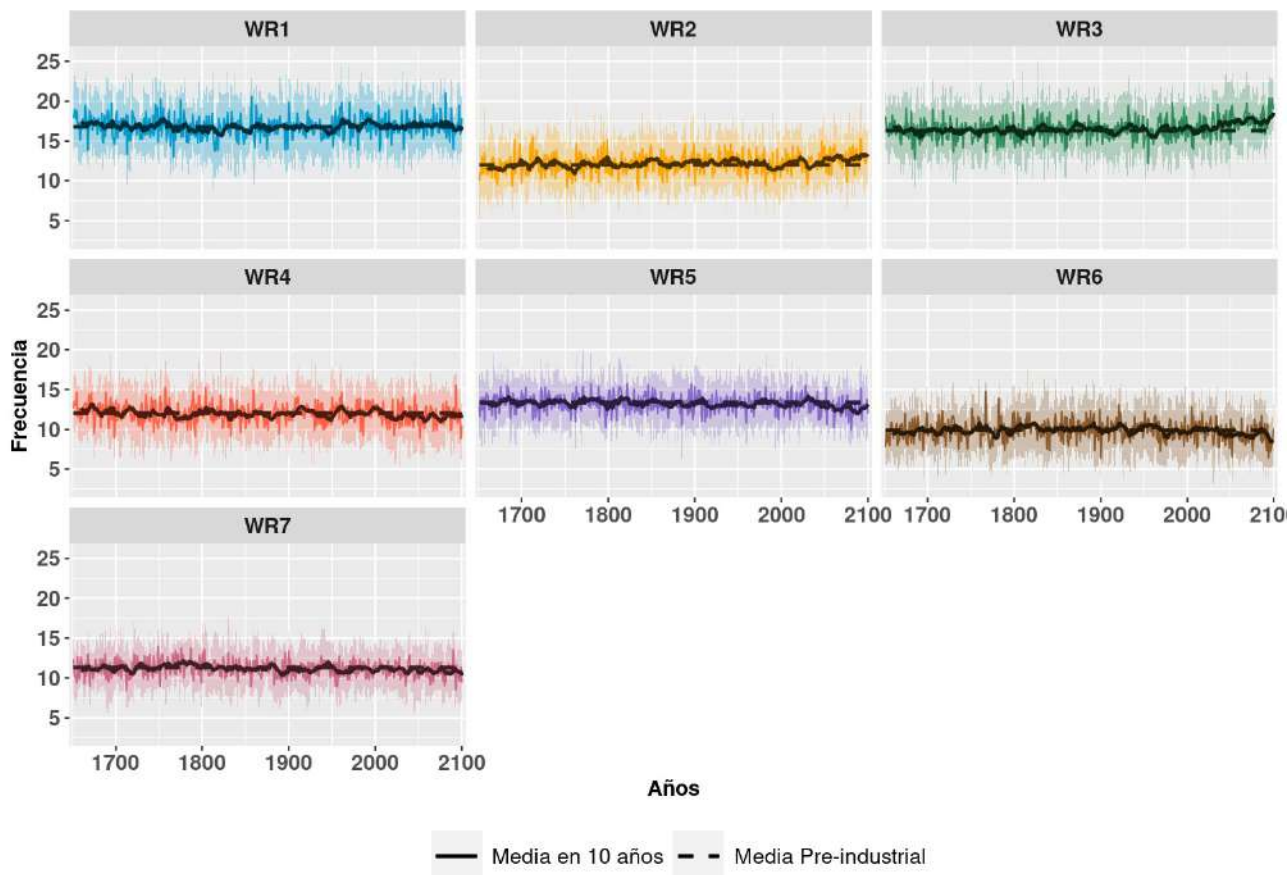


Figura 6.4 – Evolución temporal de la frecuencia de ocurrencia durante invierno de los patrones recurrentes. Cada serie temporal incluye: corrida pre-industrial (200 años), corrida histórica (165 años) y escenario SSP585 (86 años). El sombreado indica el comportamiento de los 8 modelos, mientras que la línea fina más oscura es el comportamiento de su promedio. La línea gruesa indica el comportamiento del promedio de los modelos suavizado con una ventana de 10 años.

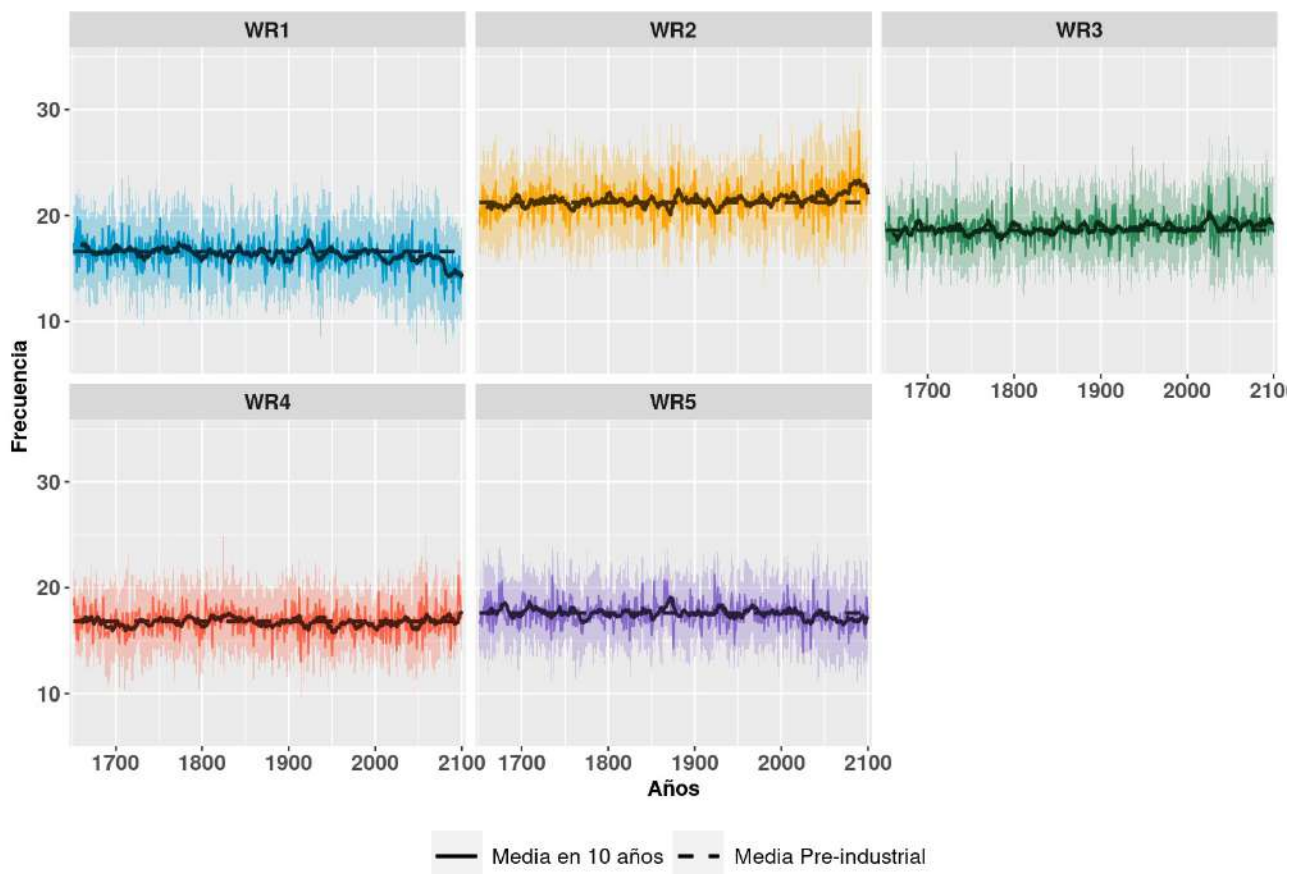


Figura 6.5 – Evolución temporal de la frecuencia de ocurrencia durante primavera de los patrones recurrentes. Cada serie temporal incluye: corrida pre-industrial (200 años), corrida histórica (165 años) y escenario SSP585 (86 años). El sombreado indica el comportamiento de los 8 modelos, mientras que la línea fina más oscura es el comportamiento de su promedio. La línea gruesa indica el comportamiento del promedio de los modelos suavizado con una ventana de 10 años.

De las figuras anteriores se observa que las proyecciones de los modelos climáticos indican cambios a futuro en los patrones de circulación recurrentes bajo el escenario SSP585. En el caso del escenario SSP245 las tendencias son similares pero más débiles y no se muestran. A los efectos de determinar la robustez de las tendencias, éstas se consideraron significativas si al menos 5 de los 8 modelos coinciden en el signo.

Los resultados bajo el escenario SSP585 indican que durante el siglo XXI durante el invierno se mantendrían las mismas tendencias observadas durante los últimos 70 años. Es decir, una disminución en la frecuencia de ocurrencia de desarrollo de sistemas frontales en Uruguay y de vientos del sur (WR5 y WR4), así como un aumento en la ocurrencia de ciclones y anticiclones sobre el océano Atlántico (WR3 y WR2). Por lo tanto, es esperable que continúe el aumento en el número de eventos extremos de viento principalmente en la región sur del país durante invierno.

En primavera y verano se proyecta una tendencia positiva del patrón caracterizado por viento del noreste asociado a un anticiclón situado en el océano Atlántico (WR2). Estas tendencias sugieren un aumento a futuro en la ocurrencia de eventos viento extremo en el este del país principalmente en primavera. Asimismo, en la estación cálida se proyecta una tendencia negativa del patrón asociado a vientos del norte (WR1). Esta disminución sugiere un menor transporte de humedad, lo cual contrarresta el aumento en el contenido de humedad atmosférico por aumento de temperatura. El escenario SSP585 también proyecta un aumento en las precipitaciones de verano y otoño, así como una disminución durante primavera al suroeste del país, sugiriendo que el resultado neto dependerá de la temporada. En primavera también se proyecta una disminución en la frecuencia de ocurrencia de desarrollo de centros de baja presión al sur de Uruguay (WR5), lo cual indica una disminución en la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos de viento en esa región, lo cual también se condice con la disminución proyectada en las lluvias.

ANEXO A – Impacto de los patrones de circulación sobre las precipitaciones y temperatura de superficie

Los patrones regionales recurrentes impactan también en las lluvias y temperatura sobre Uruguay. En este anexo se describen las anomalías de lluvia y temperatura máxima y mínima asociados a cada uno de los patrones recurrentes a los efectos de tener una descripción más completa de las condiciones meteorológicas asociadas ya que muchas veces el impacto depende de la combinación de más de una variable.

Para las lluvias y temperatura se usaron datos de CPC-NOAA, disponibles desde 1979 a la fecha en:

<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globaltemp.html>

<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html>

Verano

Se observa que el WR5, desarrollo de una zona frontal/ciclón, sobre Uruguay es el patrón más asociado a anomalías de lluvia en todo el país (figura A.1). Es decir, durante los días que ocurre este patrón hay más probabilidad de que llueva por encima del promedio climatológico, siendo mayores los acumulados en el litoral norte. El patrón de viento norte (WR1) también favorece las lluvias en el litoral y este de Argentina. Vientos del noreste (WR2) favorecen días secos, principalmente en el norte del país. La existencia de un ciclón en el Atlántico (WR3) está asociado con lluvias por debajo de lo normal en el litoral, y lluvias por encima en el sur de Brasil mostrando el avance del frente asociado. Por último, viento sur tiende a favorecer días con lluvias por debajo de lo normal en el suroeste de Uruguay.

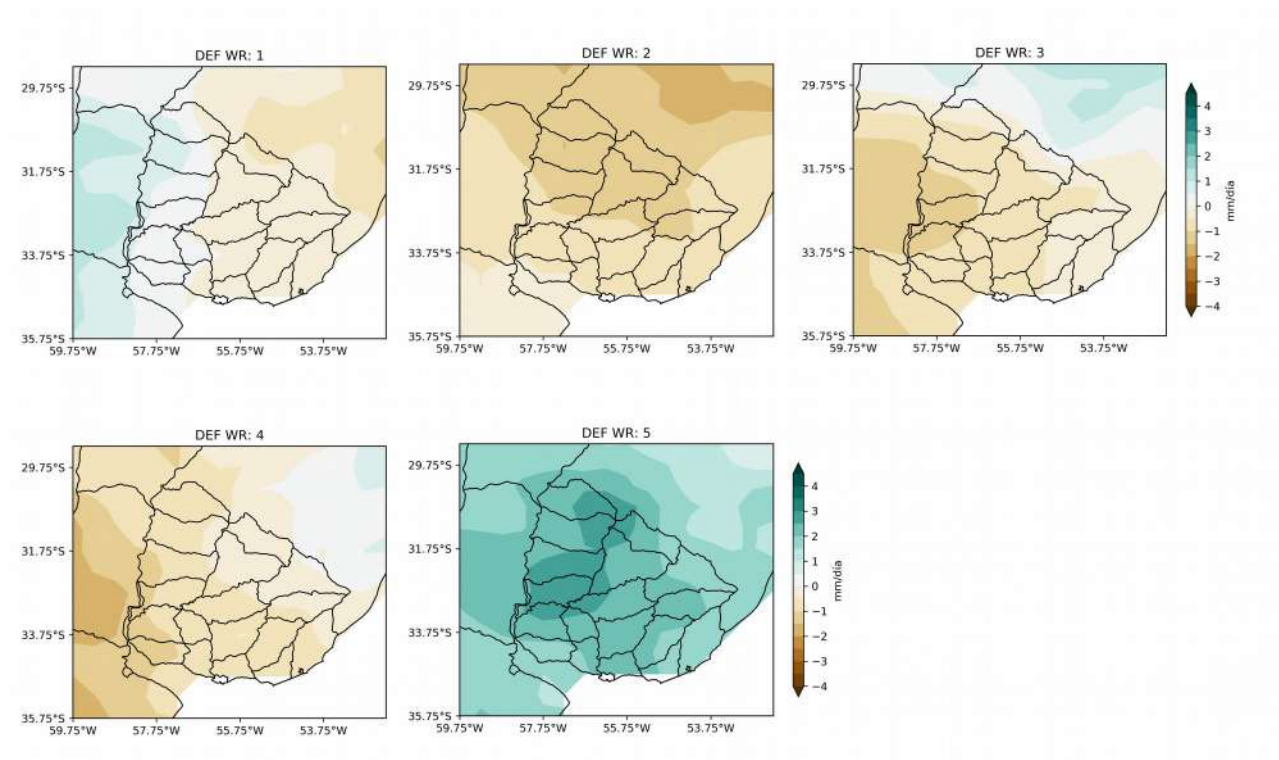


Figura A.1 – Anomalías de lluvia promedio diaria asociadas a cada patrón recurrente durante verano.

En cuanto a temperatura, los mapas de máxima y mínima son similares, siendo los patrones con viento suroeste (WR3) y sur (WR4) aquellos que generan condiciones más frías de lo normal (figura A.2). No obstante, WR3 muestra anomalías frías solo en la temperatura mínima. Viento norte (WR1) es el patrón asociado a temperaturas máximas más elevadas probablemente por el transporte de calor, mientras que el desarrollo de una zona frontal (WR5) es patrón el asociado a temperaturas mínimas más elevadas, sugiriendo que la alta cobertura nubosa mantiene temperaturas menos frías durante la noche.

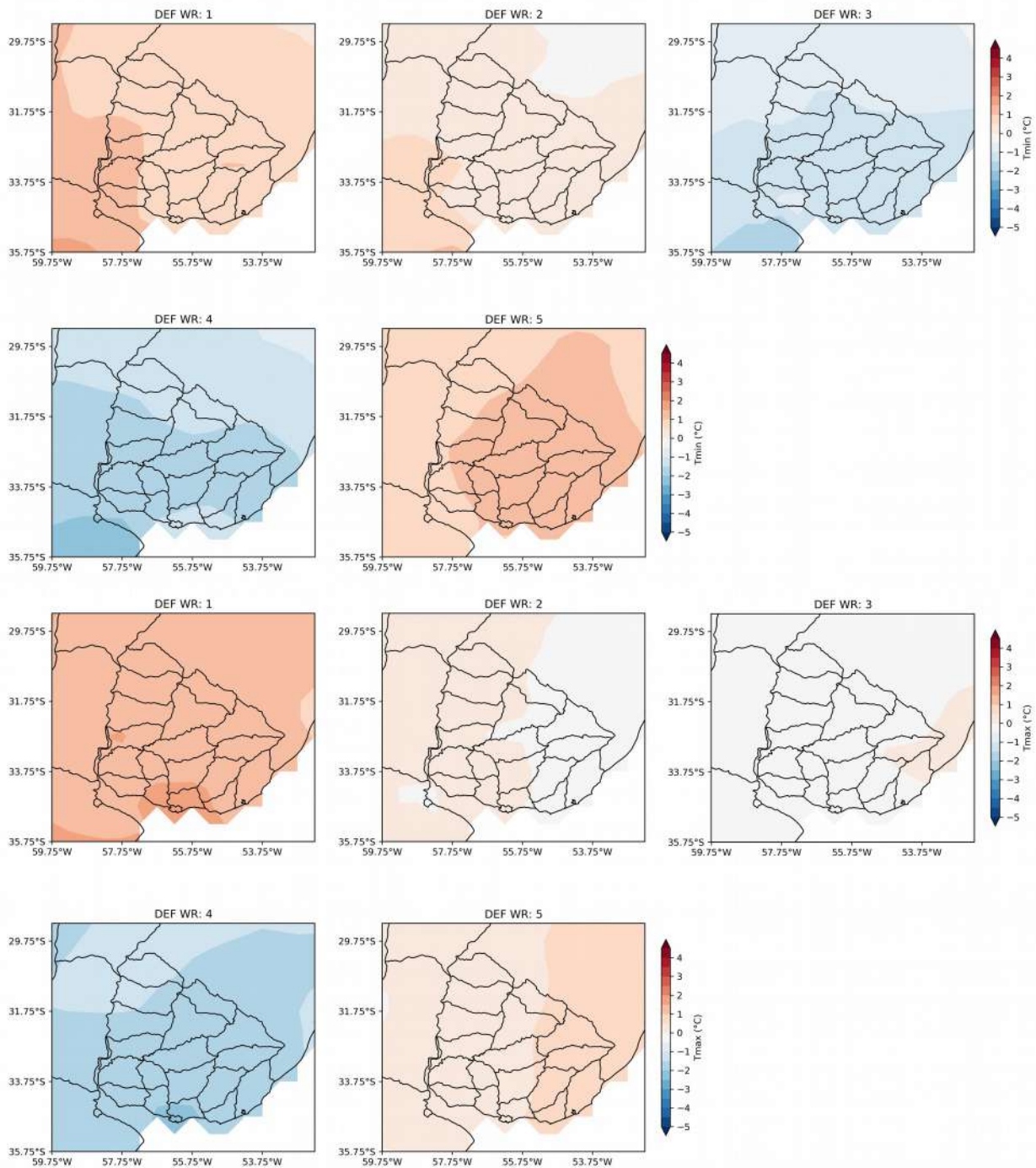


Figura A.2 – Anomalías de temperatura diaria asociadas a cada patrón recurrente durante verano. Temperatura mínima (arriba), temperatura máxima (abajo).

Otoño

Durante esta temporada las anomalías de lluvia asociadas a los patrones recurrentes son muy parecidos a los de verano, con WR5 el que genera mayores acumulados en todo el país (figura A.3). Las anomalías de temperatura de cada patrón recurrente también son similares a los de verano (figura A.4).

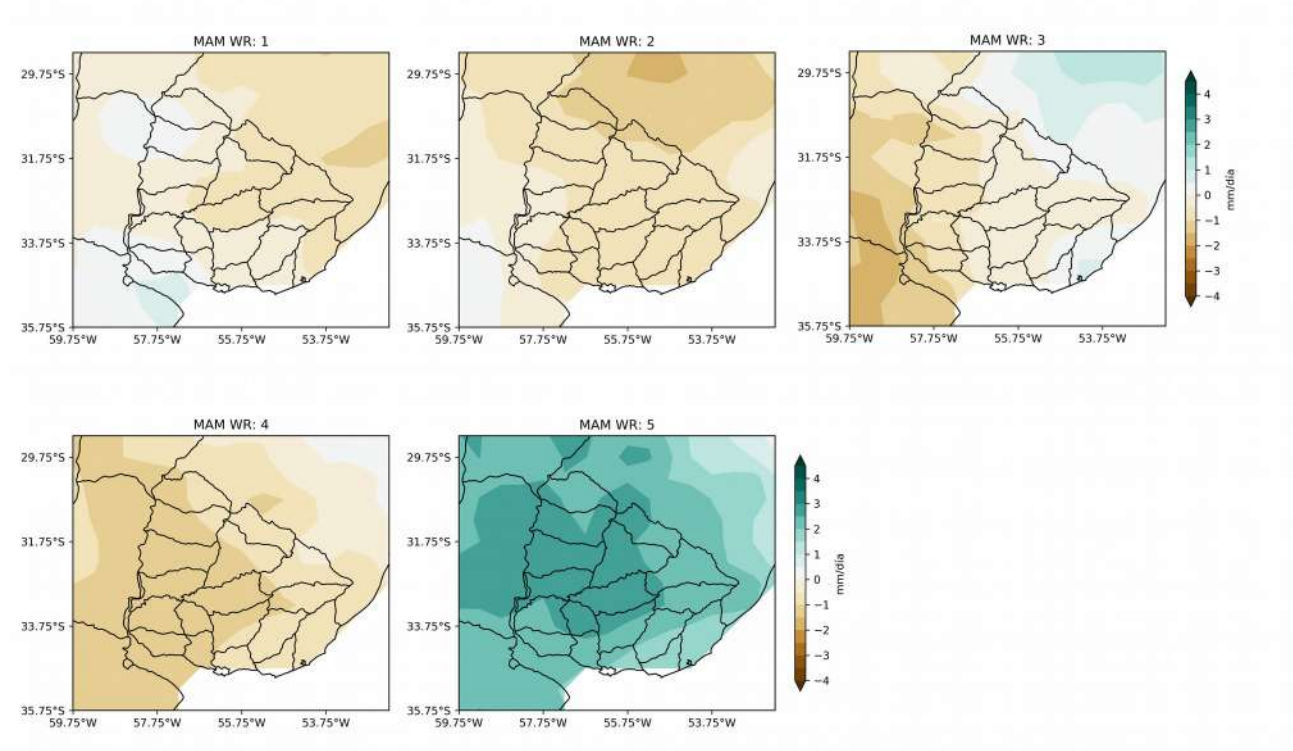


Figura A.3 – Anomalías de lluvia promedio diaria asociadas a cada patrón recurrente durante otoño.

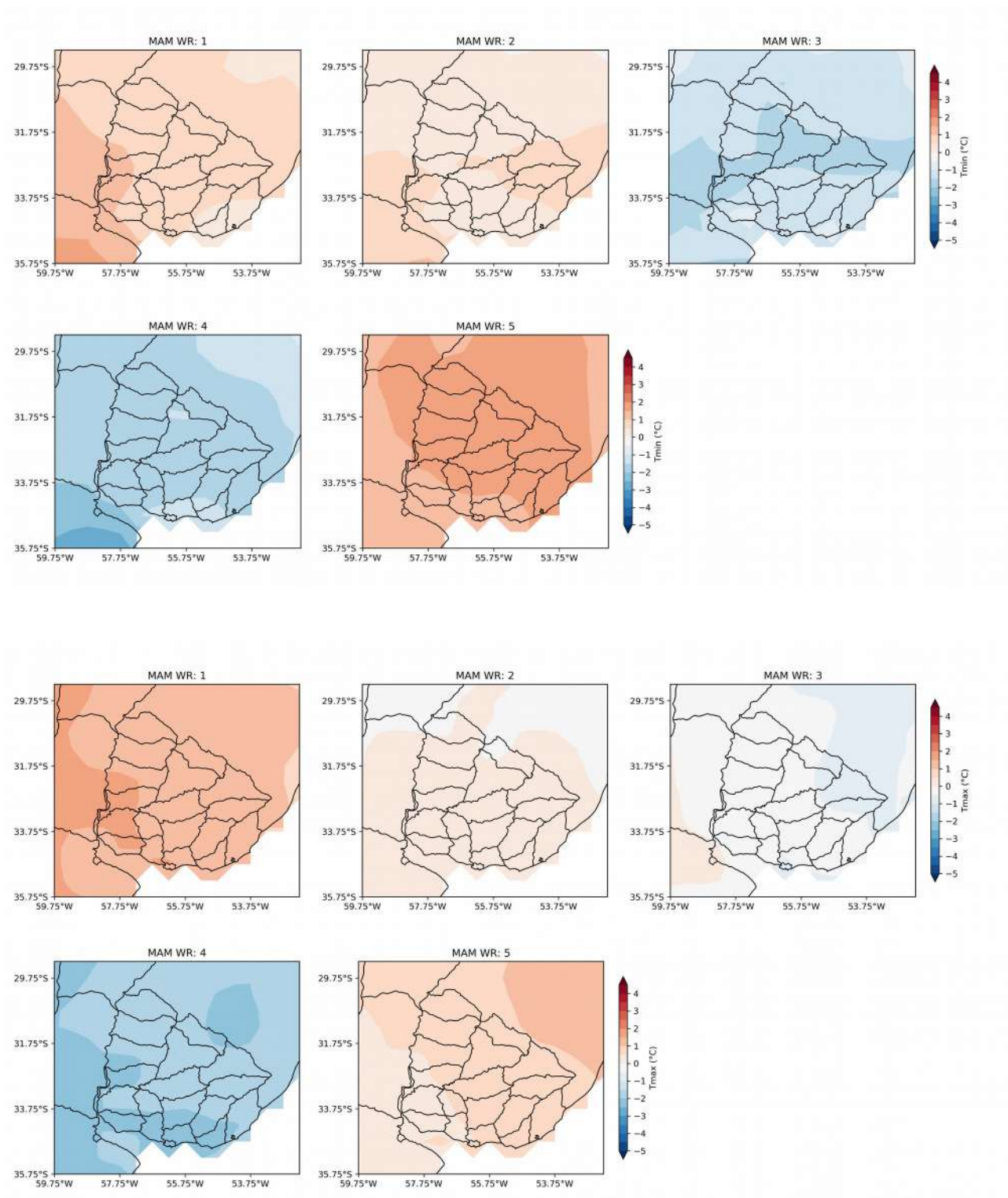


Figura A.4 – Anomalías de temperatura diaria asociadas a cada patrón recurrente durante otoño. Temperatura mínima (arriba), temperatura máxima (abajo).

Invierno

En esta temporada los patrones recurrentes con viento sur-sureste (WR4) y desarrollo de una zona frontal (WR5) están asociados a lluvias por encima de lo normal (figura A.5). El WR4 tiene máxima acumulación en el este del país, mientras que el WR5 lo hace al sur del río Negro. El WR3, presencia de un ciclón en el océano Atlántico, también está asociado con lluvias en el noreste. Los otros patrones de circulación presentan lluvias por debajo de lo normal en diferentes regiones del país, siendo el WR7 el asociado a condiciones más secas en todo el territorio.

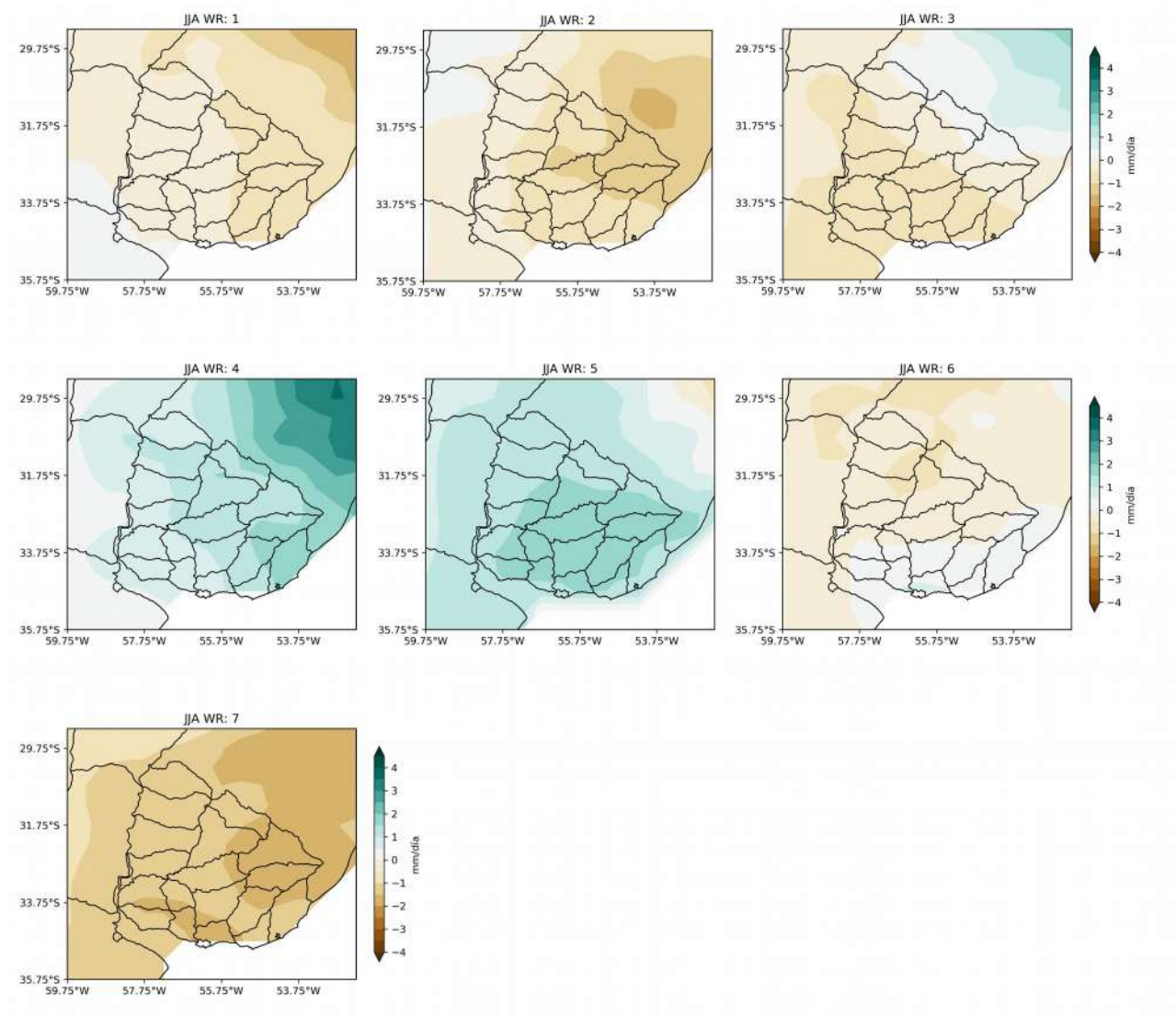
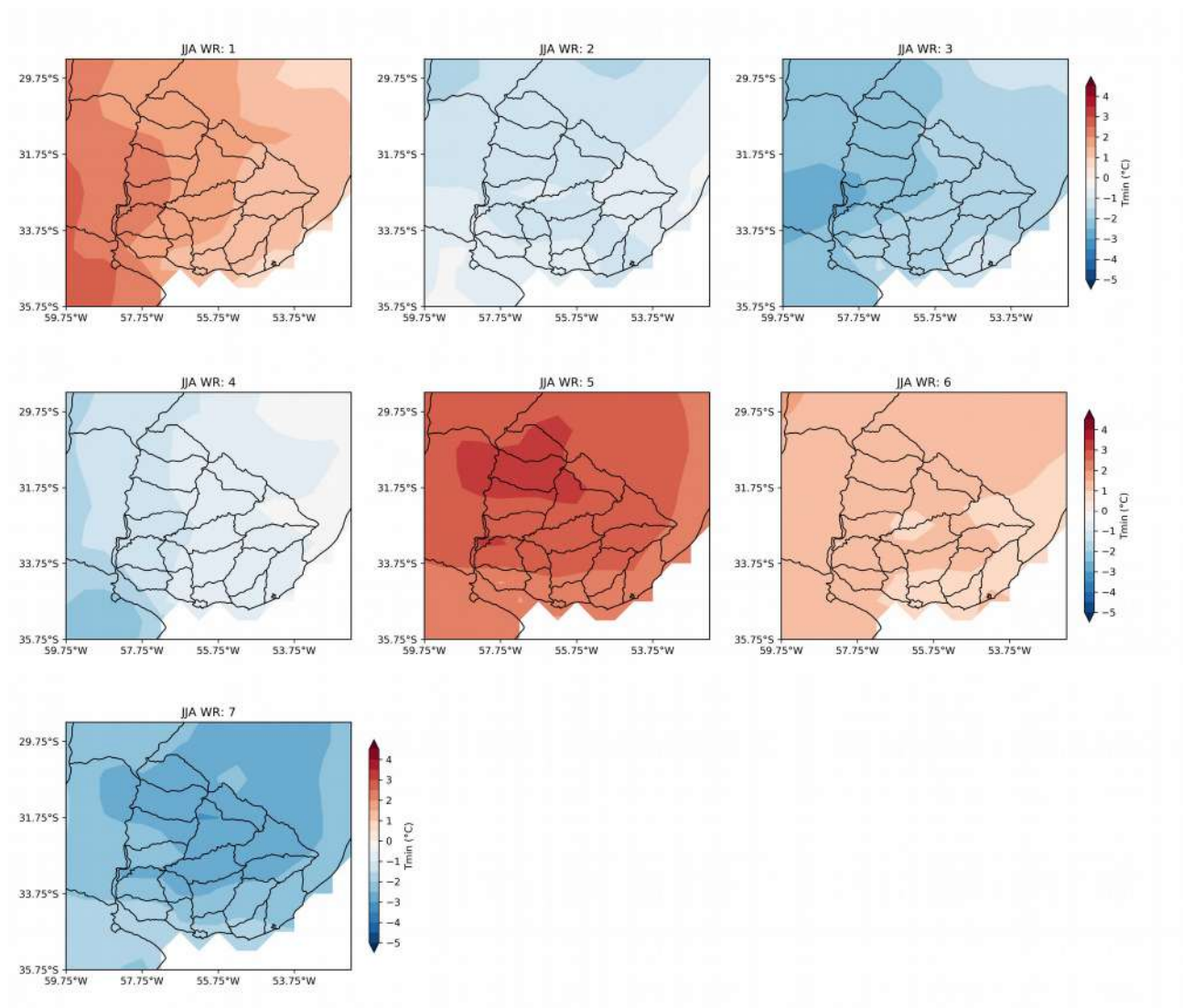


Figura A.5 – Anomalías de lluvia promedio diaria asociadas a cada patrón recurrente durante invierno.

Las anomalías de temperatura mínima más altas se dan asociadas al patrón WR5, al igual que en las anteriores temporadas, y el viento norte del patrón WR1 genera anomalías cálidas en el litoral (figura A.6). Por otro lado, en cuanto a las temperaturas máximas, el WR1 genera las mayores anomalías en todo el país, mientras que el WR5 y el WR6 (viento norte-noroeste) generan condiciones cálidas de mayor amplitud al norte del río Negro. En general, como es esperable, los patrones con vientos del norte generan los días más cálidos.

Por otro lado, los días más fríos están asociados a los patrones WR3, WR4 y WR7 (figura A.6). Las temperaturas mínimas son menores en el WR3 (viento suroeste) en el litoral, y en el WR7 (viento del sur con ciclón en Atlántico) para todo el país. Las temperaturas máximas más bajas en todo el territorio están asociados al WR4 (viento sur) con anomalías mayores en el litoral.



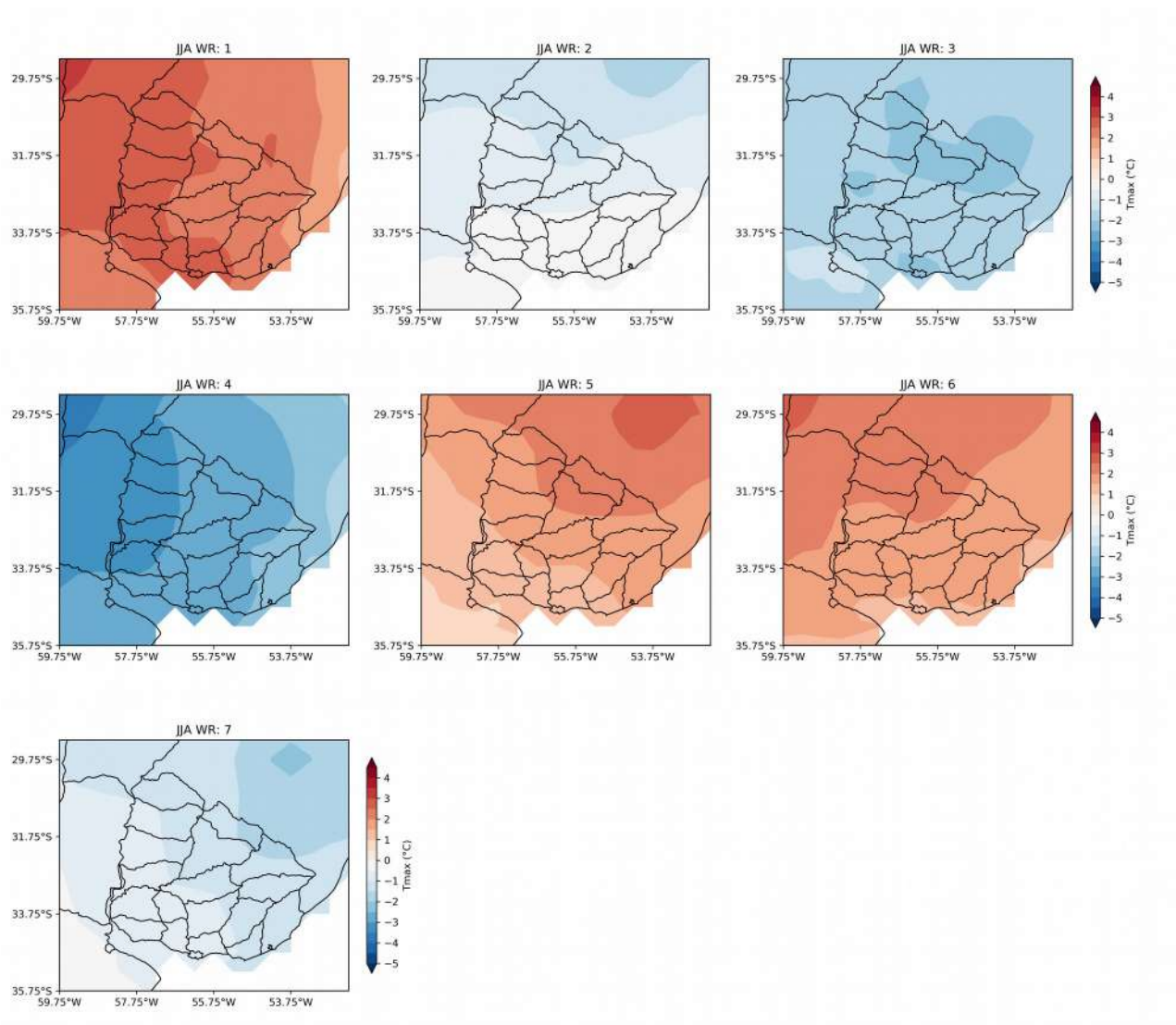


Figura A.6 – Anomalías de temperatura diaria asociadas a cada patrón recurrente durante invierno. Temperatura mínima (arriba), temperatura máxima (abajo).

Primavera

Durante esta temporada las anomalías de lluvia asociadas a los patrones recurrentes son muy parecidos a los de verano y otoño, siendo WR5 el que genera mayores acumulados en todo el país con un máximo bien definido en el noreste (figura A.7). Las anomalías de temperatura de cada patrón recurrente también son similares a los de verano: el WR4 genera las condiciones más frías en temperatura máxima y mínima en todo el país; el WR1 induce las temperaturas máximas más cálidas en el litoral; el WR5 las temperaturas mínimas más cálidas en el noreste mostrando el claro gradiente espacial asociado a la zona frontal (figura A.8).

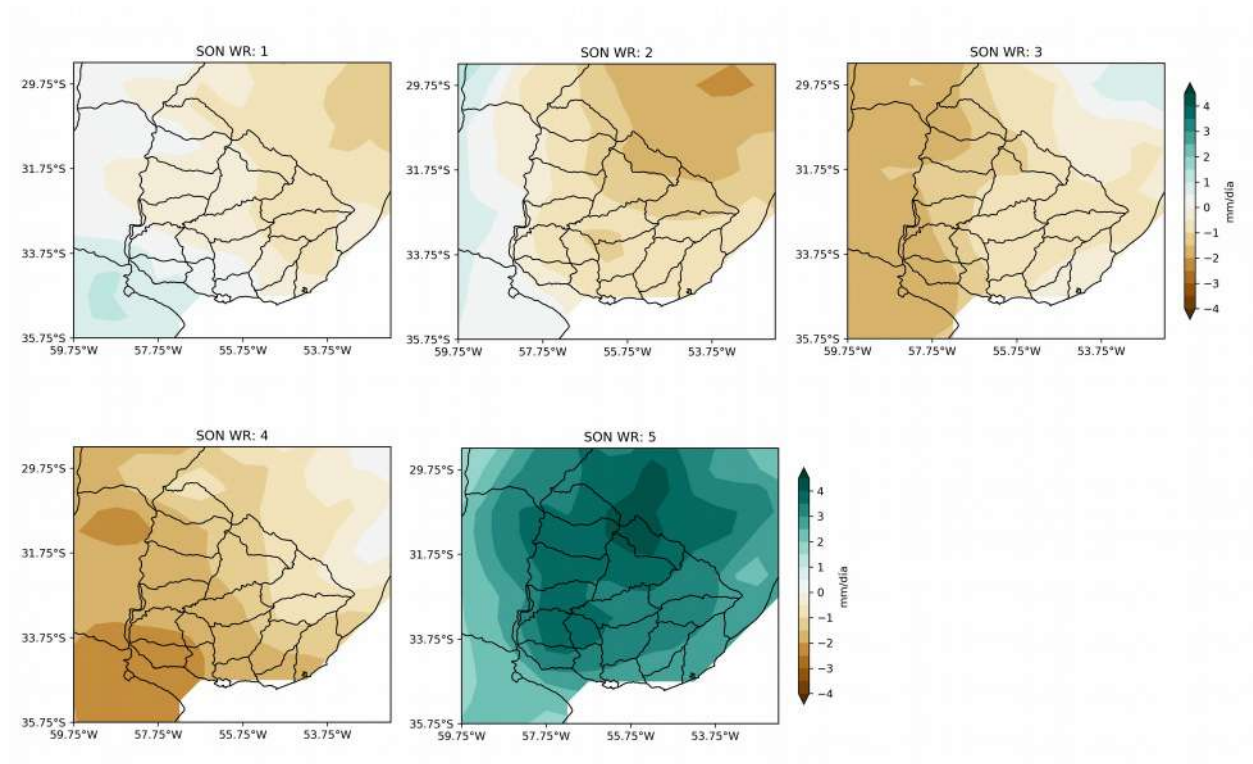


Figura A.7 – Anomalías de lluvia promedio diaria asociadas a cada patrón recurrente durante primavera.

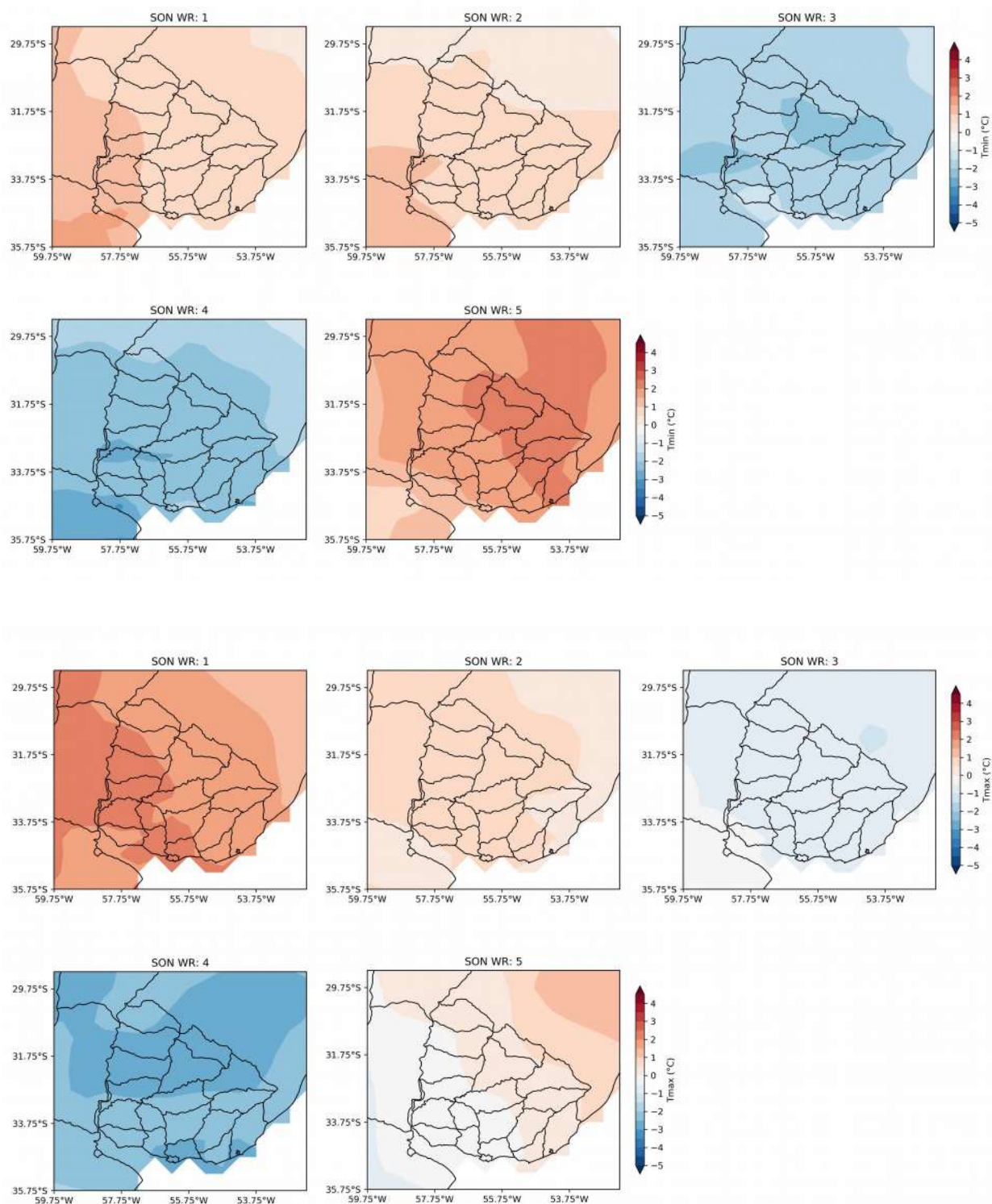


Figura A.8 – Anomalías de temperatura diaria asociadas a cada patrón recurrente durante primavera. Temperatura mínima (arriba), temperatura máxima (abajo).