



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

Análisis del clima y escenarios de cambio y variabilidad climática en Uruguay

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 4

Junio 2021

Introducción

El cambio climático tiene impactos profundos sobre la infraestructura y servicios urbanos y por ende en las actividades socio-económicas que allí se desarrollan. La adaptación de las ciudades al cambio climático necesita de acciones coordinadas a nivel gubernamental, para lo que se necesita conocer los riesgos climáticos clave. Para las ciudades los riesgos climáticos más importantes son un aumento de la temperatura y sus extremos, el aumento del nivel del mar costero, sequías, precipitaciones intensas con sus asociadas inundaciones rápidas y vientos extremos (IPCC AR5). La detección de cambios en estas variables y su atribución a la acción humana es particularmente difícil en regiones de gran variabilidad climática como Uruguay. Aquí resumiremos por lo tanto no sólo las tendencias observadas sino también las condiciones medias y la variabilidad natural del clima en nuestro país. Asimismo incluiremos las proyecciones realizadas con los modelos climáticos de última generación. Se enfoca en la descripción de los campos de temperatura, precipitación y vientos por separado para mayor claridad, pero es importante remarcar que estas variables están interrelacionadas por la dinámica atmosférica, por lo que cambios en una de ellas están generalmente acompañados por cambios en las otras, como se explica más abajo.

Temperatura

La ausencia de topografía significativa en nuestro país resulta en que las isothermas sean, como sería de esperar basado solamente en la radiación solar recibida, aproximadamente paralelas a los círculos de latitud con mayores valores al norte. Las desviaciones con respecto a ese patrón son debido a la influencia marítima y continental. A nivel anual, la región sureste tiene una temperatura media cercana a 16.5 °C mientras que el norte alcanza los 19.0 °C. En primavera y verano existe una inclinación suroeste-noreste de las isothermas que evidencia la presencia del mar, ya que el mayor contenido de humedad modera el calentamiento de la región costera disminuyendo así las variaciones de temperatura. En invierno este mismo efecto resulta en un menor enfriamiento de la costa rochense comparada con la región sur del país. Como consecuencia, si bien la amplitud del ciclo estacional es en general cercano a los 10-11 °C entre invierno y verano para las diferentes regiones, es un poco mayor en el norte que en el sur. El otoño tiene menor diferencia térmica entre las diferentes regiones del país que las otras estaciones.

A escala diaria se observan grandes cambios en la temperatura, por ejemplo con la entrada de un frente frío la temperatura puede descender 10 °C. Sin embargo, a nivel interanual la variabilidad de la temperatura media estacional no varía mucho. El invierno es la estación del año con mayor variabilidad trimestral, cercana a 1 °C en el noroeste del país. Verano es la estación con menor variabilidad interanual.

La temperatura media anual promediada en todo el país aumentó cerca de 0.8 °C comparando las décadas 1961-1980 y 1995-2015. La tendencia observada es comparable a la variabilidad año a año en la temperatura media de Uruguay lo cual facilita su detección. Este aumento se observa en todas las temporadas. No obstante, existen diferencias regionales. La región este del país muestra un calentamiento mayor a 1.1 °C, mientras que el litoral oeste y sur tienen un calentamiento más moderado. El área metropolitana muestra un calentamiento cercano a 0.7 °C.

El cambio en las temperaturas medias está generalmente asociado a un cambio en los extremos de temperatura ya que la distribución de los valores diarios tiende a correrse hacia valores mayores y además puede cambiar su ancho. Los cambios son más notorios en las temperaturas mínimas diarias. A nivel anual se observa una disminución en el número de días con noches frías (TN10) y un aumento del número de días con noches cálidas (TN90), lo cual indica un corrimiento de toda la distribución de temperaturas mínimas diarias hacia valores mayores (figura 1). En cuanto a las temperaturas máximas diarias, se observa una disminución del número de días fríos (TX10) en todo el país y una tendencia a la disminución en el número de días cálidos (TX90) sobre el sur del país en acuerdo con Renom (2009), sugiriendo una disminución en el ancho de la distribución. A nivel estacional, se observa que en verano ha habido un aumento en el número de noches cálidas (TN90) y una disminución en el número de noches frías (TN10), al igual que a nivel anual. Los extremos de las máximas diarias, por otro lado, no muestran cambios significativos. En invierno no hay tendencias significativas en extremos de temperatura mínima o máxima. Sin embargo, se ha podido constatar que existe una disminución en el período de ocurrencia de heladas (de Mello 2014). Renom (2009) hace un extenso estudio sobre los cambios observados en los extremos de temperatura sobre Uruguay.

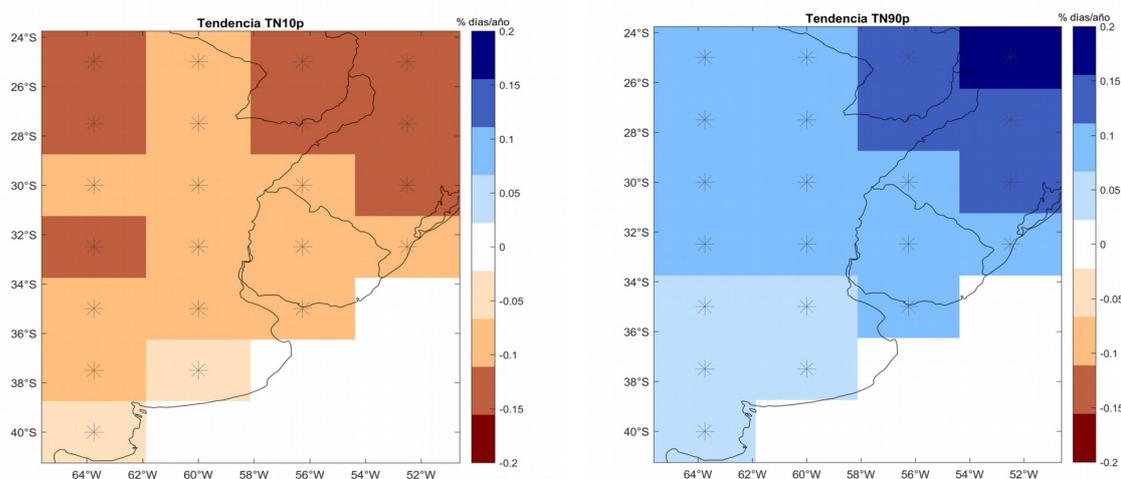


Figura 1 – Tendencias en TN10 y TN90 observadas en Uruguay y la región, período 1948-2010. El “*” indica valores estadísticamente significativos. Fuente: CLIMDEX, Barreiro et al (2019).

A futuro, las proyecciones muestran un aumento en la temperatura media anual cuasi-lineal en el tiempo (figura 2). Asimismo, a mayor forzante radiativo antropogénico mayor es el aumento de temperatura a fin de siglo. No obstante, en el horizonte cercano las diferencias entre los diferentes forzantes antropogénicos son menores distinguiéndose recién a partir del 2060. Para el horizonte cercano (2020-2044) los modelos proyectan entre 0.5 y 1.6 °C de calentamiento con respecto a 1981-2010 y no hay grandes diferencias entre escenarios. Para el horizonte lejano (2075-2099) los modelos proyectan entre 1.5 y 5.5 °C de calentamiento respecto a 1981-2010 y depende fuertemente del escenario: SSP245 muestra un aumento entre 1.5 y 3.0 °C, SSP370 entre 2.2 y 4.6 °C y SSP585 entre 2.6 y 5.5 °C. En cuanto a extremos podemos mencionar que de acuerdo a los modelos CMIP5 las olas de calor en nuestra región aumentarán en número y duración para fin de siglo XXI. El cambio proyectado es mayor al norte del país siendo cercano a un 150% (Carril et al 2016). Para terminar, es importante resaltar que un aumento en la temperatura vendrá acompañado con un aumento en el contenido de vapor de agua en la atmósfera por lo que es esperable que se intensifiquen las tormentas y precipitaciones en ausencia de otros cambios.

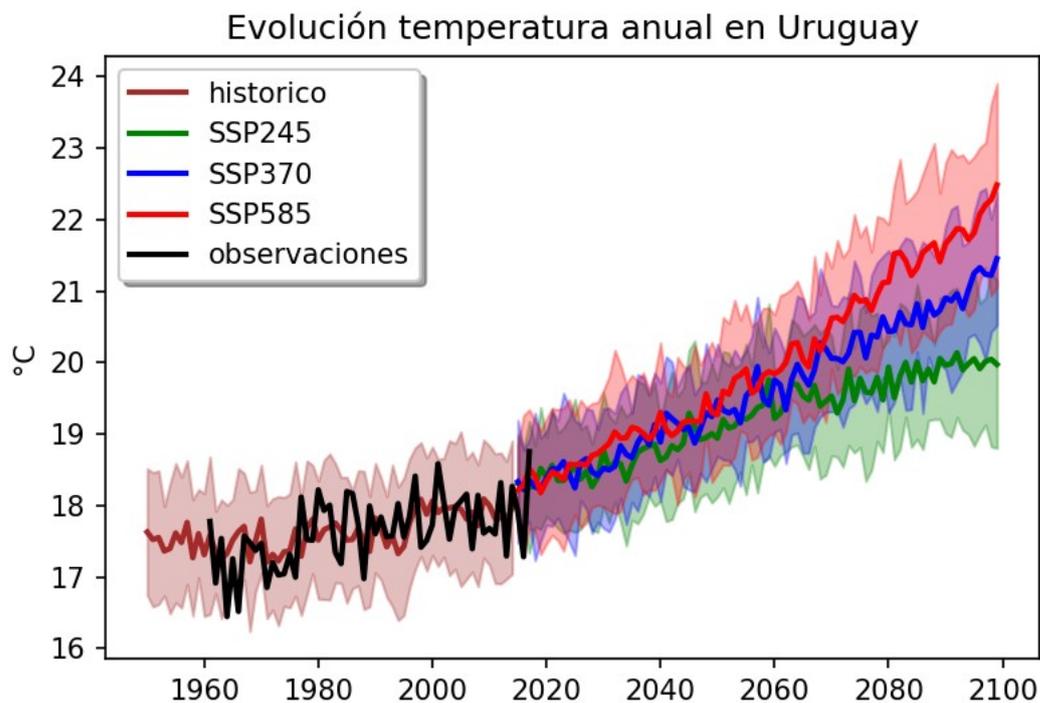


Figura 2 – Evolución observada, histórica simulada y proyecciones para varios escenarios de la temperatura media anual promediada sobre Uruguay. Las curvas simuladas indican el promedio de 10 modelos CMIP6 y el sombreado la dispersión. Fuente Barreiro et al (2019).

Precipitación

Debido a su ubicación en la zona subtropical de Sudamérica los procesos que generan las lluvias en Uruguay dependen de la temporada: los sistemas frontales dominan durante la estación fría, mientras que la convección profunda domina durante la estación cálida, si bien los frentes que llegan a la región también son importantes para organizar la convección. Las precipitaciones climatológicas acumuladas en cada trimestre se muestran en la Figura 3. La distribución de lluvias durante primavera, verano y otoño es latitudinal con mayores registros en el norte donde llegan a valores de 400 mm, mientras que en el sur los registros son más cercanos a los 300 mm. Durante el invierno la distribución de lluvias es longitudinal con mayores valores al este (mayores a 300 mm) y menores al oeste del país donde el acumulado es alrededor de 200 mm. A nivel anual nuestro país tiene un balance de (precipitación- evaporación) positivo, es decir llueve más de lo que evapora, por lo que es necesario un transporte lateral de humedad para mantener las lluvias. A nivel estacional este balance positivo es válido para todas las estaciones excepto el verano cuando la evaporación excede las lluvias.

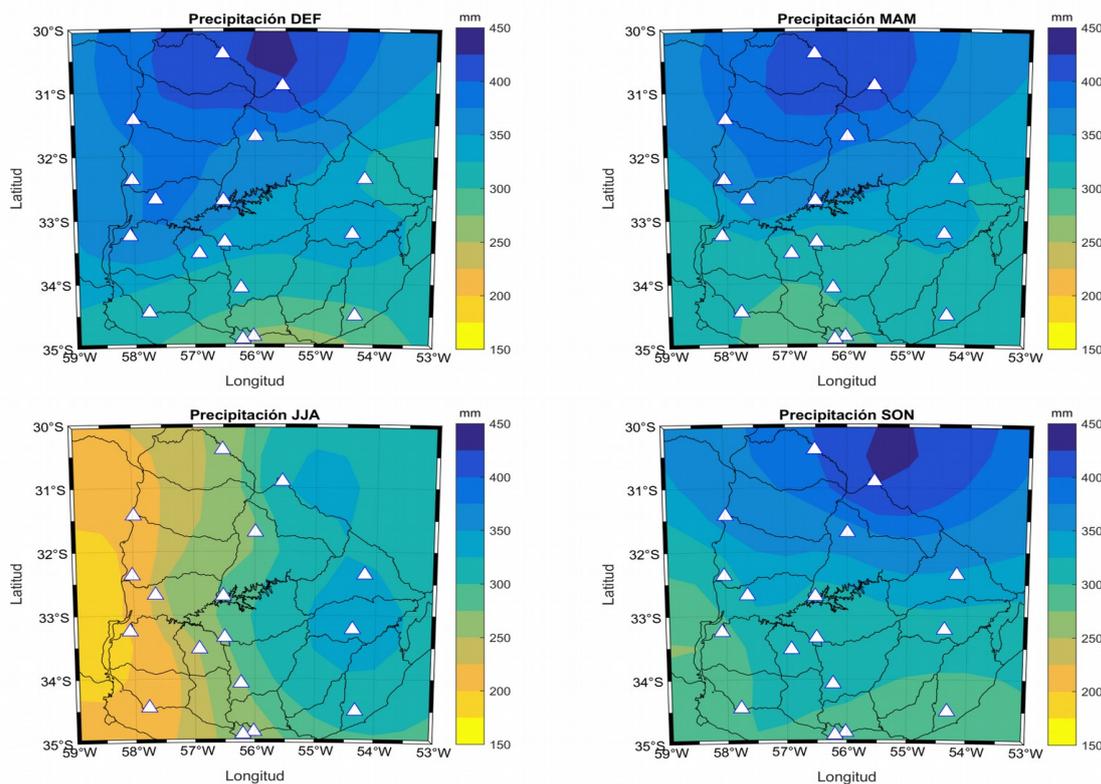


Figura 3 – Precipitación media acumulada en las diferentes estaciones del año.

A diferencia de la temperatura, en el caso de la precipitación la variabilidad año a año es muy significativa con máximos en el norte del país durante verano y otoño.

En verano el litoral noroeste tiene desviaciones estándar típicas cercanas a 200 mm, o sea casi un 50% del acumulado trimestral. En otoño se observa una variabilidad típica de 180 mm en la región norte, mientras que en primavera es menor. Invierno es la temporada de menor variabilidad interanual en las lluvias. Esta gran variabilidad interanual se debe en parte al fenómeno de El Niño-Oscilación Sur (ENSO). Durante años Niño hay un aumento significativo de las lluvias en primavera y verano principalmente al norte del río Negro. Durante años Niña hay disminución de lluvias en todo el territorio para primavera, verano y otoño. Es importante mencionar también que El Niño cambia la distribución diaria de lluvias sobre nuestra región. Se ha mostrado que durante El Niño (La Niña) hay mayor (menor) probabilidad de ocurrencia de eventos extremos de lluvia diaria (Grimm y Tedeschi 2009). Esto ocurre pues durante El Niño se tiende a favorecer algunos regímenes de circulación atmosféricos que están asociados a eventos intensos de lluvia, como por ejemplo aquellos que están asociados a un aumento en la intensidad de los vientos de norte que traen humedad a nuestro país.

Las lluvias medias anuales muestran tendencias positivas en todo el país, cercanas a un 10-20% entre 1961 y 2017 (Figura 4). Este cambio es mucho menor que la variabilidad en el acumulado anual, lo cual dificulta su detección y además muestra que Uruguay debe continuar su adaptación a la variabilidad climática natural ya que será muy útil para adaptarse a los cambios de más largo plazo. No obstante, Uruguay es una de las pocas regiones a nivel mundial para la cual parte del aumento de lluvias observado es debido a la acción humana (Knutson and Zeng 2018). Es bueno notar que las tendencias no son uniformes durante todo el año. A nivel estacional se detecta una tendencia positiva durante verano, otoño y primavera en casi todo el país, siendo otoño la estación con cambios mayores concentrados en la región este (>50 mm). Durante invierno la tendencia es negativa, o sea a menores lluvias principalmente al norte del río Negro. Esta diferencia en las tendencias observadas durante las estaciones cálida y fría implican un aumento en la estacionalidad de las lluvias. Por ejemplo, para el litoral oeste se observa un aumento de las lluvias en abril y primavera tardía, así como una disminución durante julio-setiembre, generando un ciclo anual más marcado.

El aumento en el acumulado de lluvias implica un cambio en los eventos de lluvias más intensos, ya sea en número y/o en intensidad. A nivel anual se ha detectado un aumento significativo en el número de eventos diarios con lluvias mayores a 10 mm (R10) en toda la región, observándose un claro gradiente sur-norte sobre nuestro país que indica un mayor aumento al norte del río Negro y sur de Brasil. En cuanto a la intensidad de los eventos de lluvia, se detectó un aumento durante otoño y primavera cercano al 15% (Carril et al 2016). Durante otoño se observa un gradiente este-oeste con mayores cambios en el este del país acompañando la tendencia en el sur de Brasil. En primavera el aumento sobre Uruguay forma parte de una región

que incluye a la provincia de Buenos Aires. En verano no hay una tendencia clara, mientras que en invierno se detecta una disminución en la intensidad de los eventos de lluvia en consonancia con la disminución en el acumulado trimestral.

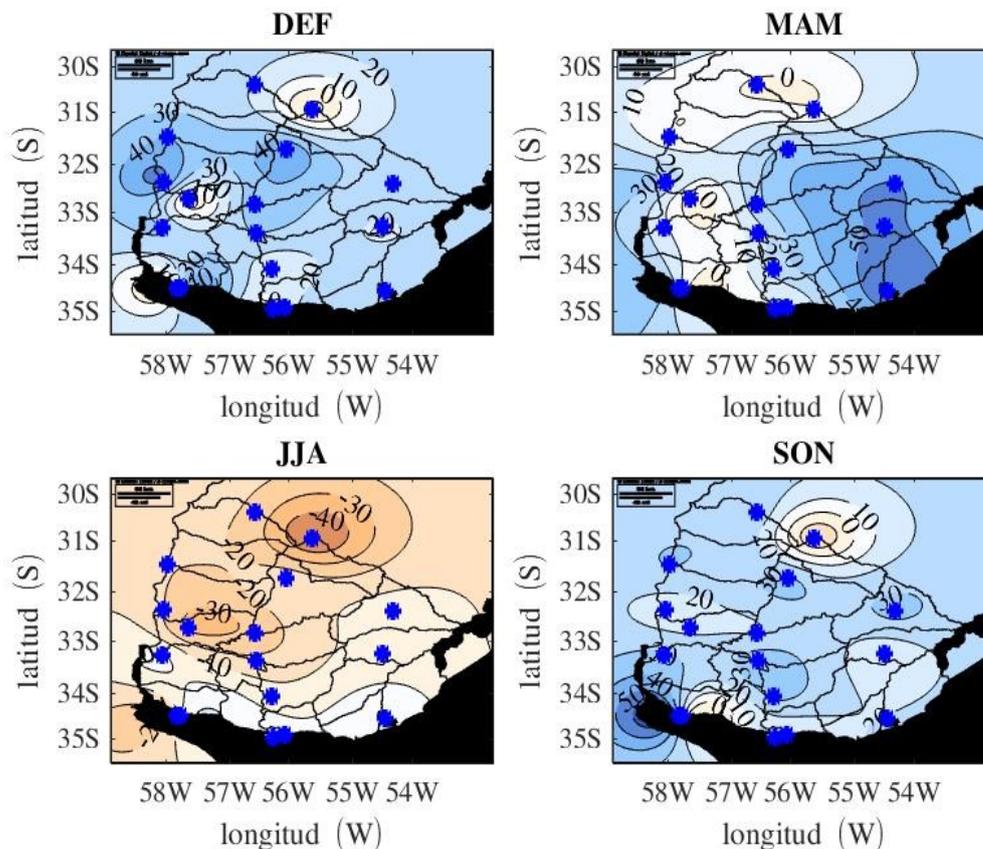


Figura 4 – Tendencias observadas en las precipitaciones 1961-2016. Los puntos azules indican la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Las proyecciones a futuro de las precipitaciones medias anuales en todo el país muestran gran variabilidad interanual superpuesta a una tendencia gradual positiva. El acumulado anual de lluvias sobre Uruguay muestra un cambio entre -5 y 10% para el horizonte cercano y entre -7 y 35% para el horizonte lejano dependiendo del escenario y del modelo. Notar que si bien la tendencia es al incremento, el rango incluye valores negativos lo cual indicaría una disminución en el acumulado anual. La figura 5 muestra los cambios proyectados a nivel estacional para el horizonte lejano en el caso del escenario con mayor uso de combustible fósil (SSP585). Otoño y verano son las estaciones con cambios más robustos. En otoño se proyecta un aumento en las lluvias cercano al 30%, máximo al noreste del país. Verano también muestra un incremento en las lluvias con máximos en el norte y litoral del país cercanos a 20%. Notar que la estructura espacial de las proyecciones a futuro tiene similitudes con las tendencias observadas (ver figura 4), lo cual sugiere que se continuará en la misma dirección de los cambios ya experimentados. Los modelos

no proyectan una tendencia definida para invierno, excepto quizás un incremento pequeño en el este del país. Por último, primavera muestra un patrón con forma de dipolo con incremento en el sur de Brasil y disminución en el suroeste de Uruguay, una estructura diferente a la tendencia observada a la fecha.

El aumento en el acumulado viene acompañado de un aumento en la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos de lluvia y una disminución en el número de días con lluvias débiles para fin de siglo XXI. Estos cambios son mayores para un escenario de mayor uso de combustible fósil.

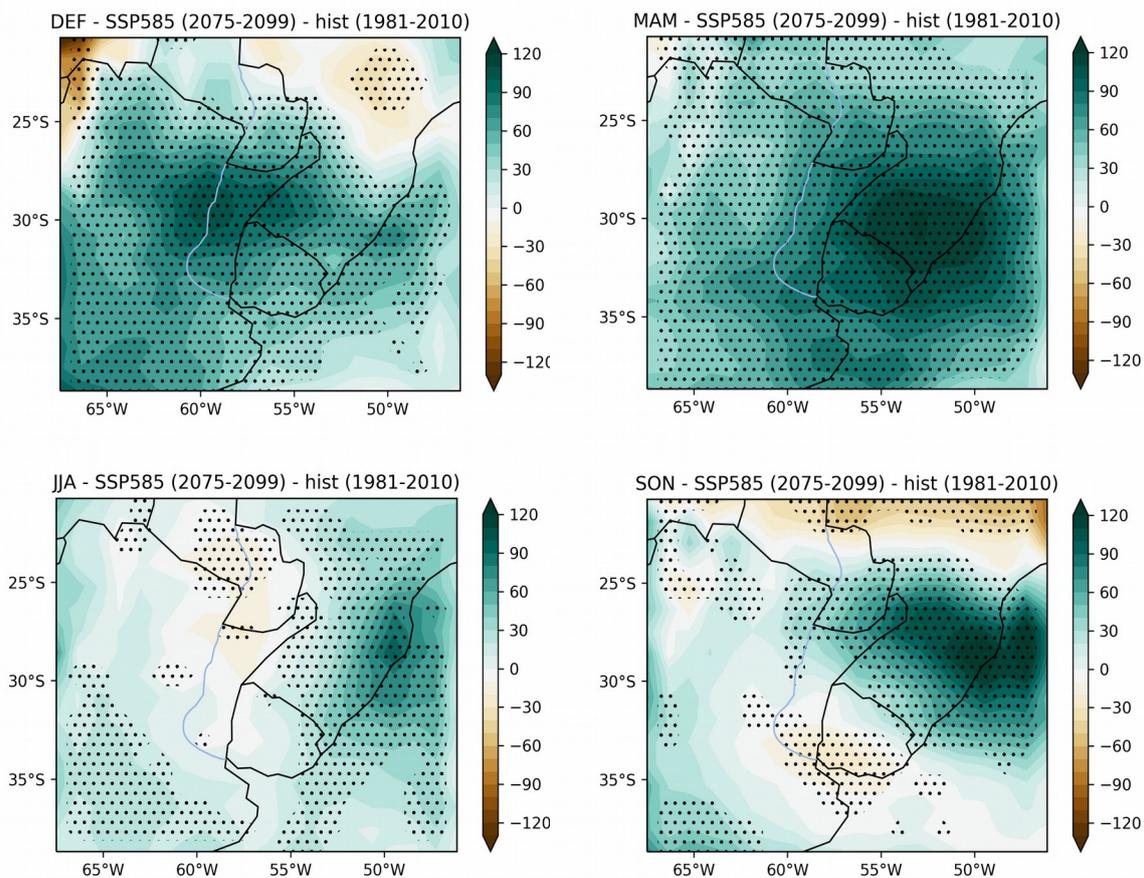


Figura 5 – Cambio en las precipitaciones proyectadas con respecto al período 1981-2010 por 10 modelos de CMIP6 bajo el escenario SSP585 para el horizonte lejano en todas las estaciones del año. Los puntos negros indican regiones donde al menos 7 de los 10 modelos coinciden en el signo del cambio.

Vientos

Los vientos medios en nuestro país dependen de la posición del anticiclón semipermanente del Atlántico sur. Durante verano, otoño y primavera prevalecen los vientos con componente este en todo el país. En invierno el ingreso al continente del anticiclón del Atlántico sur genera vientos con componente este al norte y oeste al sur del país. Los vientos medios trimestrales son relativamente débiles con

intensidades cercanas a 4 nudos (7.2 km/h) pues son el promedio de los vientos diarios que tienen diferentes direcciones e intensidades. Esto se ilustra en la figura 6 donde se muestran las rosas de los vientos medios diarios en diferentes localidades. Se observa que los vientos diarios tienen en general direcciones predominantes pero ésta varía significativamente en particular durante invierno, y su intensidad puede ser de hasta 30 nudos o 56 km/h.

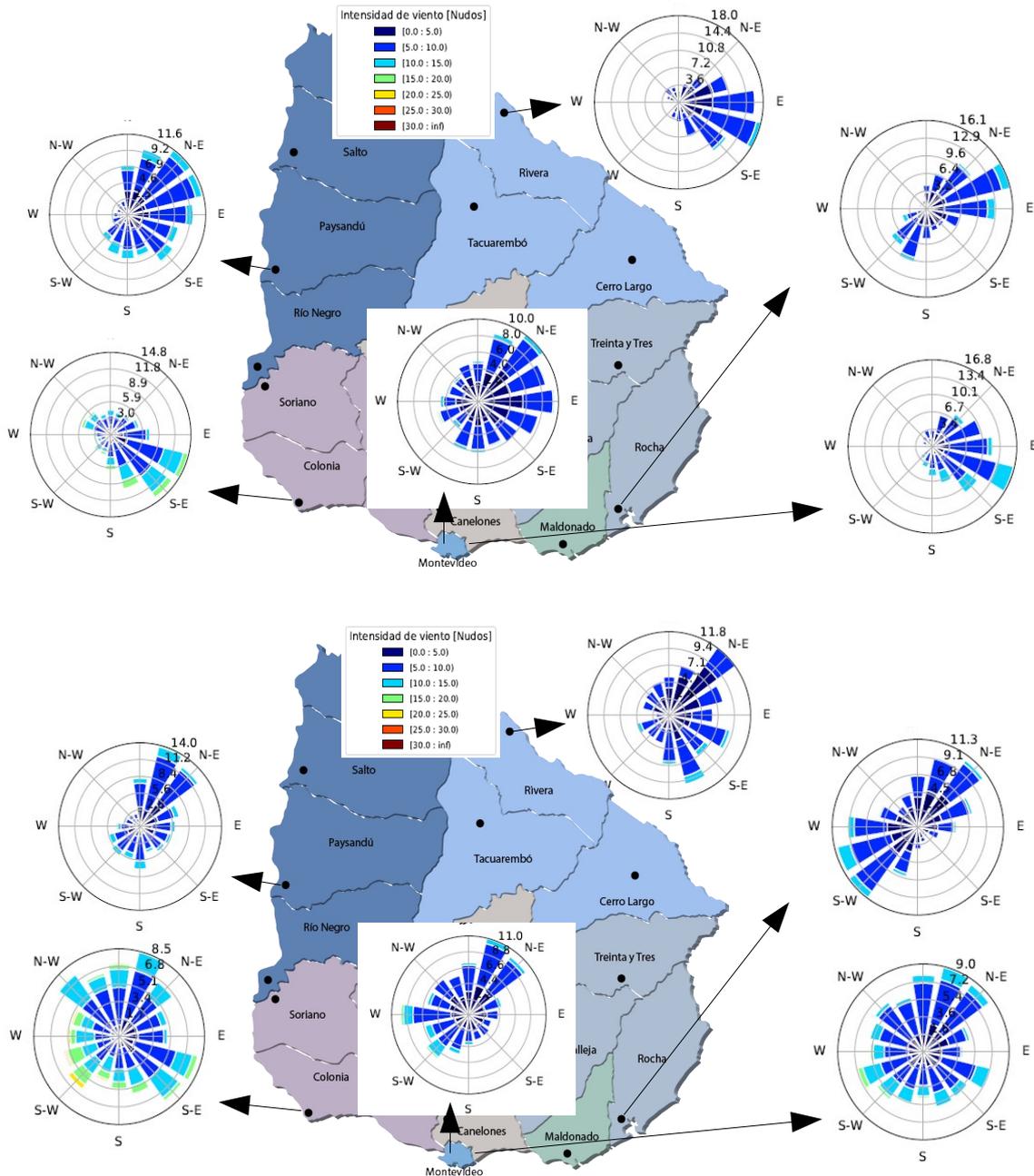


Figura 6 – Rosa de los vientos medios diarios en diferentes localidades durante verano (arriba) e invierno (abajo).

Los vientos también tienen un ciclo diario, como por ejemplo la brisa. La brisa marina, o virazón, es un fenómeno común a lo largo de nuestras costas en verano. Se produce por el calentamiento diferencial entre el continente y el océano durante el día, generando una celda vertical con vientos perpendiculares a la costa desde el océano a la tierra, que penetra en el continente cerca de 30 km y tiene una extensión vertical de 1 km. Durante la noche, la diferencia de temperatura tierra-mar se invierte y se genera la brisa de tierra.

Las tendencias de los vientos se pueden calcular solamente usando datos de reanálisis ya que el registro histórico de mediciones in-situ es corto. En cuanto al campo medio de vientos, durante el período 1979-2020 se observó un aumento de la componente este de los vientos durante primavera en la región centro-oeste y de la componente sureste durante otoño en la región este del país (figura 7). Las proyecciones con modelos climáticos indica un corrimiento hacia el sur del anticiclón semipermanente del Atlántico sur durante todas las estaciones del año, lo cual se traducirá en vientos medios con mayor componente este.

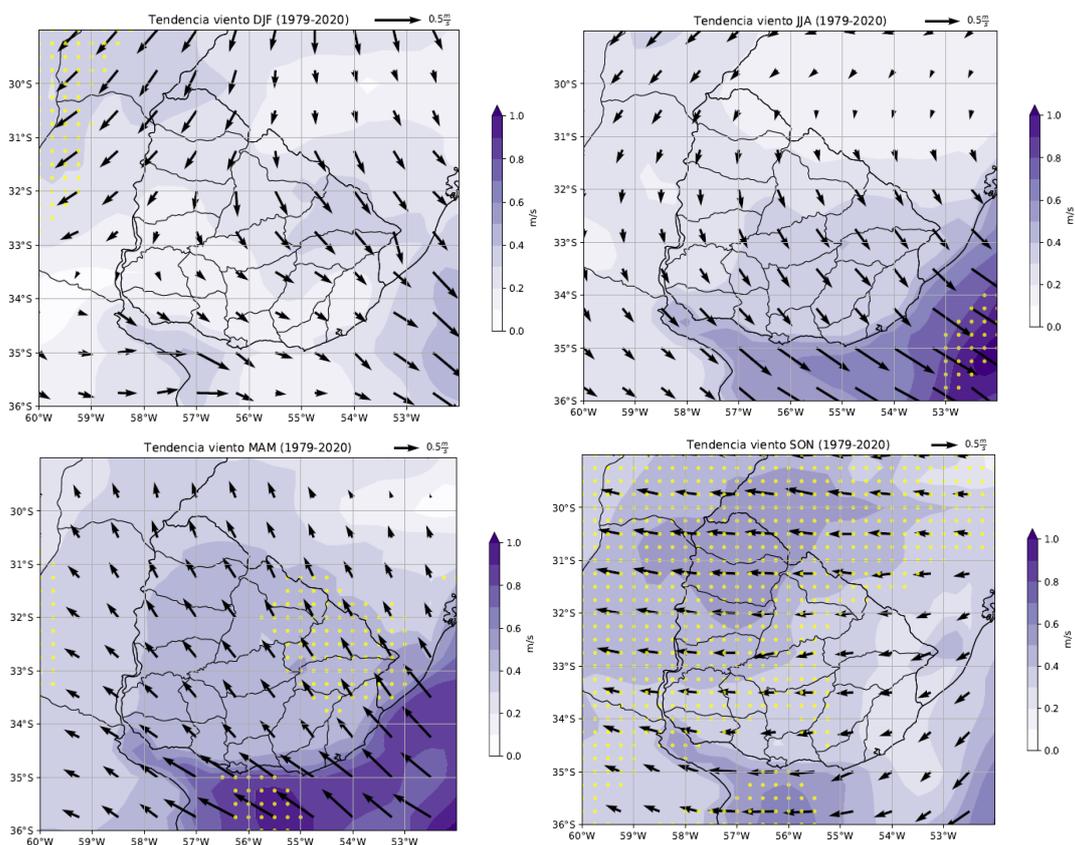


Figura 7 – Tendencia 1979-2020 en los vientos medios durante las diferentes estaciones (datos de ERA5). Los puntos amarillos indican las regiones donde la tendencia lineal es estadísticamente significativa.

Los vientos intensos en nuestro país están asociados a los ciclones extratropicales y a los fenómenos de mesoescala, tales como complejos convectivos y líneas de

turbonada. Estos últimos son los mismos procesos que dan lugar a las tormentas en nuestro país por lo que cambios en las lluvias estarán asociados a cambios en los vientos extremos. Los vientos fuertes en las tormentas severas se deben principalmente a las corrientes convectivas descendentes asociadas y tienen escalas de decenas de metros a varios kilómetros y duran unos minutos. Estas corrientes descendentes pueden alcanzar velocidades superiores a los 200 km/h. Los vientos asociados al pasaje de tormentas severas pueden causar extensos daños también debido a la generación de tornados, como el ocurrido en Dolores en 2016. Por otro lado, los ciclones extratropicales tienen escalas más grandes, sinópticas, y la extensión horizontal de los vientos intensos asociados es del orden de cientos de kilómetros pudiendo durar varias horas. La velocidad de los vientos sostenidos (promedio en 10 minutos) en superficie puede alcanzar los 100 km/h en casos extremos, con rachas de viento superiores en zonas costeras. Los ciclones son el principal agente causante de daños importantes en la infraestructura costera ya que sus fuertes vientos no sólo impactan directamente sobre construcciones terrestres, sino que también generan oleaje y suba del nivel del mar. En consonancia con lo anterior, Durañona et al (2016) concluyen que la mayoría de los eventos de viento intenso ocurren en situaciones de actividad convectiva intensa, es decir estarían asociados a complejos convectivos de mesoescala, líneas de turbonada o frentes fríos, y no son de escala sinóptica. Asimismo, Durañona et al (2019) muestran que en la región sureste el pasaje de ciclones intensos tiene un rol más importante.

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. Los patrones recurrentes en nuestra región durante todo el año están caracterizados por (1) viento norte intensificado, (2) viento del noreste debido a la presencia de un anticiclón ubicado en el Atlántico, (3) viento del suroeste asociado a un ciclón en el Atlántico, (4) viento sur, y (5) zona frontal y desarrollo de un sistema de baja presión sobre el país. 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. En particular, se encuentra que los extremos de viento horarios (mayores al percentil 90) están asociados principalmente a los patrones 3, 4 y 5. En verano además, el patrón caracterizado por viento norte (1) también juega un rol importante en los extremos de viento.

Algunos de los patrones recurrentes mostraron tendencias significativas en el período 1948-2018 del orden del 10-20%. 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 (patrón 5), y un aumento en la ocurrencia

de ciclones sobre el océano Atlántico durante las dos últimas temporadas (patrón 3). Esto sugiere un desplazamiento hacia el sur de la región de formación de ciclones, o un aumento en el número de ciclones intensos. En invierno también se detectó un aumento en la frecuencia de ocurrencia del patrón 2 y disminución del patrón 4. Como el desarrollo de ciclones en el Atlántico (patrón 3) es el patrón más asociado a la ocurrencia de extremos de viento durante invierno, esto indica 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.

Las proyecciones de los modelos climáticos indican cambios a futuro en los patrones de circulación recurrentes. Los resultados bajo el escenario SSP585 indican que durante el siglo XXI durante el invierno se mantendrían las mismas tendencias detectadas durante los últimos 70 años. Es decir, una disminución en la frecuencia de ocurrencia de desarrollo de sistemas de baja presión al sur de Uruguay y de vientos del sur, así como un aumento en la ocurrencia de ciclones y anticiclones sobre el océano Atlántico (Figura 8). 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 (patrón 2). 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 (1). Esta disminución sugiere un menor transporte de humedad, lo cual contrarresta el aumento en el contenido de humedad atmosférico por aumento de temperatura. El aumento proyectado en las precipitaciones de verano y otoño, así como la disminución durante primavera al suroeste del país sugiere 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, lo cual indica una disminución en la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos de viento en esa región, lo cual se condice con la disminución proyectada en las lluvias.

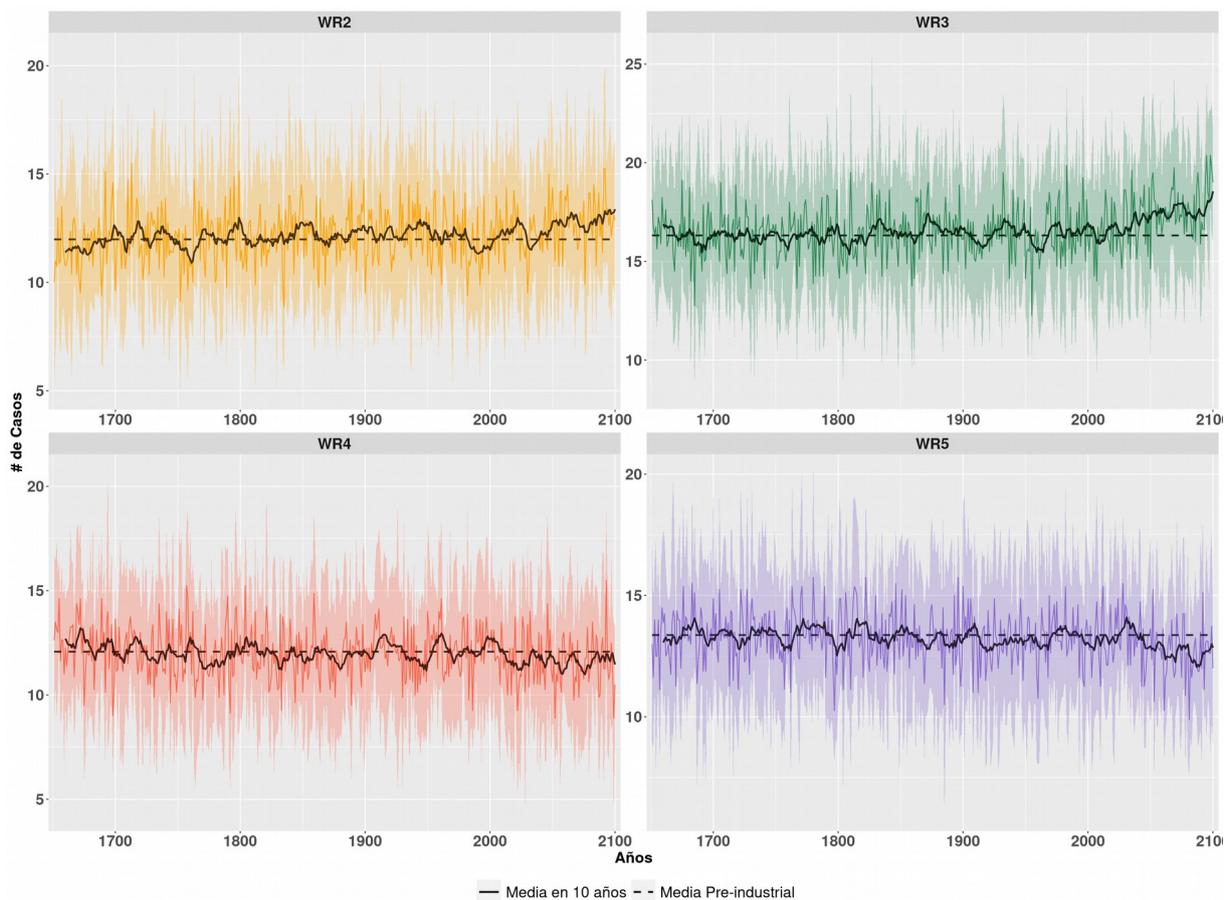


Figura 8 – Evolución en la frecuencia de ocurrencia de los patrones regionales de circulación recurrentes 2, 3, 4 y 5 durante invierno de acuerdo a un ensemble de 8 modelos de CMIP6. La media del ensemble se muestra en la tonalidad intermedia y un suavizado de 10 años de esta serie en tonalidad oscura. La dispersión del ensemble se muestra en la tonalidad más clara. La serie de cada modelo está compuesta por 200 años de período pre-industrial, período histórico (1850-2014) y proyección bajo escenario SSP585 (2015-2100).

Resumen

Como se mencionó en la introducción, para las ciudades los riesgos climáticos más importantes son un aumento de la temperatura y sus extremos, el aumento del nivel del mar costero, sequías, precipitaciones intensas con sus asociadas inundaciones rápidas y vientos extremos. Los resultados mostrados indican que para Uruguay ya se han detectado cambios en algunas de esas amenazas climáticas y que se mantendrán y profundizarán en un contexto de cambio climático. Por ejemplo, ya se ha detectado un aumento en la temperatura y precipitaciones medias, así como un aumento en las precipitaciones intensas y las temperaturas mínimas. El análisis también indica que los vientos extremos han aumentado, principalmente en la zona costera del país durante invierno. Por otro lado, las proyecciones con modelos climáticos indican que en un contexto de cambio climático el aumento de la

temperatura media continuará con un rango de 1.5 a 5.5 °C para fin de siglo XXI dependiendo del escenario, así como es esperable un aumento en las olas de calor. En cuanto a precipitaciones los modelos indican un aumento en las lluvias medias de 20-30% durante otoño y verano, y una disminución en el suroeste del país durante primavera para fin de siglo XXI en el escenario SSP585. Los extremos de precipitación también se incrementarían, así como disminuiría el número de días con lluvias débiles, implicando una situación con mayor número de días secos separados por eventos intensos de precipitación. Por último, los cambios proyectados en los vientos extremos en invierno son robustos, siendo esperable que la frecuencia de ocurrencia de estos eventos siga aumentando en la zona costera. Es importante resaltar que aunque la frecuencia de ocurrencia de algunos patrones de circulación recurrentes no muestren tendencias significativas, el aumento de humedad consecuencia del calentamiento global puede dar lugar a tormentas y precipitaciones más intensas, que tendrán corrientes convectivas descendentes más fuertes. Este parece ser el caso de otoño y verano, por lo que es esperable que a futuro los eventos de viento extremo se intensifiquen en todo el país, pero principalmente al norte del río Negro, en estas temporadas. En primavera, las proyecciones indican una disminución en los vientos extremos en la región suroeste del país y aumento en el este. La figura 9 resume los cambios proyectados bajo escenario SSP585.

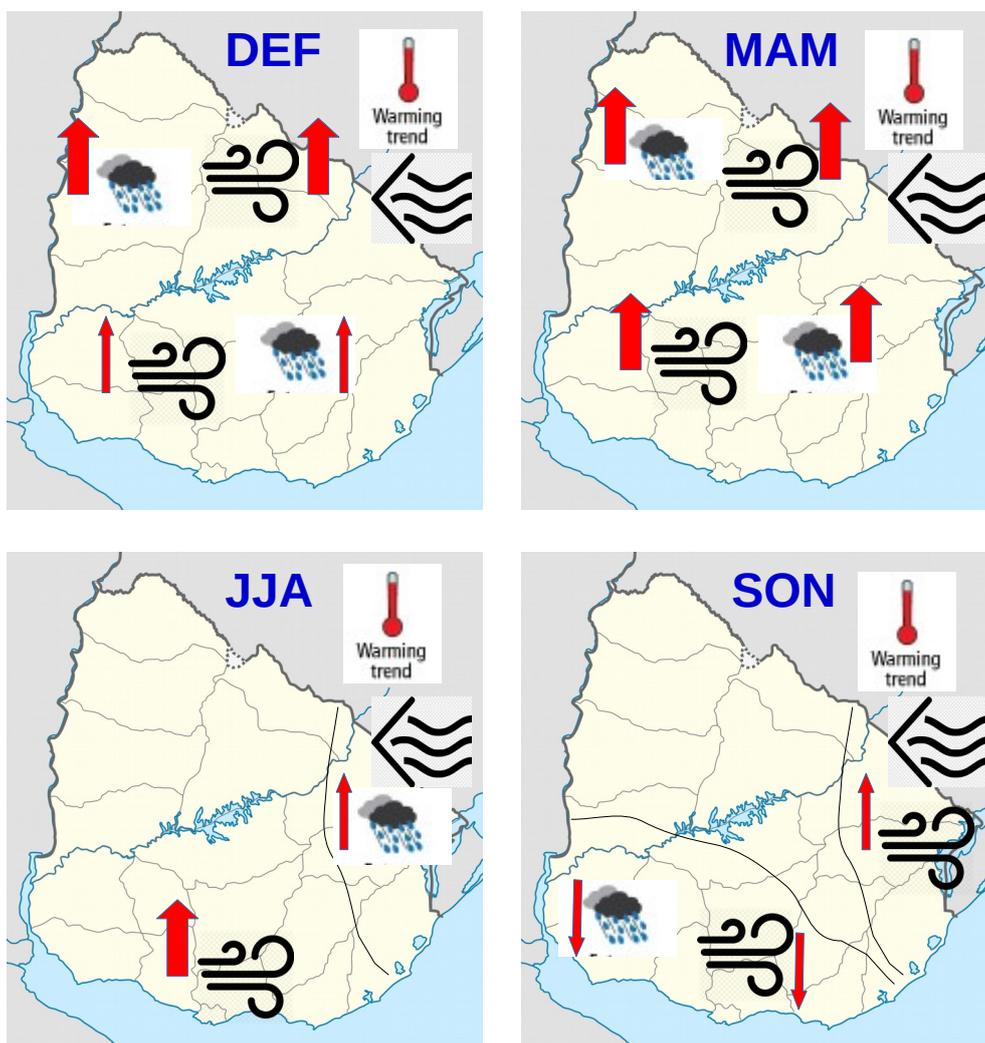


Figura 9 – Tendencias proyectadas en precipitación (media y extremos), vientos (media y extremos) y temperatura media en el escenario SSP585.