



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS HÍDRICAS

Reporte científico: Variabilidad y cambio climático en la provincia de Santa Fe

Servicio a terceros: Análisis regional de la
precipitación en la provincia de Santa Fe en el
contexto del cambio climático

Informe Parcial

Febrero de 2019



cevarcam

CENTRO DE ESTUDIOS DE
VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
2. VARIABILIDAD CLIMÁTICA.....	1
3. CAMBIO CLIMÁTICO OBSERVADO	3
4. EVENTOS EXTREMOS	5
5. VARIABILIDAD Y CAMBIOS EN LOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN. ANÁLISIS ZONAL.....	8
5.1 Zona noroeste (estación Ceres).....	9
5.2 Zona noreste (estación Reconquista)	11
5.3 Zona centro-oeste (estación Rafaela)	12
5.4 Zona centro-este (estación Paraná).....	13
5.5 Zona centro-suroeste (estación Marcos Juárez)	14
5.6 Zona centro-sureste (estación Rosario)	15
5.7 Zona suroeste (estación Laboulaye)	16
5.8 Zona sureste (estación Pergamino)	18
6. IMPACTOS DE LOS EVENTOS EXTREMOS.....	19
Referencias Bibliográficas.....	24

VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PROVINCIA DE SANTA FE

Miguel A. Lovino¹; Gabriela V. Müller^{1,2}; Leandro C. Sgroi¹

¹Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático (CEVARCAM) – FICH – UNL.
Santa Fe, Argentina.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

1. INTRODUCCIÓN

La Pampa Húmeda tiene una gran importancia económica y demográfica en Sudamérica, y es clave para la seguridad alimentaria de la región y del mundo. La provincia de Santa Fe, como parte de la mencionada Pampa Húmeda y centro neurálgico de la región núcleo agrícola ganadera, desempeña un rol fundamental y estratégico a nivel nacional, ya que concentra la mayor parte de la producción agroindustrial del país. En este contexto, el clima tiene un protagonismo destacado, dado que impacta dicha producción en forma directa.

El clima se define como el estado medio de la atmósfera (temperatura, precipitación, nubosidad, etc.) que caracteriza a una región del planeta en el largo plazo. El clima es el resultado de complejas interacciones que se producen entre los diferentes componentes del sistema climático compuesto por la atmósfera, los océanos, la criósfera y los continentes. Como todos los sistemas en la naturaleza, el sistema climático presenta variaciones y cambios. Así surgen los conceptos de variabilidad climática y cambio climático. Estos conceptos representan procesos físicos muy diferentes, pero que están íntimamente relacionados. Las secciones 2 y 3 abordan la variabilidad y el cambio climático en la Pampa Húmeda y en particular en la provincia de Santa Fe.

Una característica climática de la provincia de Santa Fe es la ocurrencia de eventos extremos de precipitación (sequías e inundaciones), así como de temperatura (olas de calor y olas de frío). Los impactos de los extremos climáticos y el potencial de desastres se acrecientan en las regiones con alta exposición y vulnerabilidad, pudiendo exacerbarse aún más ante un contexto complejo de variabilidad y cambio climático (IPCC, 2014). En particular, el nordeste de Argentina es altamente vulnerable a estos eventos extremos, los cuales se discuten en las secciones 4 y 5. Finalmente, la sección 6 resume y analiza los impactos observados de la variabilidad y el cambio climático, haciendo particular énfasis en los eventos extremos.

2. VARIABILIDAD CLIMÁTICA

La variabilidad climática es el apartamiento de las variables climáticas (temperatura, precipitación, etc.) respecto del estado medio que caracteriza el clima de una región. Como se menciona anteriormente, el clima surge de la interacción de todo el sistema climático, en el cual la temperatura de la superficie del mar (TSM) de los océanos globales tiene un

rol fundamental. El intercambio de energía más activo y prominente entre la superficie de la tierra y la atmósfera se encuentra en la interfaz océano-atmósfera. Las variaciones a corto plazo —desde días hasta unas pocas semanas— de las propiedades físicas en la superficie del océano son insignificantes en comparación con las de los continentes. Los océanos tropicales y subtropicales son una fuente principal de energía y humedad para la atmósfera, por lo que los cambios lentos de TSM se convierten en un factor clave para modular las variaciones climáticas de baja frecuencia en todo el mundo. El mejor ejemplo de esto es el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) que se desarrolla en las regiones ecuatoriales y tropicales del Océano Pacífico.

Por otra parte, el clima varía en diferentes escalas temporales y estas variaciones dan origen a la variabilidad climática. Se sabe que el ENOS es una fuente importante de variabilidad climática estacional a interanual en varias regiones del planeta, muchas de las cuales están ubicadas remotamente. En escalas temporales interanuales, el ENOS es la mayor fuente de variabilidad hidrológica en Sudamérica (Kiladis y Mo, 1998). La presencia de El Niño puede aumentar las lluvias anuales y, en particular, los eventos de lluvias intensas, como así también inducir el aumento de los caudales de los ríos (Berri et al., 2000; Camilloni y Barros, 2003). En especial, las mayores crecidas del río Paraná en su tramo medio se registraron durante eventos El Niño intensos. Estas crecidas son consecuencia de los excesos de precipitación en la cuenca alta del Paraná que aporta más del 90% del caudal del río y tiene una directa vinculación con los eventos extremos de El Niño (Camilloni y Barros, 2003; Krepper et al., 2008). Por otro lado, las condiciones de La Niña pueden favorecer las sequías en el noreste de Argentina (Berri et al., 2002; Penalba y Rivera, 2016).

Los eventos El Niño y La Niña también afectan las temperaturas locales en el centro y noreste de Argentina. Los eventos El Niño intensifican los períodos cálidos y reducen el número de días de heladas, mientras que las condiciones de La Niña incrementan los días con heladas y su severidad, principalmente durante el invierno (Müller et al. 2000; Rusticucci et al., 2017). En particular para la Pampa Húmeda, el número anual de heladas es generalmente menor que el promedio durante los años El Niño y mayor que el promedio durante los años de La Niña (Müller, 2006). Esto se debe a que ENOS puede modular los patrones de circulación atmosférica de gran escala y, por lo tanto, la frecuencia de los sistemas sinópticos que pueden causar bajas temperaturas y consecuentemente heladas en la Pampa Húmeda (Müller et al., 2005). Durante los eventos ENOS, se favorecen algunos de los sistemas sinópticos asociados a los eventos de heladas, por ejemplo, la advección del aire frío responsable de las heladas advectivas, o el desarrollo de anticiclones que combinados con cielos despejados, vientos débiles y baja humedad son responsables de las heladas radiativas (Müller et al., 2003). Por otra parte, el ENOS también influye en la fecha de la primera y la última helada del año. Sobre la Pampa Húmeda, el inicio de la primera helada se retrasa durante los años El Niño, mientras que en años La Niña la ocurrencia de la primera helada se adelanta. En cambio no hay una influencia significativa en la fecha del último evento de helada del año (Müller et al., 2000).

En escalas de tiempo decadales a multidecadales, el Océano Pacífico Tropical también tiene un rol muy importante modulando el hidroclima local de manera similar que el ENOS. Condiciones cálidas de la TSM del Océano Pacífico pueden favorecer décadas más húmedas mientras que condiciones frías pueden causar décadas más secas (Andreoli y Kayano, 2005). Pero no sólo el Océano Pacífico impacta en el clima regional, también lo que ocurre en el Océano Atlántico tiene un rol fundamental. En contraposición al comportamiento del Océano Pacífico, el Océano Atlántico Norte y Central más frío que lo normal favorece las décadas húmedas en el nordeste de Argentina y cuando registra anomalías cálidas pueden provocar períodos secos (Seager et al., 2010; Barreiro et al., 2014).

3. CAMBIO CLIMÁTICO OBSERVADO

El cambio climático es un cambio en el estado medio del clima, que se manifiesta por una tendencia en las variables climáticas durante un prolongado período de tiempo (décadas a centenas de años). El mismo surge como resultado de desequilibrios en el balance energético del sistema tierra-atmósfera que son causados por procesos y agentes que pueden ser de origen natural o antrópico. En las últimas décadas, el cambio climático observado en el planeta pone de relieve la necesidad de entender cómo las diferentes regiones se ven impactadas. Esta temática se aborda en detalle en estudios científicos para la provincia de Santa Fe recientemente publicados.

El análisis de los datos observados en la provincia de Santa Fe demuestra que se produjo un importante cambio climático a partir de mediados del siglo XX (Lovino et al., 2014; Lovino et al., 2018a). Estas evidencias surgen del estudio de diferentes variables hidroclimáticas en la región para el periodo 1901-2016. En la Figura 1 se presenta la serie del promedio areal en toda la provincia de las anomalías (diferencia con respecto al promedio) de precipitación anual, temperatura mínima, temperatura máxima y el caudal medio mensual del río Paraná en Corrientes. La Figura 1a muestra la precipitación, la cual tuvo un período más húmedo que lo normal a partir de 1960, con una tendencia no lineal positiva en toda la serie. La temperatura también ha experimentado un cambio climático, que se refleja en la Figura 1b, con la temperatura mínima aumentando de manera sostenida a partir de 1960 y la temperatura máxima (Figura 1c) que también ha aumentado en las primeras décadas del siglo XX y particularmente a partir de la década del 2000. Por último, la Figura 1d revela el incremento de los caudales del río Paraná a partir del año 1970. Estos resultados sugieren que las principales variables hidroclimáticas han sufrido variaciones de largo período asociadas a tendencias o a variabilidad decadal que modificaron las condiciones del hidroclima local.

Estos cambios podrían haber estado influenciados por condiciones antrópicas y por variabilidad decadal natural. Por ejemplo, entre los forzantes naturales, se puede citar el enfriamiento del Océano Atlántico tropical en las últimas décadas y el calentamiento del Océano Pacífico tropical que podrían haber favorecido las condiciones más húmedas y

cálidas (Seager et al., 2010; Jacques-Coper y Garreaud, 2015). También, dentro de los forzantes antrópicos, es posible que los cambios de uso de suelo hayan reducido la evapotranspiración y favorecido el escurrimiento superficial, induciendo un aumento de los caudales (Doyle y Barros, 2011).

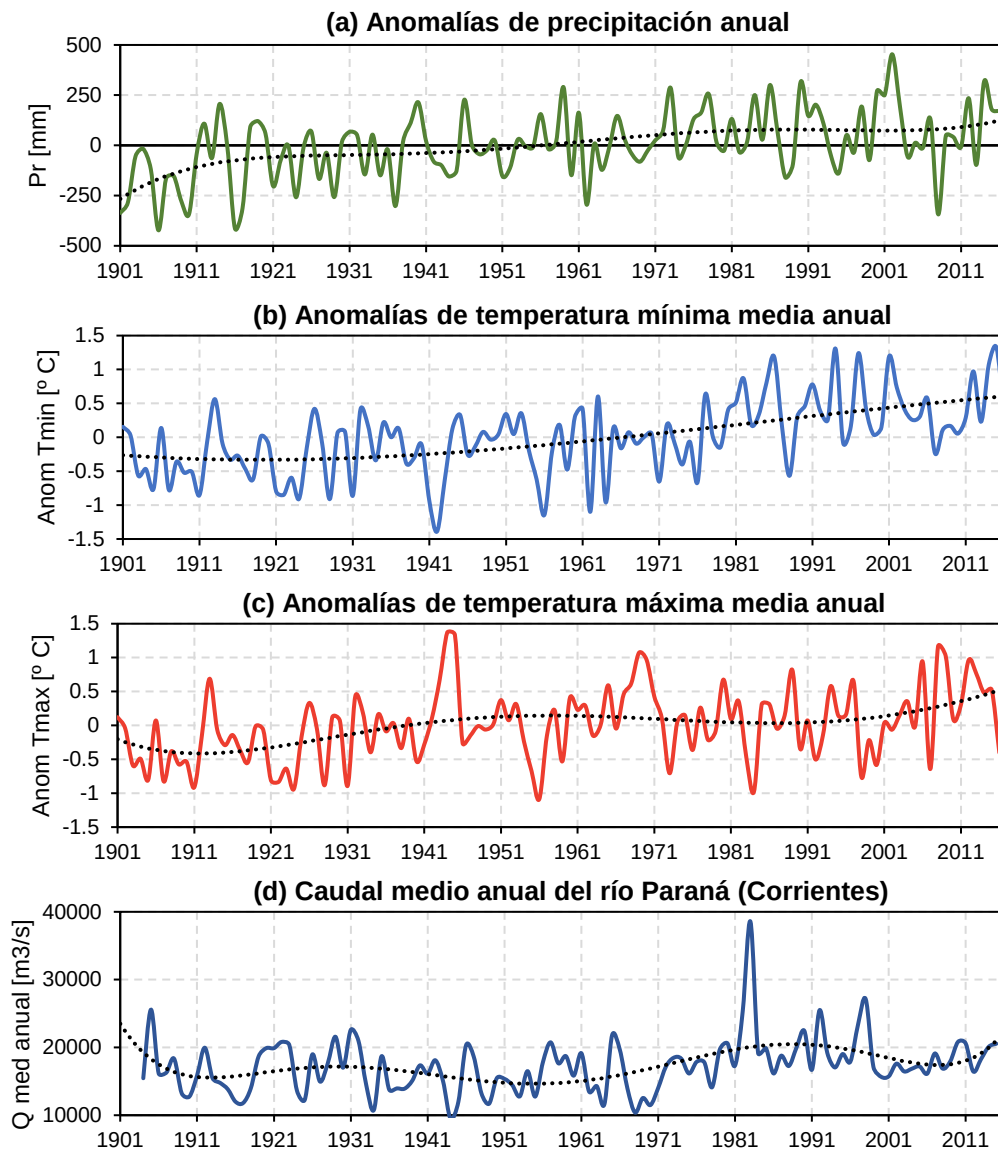


Figura 1: Series temporales en promedio areal en toda la provincia de Santa Fe (1901-2016) de (a) anomalías de precipitación anual, (b) anomalías de temperatura máxima media anual, (c) anomalías de temperatura mínima media anual y (d) el caudal medio anual del río Paraná en Corrientes. Tendencias no lineales en línea de puntos.

4. EVENTOS EXTREMOS

Los eventos extremos se caracterizan por ser sucesos que ocurren en un determinado momento y lugar, que se consideran inusuales por su ubicación en alguno de los extremos de la distribución estadística de probabilidad de ocurrencia. Ejemplos de eventos extremos son temperaturas muy elevadas o muy bajas, lluvias muy intensas, extensos períodos sin precipitación, entre otros. Cuando un evento extremo persiste en el tiempo (una estación o un período más prolongado) puede ser considerado un evento climático extremo, por ejemplo, sequías o inundaciones. En un contexto de cambio climático, pequeños cambios en el clima medio han originado cambios significativos en los eventos extremos (Seneviratne et al., 2012).

En todo el planeta, las observaciones muestran que los extremos de temperatura han cambiado hacia condiciones más cálidas durante los últimos 60 años y las lluvias intensas aumentaron en una fracción mayor de la superficie terrestre que en la que decrecieron, aunque ampliamente influenciados por variaciones regionales y subregionales y variabilidad en escalas temporales de interanual a decadal (Seneviratne et al., 2012; Donat et al., 2013). En el sudeste de Sudamérica, consistentemente con los cambios globales, los eventos hidroclimáticos tienden hacia condiciones más cálidas y húmedas; ya que aumentó la magnitud y la frecuencia de extremos de temperatura y de precipitaciones intensas (Rusticucci, 2012; Skansi et al., 2013; Cavalcanti et al., 2015; Carril et al., 2016). En esta región, los incrementos de la precipitación (especialmente lluvias intensas) y de los caudales, aumentaron la frecuencia de crecidas e inundaciones que afectaron la productividad agrícola y ganadera e impactaron los asentamientos urbanos y rurales (Magrin et al., 2014).

Las actividades agroindustriales del noreste de Argentina están influenciadas por un complejo sistema de recursos hídricos superficiales de la cuenca inferior del río Paraná, donde se concentran los mayores centros urbanos del país. La conjunción de estos factores hace que la región tenga una alta exposición y vulnerabilidad a los eventos hidroclimáticos extremos, tales como sequías e inundaciones. Los mismos muestran una relación inversa entre la frecuencia y la duración, es decir que los eventos de mayor frecuencia tienden a ser de más corta duración, así como los de baja frecuencia tienden a prolongarse más en el tiempo (Krepper y Zucarelli, 2010).

El nordeste de Argentina es altamente vulnerable a estos eventos hidroclimáticos extremos en escalas temporales relevantes para la agricultura (Lovino et al., 2014; Lovino, 2015). Los resultados de estos estudios muestran que a partir de 1970 se han registrado los extremos húmedos más severos de los últimos 100 años (Figura 2b). Las sequías hidrológicas más severas en la región ocurrieron entre 1901 y 1960, con un extenso episodio bajo condiciones muy secas entre 1921 y 1939; mientras que un período de extremos húmedos de larga duración y gran intensidad se registró entre 1970 y 2005. La Figura 2a indica que la porción central de la provincia de Santa Fe mostró ser el área más vulnerable a extremos húmedos y secos.

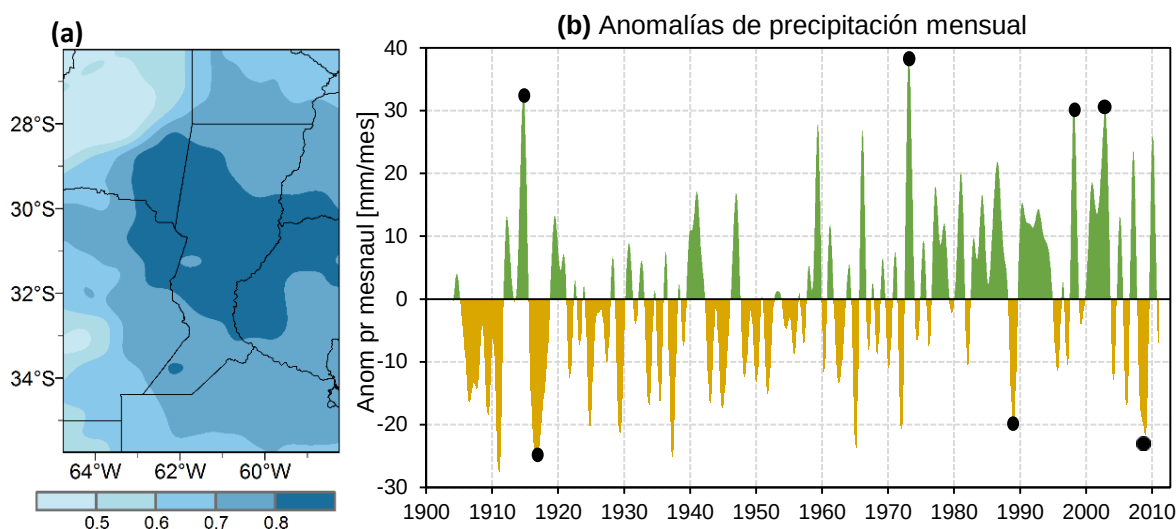


Figura 2: (a) Correlación entre las series temporales de precipitación de cada punto del mapa y la serie temporal media areal de anomalías en el panel (b). Se remarcen con puntos negros los eventos extremos más severos del siglo XX. Adaptado de Lovino et al. (2018a).

Los eventos extremos más severos han ocurrido durante años de El Niño o La Niña fuertes o muy fuertes, incluyendo los extremos húmedos de 1914, 1972–1973 y 1997–1998 y las sequías severas de 1916–1917 y 1988–1989 (puntos negros en la Figura 2b). Sin embargo, el ENOS no es el único forzante del clima local. La Figura 2b muestra que se registraron condiciones extremadamente húmedas en 2002-2003 durante un evento El Niño moderado y una sequía muy severa en 2008-2009 durante un evento La Niña moderado. Tal como se señaló anteriormente, diferentes estudios han demostrado que otros forzantes oceánicos como el Atlántico tropical del norte o la Zona de Convergencia del Atlántico Sur se pueden combinar con la ENOS para intensificar o atenuar los extremos húmedos o secos (Seager et al., 2010; Mo y Berbery, 2011). Además de estos forzantes, existen factores regionales y locales que pueden contribuir a una modulación del evento extremo una vez que se inicia (Mo y Schemm, 2008). La época del año, el transporte de humedad, y las condiciones de humedad del suelo, son todos factores que influyen en la duración e intensidad de las sequías o los excesos hídricos. Otro factor importante son las circulaciones atmosféricas que pueden obstaculizar o facilitar el desarrollo de sistemas de precipitación durante largos períodos de tiempo.

La intensidad de la precipitación se ha incrementado desde principios de 1970 hasta la actualidad, tal como lo muestra la Figura 3a. La Figura 3b indica que este aumento se manifestó particularmente en la región centro de la provincia (estaciones de Sauce Viejo y Rafaela), con un aumento promedio de hasta 1 mm/día en cada década. La Figura 3c indica que los períodos secos intraestacionales (días secos consecutivos) también se han incrementado desde 1970 hasta la actualidad. Especialmente, este incremento se manifestó en el norte de la provincia (estaciones de Ceres y Reconquista), con un aumento porcentual de entre el 25% y 50% de los valores medios; es decir pasando de 35 y 45 días en promedio a aproximadamente 50 y 60 días secos consecutivos en el año. Estos resultados indican que la precipitación se concentra en menos días de lluvia con mayor

intensidad (y mayor cantidad anual, tal como se discutió anteriormente). Esta concentración favorece además los períodos secos intraanuales o estacionales.

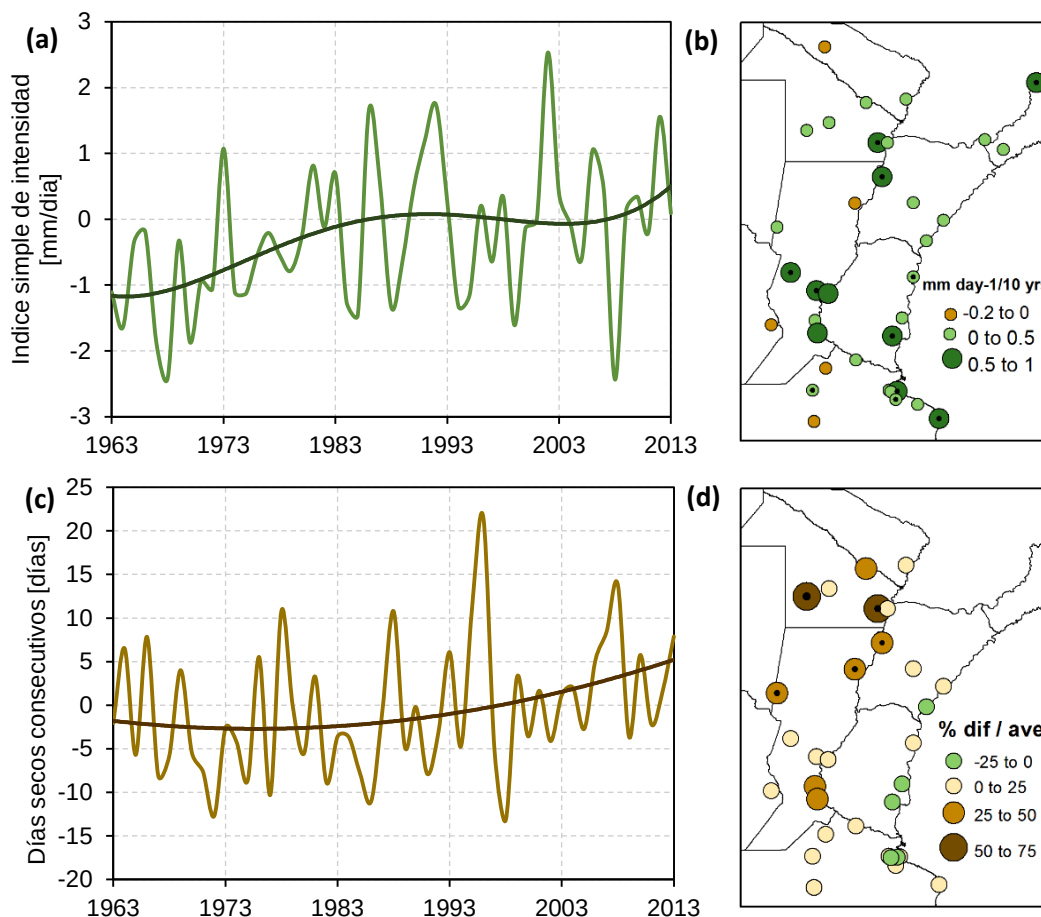


Figura 3: Anomalías de series temporales medias areales en la provincia de Santa Fe (izquierda) y mapa de cambios observados en estaciones meteorológicas (derecha) para: precipitación intensa caracterizada por el índice simple de intensidad (cociente entre la cantidad de lluvia anual y el número de días con precipitación) en (a) y (b) y el número de días secos consecutivos en (c) y (d). Adaptado de Lovino et al. (2018b).

Los extremos de temperatura también han cambiado en las últimas décadas, revelando una tendencia hacia condiciones más cálidas en la región, consistentemente con la tendencia observada en la mayor parte del planeta. Tal como se muestra en las Figuras 4a y 4b, este calentamiento se manifiesta por el incremento de la frecuencia de días cálidos (porcentaje de días con temperatura máxima muy alta) y las noches cálidas (porcentaje de noches con temperatura mínima muy alta). La Figura 4d indica que la frecuencia de noches frías (porcentaje de noches con temperatura mínima muy baja) ha declinado a partir de la década de 1960 siguiendo la tendencia de calentamiento regional. Pero este decaimiento se ha estabilizado a partir de 1980. En ese orden, los días con heladas no presentan una tendencia significativa de cambio, aunque tienen una gran variabilidad de año en año y de década en década (Lovino et al., 2018b). El porcentaje de días fríos (días con temperatura máxima muy baja, Figura 4c) también ha disminuido, especialmente a partir del año 2000.

Las olas de calor y de frío también reflejan el calentamiento general en la provincia de Santa Fe (Lovino et al., 2018b). Las olas de calor duplican la frecuencia y duración de las olas de frío. En particular, durante las últimas décadas las olas de calor han tendido a incrementar su duración, mientras que las olas de frío tienden a ser menos persistentes. La ocurrencia de olas de calor de mayor duración está también relacionada a la mayor duración de períodos secos. Las olas de calor son más frecuentes y persistentes hacia el noroeste de la provincia, donde suele producirse un mayor número de días secos consecutivos, con eventos de hasta 50 días sin precipitación, tal como se discutió anteriormente.

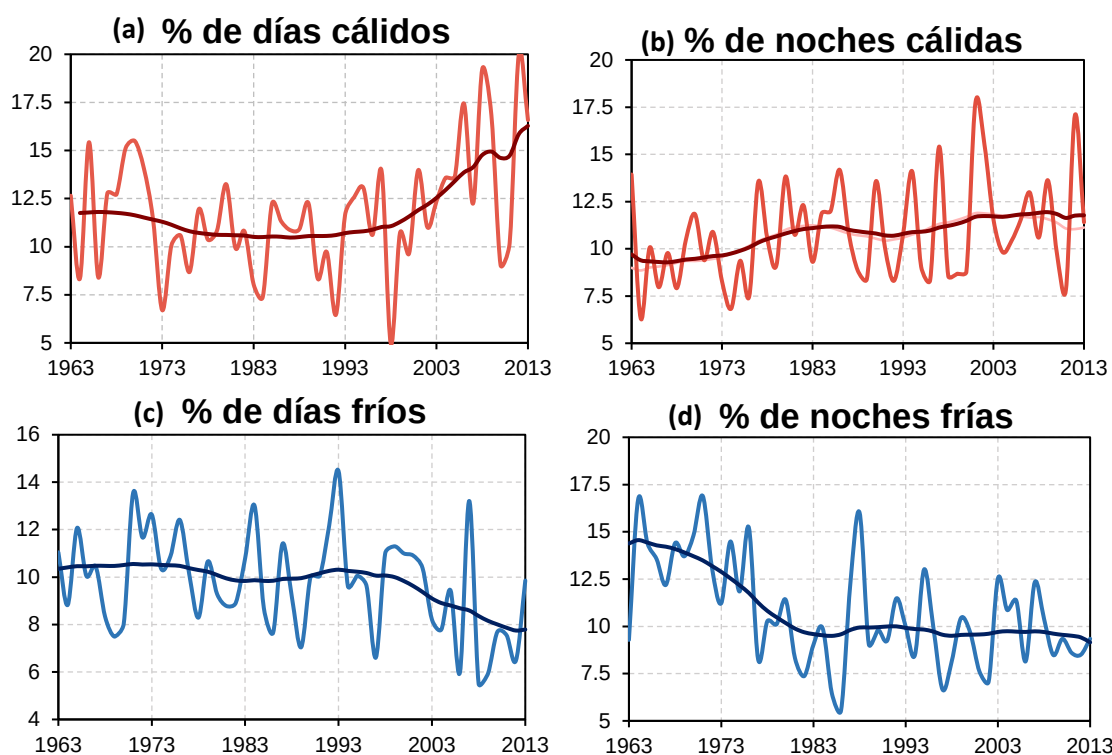


Figura 4: Evolución temporal de los extremos de temperatura en la provincia de Santa Fe (promedio areal, 1963-2013). Se grafican las tendencias no lineales de los cambios medios. Adaptado de Lovino et al. (2018b).

5. VARIABILIDAD Y CAMBIOS EN LOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN.

ANÁLISIS ZONAL

Los cambios y la variabilidad en la precipitación y sus extremos, principalmente a través de tormentas intensas, aunque también por déficits que conllevan a severas sequías, han afectado las actividades productivas y la población de la provincia de Santa Fe. Las observaciones en estaciones meteorológicas en la provincia o en cercanías (Tabla 1) permiten obtener una regionalización de las señales de cambio y variabilidad climática. Utilizando las estaciones disponibles con extensos períodos de datos de calidad controlada y escasos datos faltantes (ver Tabla 1), se establece una zonificación con polígonos de

Thiessen que permite adoptar un área de referencia en función de cada estación de observación (ver Figura 5).

Nº	Estación	Latitud	Longitud	Período	Datos faltantes (%)
1	Ceres AERO	-29.88	-61.95	01/01/1931 a 31/12/2017	1.16%
2	Reconquista AERO	-29.18	-59.7	01/01/1948 a 31/12/2017	3%
3	Rafaela INTA	-31.18	-61.55	01/04/1956 a 31/12/2017	0.02%
4	Paraná AERO	-31.78	-60.48	01/01/1931 a 31/12/2017	0.33%
5	Marcos Juárez	-32.68	-62.12	01/10/1961 a 31/12/2017	0.01%
6	Rosario AERO	-32.92	-60.78	01/04/1935 a 31/12/2017	0.21%
7	Laboulaye	-34.13	-63.37	01/01/1940 a 31/12/2017	0.02%
8	Pergamino INTA	-33.93	-60.55	15/07/1931 a 31/12/2017	0.07%

Tabla 1: Estaciones con extensos períodos de datos y escaso porcentaje de faltantes utilizadas para detectar señales de variabilidad y cambio climático en la provincia de Santa Fe.

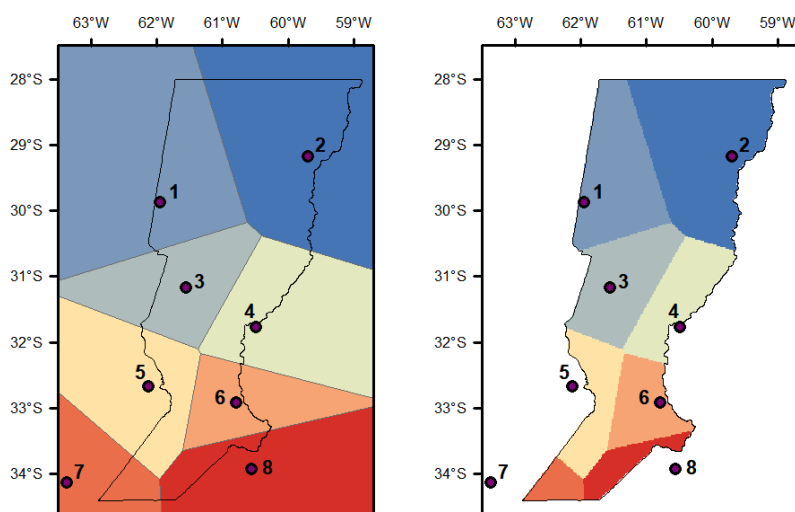
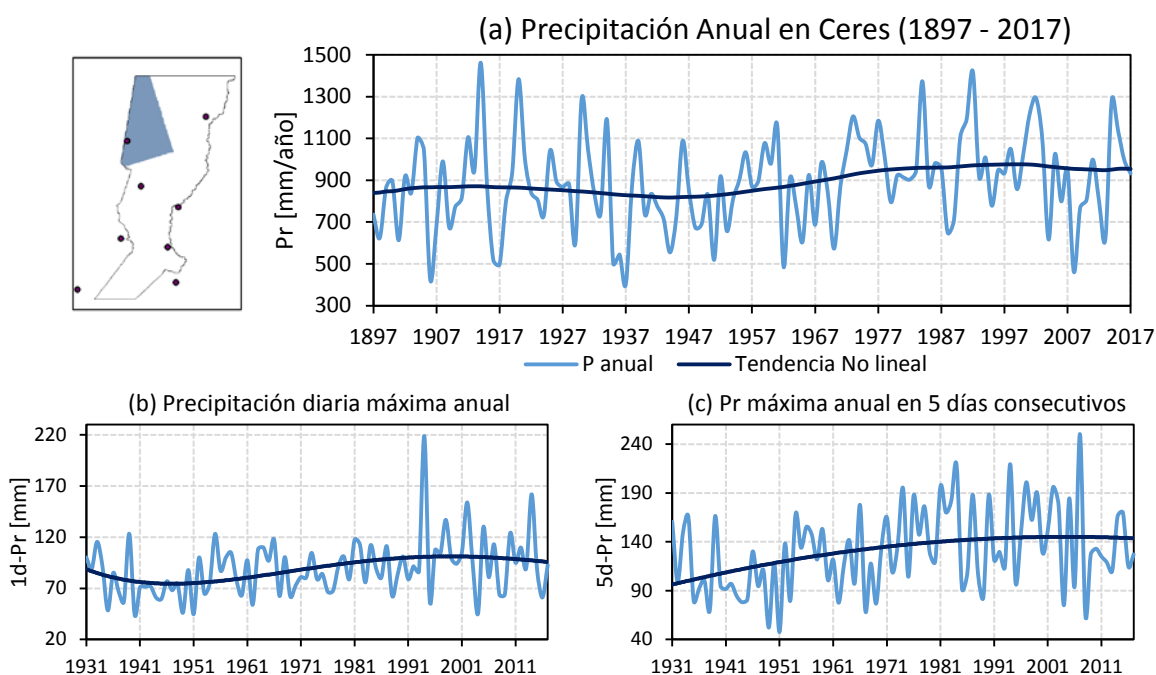


Figura 5: Estaciones con extensos períodos de datos utilizadas para detectar señales de variabilidad y cambio climático en la provincia (Tabla 1) y los correspondientes polígonos de Thiessen que regionalizan la provincia.

5.1 Zona noroeste (estación Ceres)

El noroeste de la provincia presenta una clara señal de cambio en la precipitación anual, con un aumento que se puede ver en la tendencia de la Figura 6a. Esta tendencia muestra que el salto de la media de precipitación anual se produjo en la década de 1960, manteniéndose estacionario hasta la actualidad en un valor medio cercano a 1000 mm anuales en contraposición a la media en el período 1897-1960 próxima a 880 mm. Además, la precipitación anual está fuertemente influenciada por la variabilidad interanual con ciclos de entre 2 y 6 años relacionados al fenómeno de El Niño y de 9 años. Estos ciclos originan eventos extremos de déficits y excesos de precipitaciones con dichas periodicidades.

Los extremos de precipitación han cambiado en las últimas décadas en el noroeste de la provincia. La precipitación diaria máxima anual (Figura 6b) tiene una tendencia positiva a partir de 1960 que se ha estabilizado en la década de 1990. Es muy notorio el incremento de tormentas de gran intensidad concentradas en periodos cortos a partir de 1990, superando muchas de ellas los 150 mm diarios y logrando un récord absoluto en 1994 con 219 mm en un día. Un comportamiento similar tiene la precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Figura 6c); a partir de 1970 se registraron eventos con más de 200 mm con muy alta frecuencia, prácticamente cada dos años entre 1997 y 2007. Estos eventos extremos muestran también una gran variabilidad interanual, intercalando a los máximos, años con escasa precipitación, como se observó en 2008 y 2004. El índice simple de intensidad diaria (SDII, por su sigla en inglés), definido como el cociente entre la lluvia anual y los días con precipitación, también muestra una tendencia claramente positiva (Figura 6d). Esta tendencia indica un incremento muy notorio de la intensidad de las tormentas, que concentran mayor cantidad de lluvia en menos días. También se ha incrementado la cantidad de días secos consecutivos (CDD por su sigla en inglés) en las últimas décadas (Figura 6e). La Figura 6e muestra altos valores de CDD durante la década de 1930, conocida por ser una década de condiciones muy secas en la esta zona. Posteriormente, entre 1940 y 1990 los días secos consecutivos han alcanzado picos de no más de 70 días, mostrando nuevamente un cambio a partir de 1990. A partir de esta década, sequías de gran magnitud se observaron como por ejemplo durante 2008, con 115 días consecutivos sin precipitación.



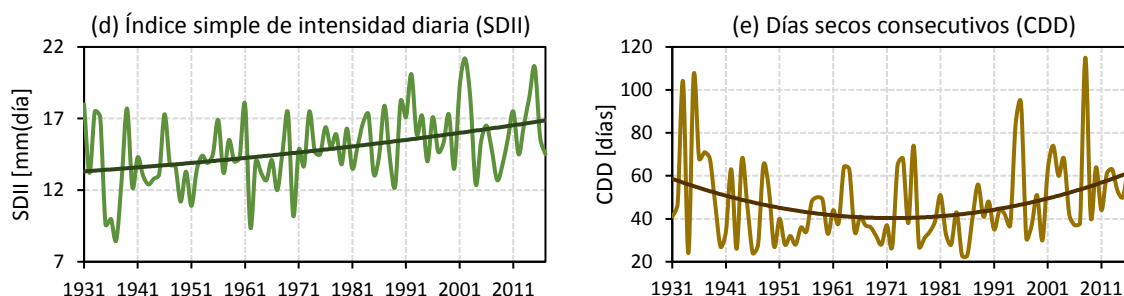
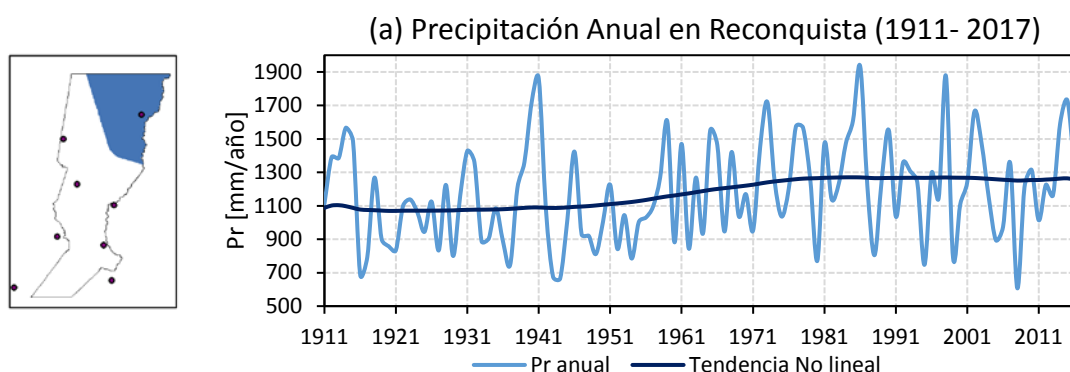


Figura 6: Series temporales en Ceres de (a) Precipitación anual (1897-2017) y de extremos de precipitación (1931-2017): (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (c) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

5.2 Zona noreste (estación Reconquista)

El noreste de la provincia también tuvo un importante incremento de la precipitación anual a partir de la década de 1960, pasando de valores medios de 1100 mm anuales a aproximadamente 1270 mm (Figura 7a), lo que implica un incremento medio del 15%. Similar a la zona noroeste, la variabilidad interanual tiene un rol preponderante en la formación de excesos y déficits de precipitación, con ciclos de entre 2 y 6 años vinculados con los eventos de El Niño para excesos y La Niña para déficits.

Los extremos de precipitación indican un aumento considerable reflejados en los valores diarios máximos anuales (Figura 7b) y en los máximos anuales en 5 días consecutivos (Figuras 7c), como así también en la intensidad de la precipitación (Figura 7d). Estos cambios se dieron entre las década de 1960 y 1970, para luego estabilizarse. Los extremos superiores a 150 mm en un día y superiores a 200 mm en 5 días tienen una alta frecuencia en esta región. También se ha registrado un incremento de los días secos consecutivos a partir de 1990 (Figura 7e), persistiendo incluso por períodos estacionales.



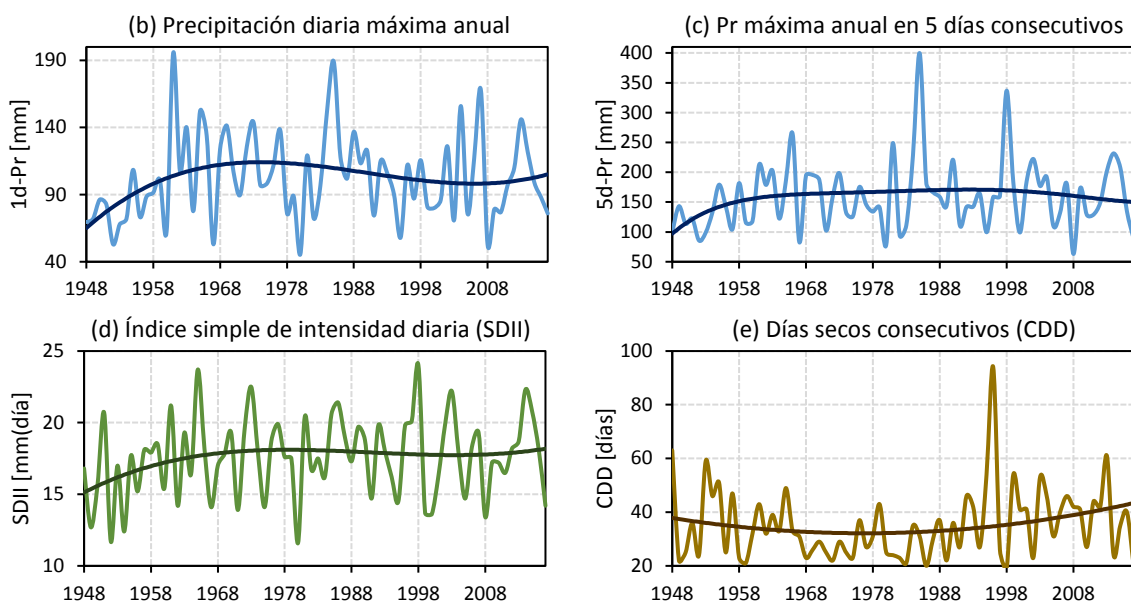


Figura 7: Series temporales en Reconquista de (a) Precipitación anual (1911-2017) y de extremos de precipitación (1948-2017): (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (d) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

5.3 Zona centro-oeste (estación Rafaela)

El centro-oeste de la provincia también muestra un aumento de la precipitación anual a partir de 1960 (Figura 8a). Este cambio supone un incremento del 15%, variando desde un valor medio de 890 mm entre 1900 y 1960 a 1020 entre 1970 y 2017. En esta región, la variabilidad interanual de la precipitación muestra una gran influencia de El Niño y La Niña, con ciclos de entre 2 y 6 años que generan importantes sequías o excesos hídricos.

De la misma manera que en el norte de la provincia, se observó un incremento en los eventos de precipitación intensa de 1 y 5 días (Figuras 8b y 8c) entre 1960 y 1980. Posteriormente, los valores medios permanecen constantes aunque la frecuencia y severidad de lluvias intensas aumentaron (Figura 8d). Por ejemplo, se han registrado eventos cercanos a 200 mm en un día en 1999, 2005 y 2012 (Figura 8b), y de hasta 350 mm en 5 días en 2007 (Figura 8c). Este aumento de intensidad es notorio en la Figura 8d con el índice simple de intensidad diaria, cuya tendencia crece entre 1960 y 1980 y a partir de la década del 2000. También se registra un leve incremento de los días secos consecutivos (Figura 8e), aunque no tan manifiesto como se observó en el norte de la provincia.

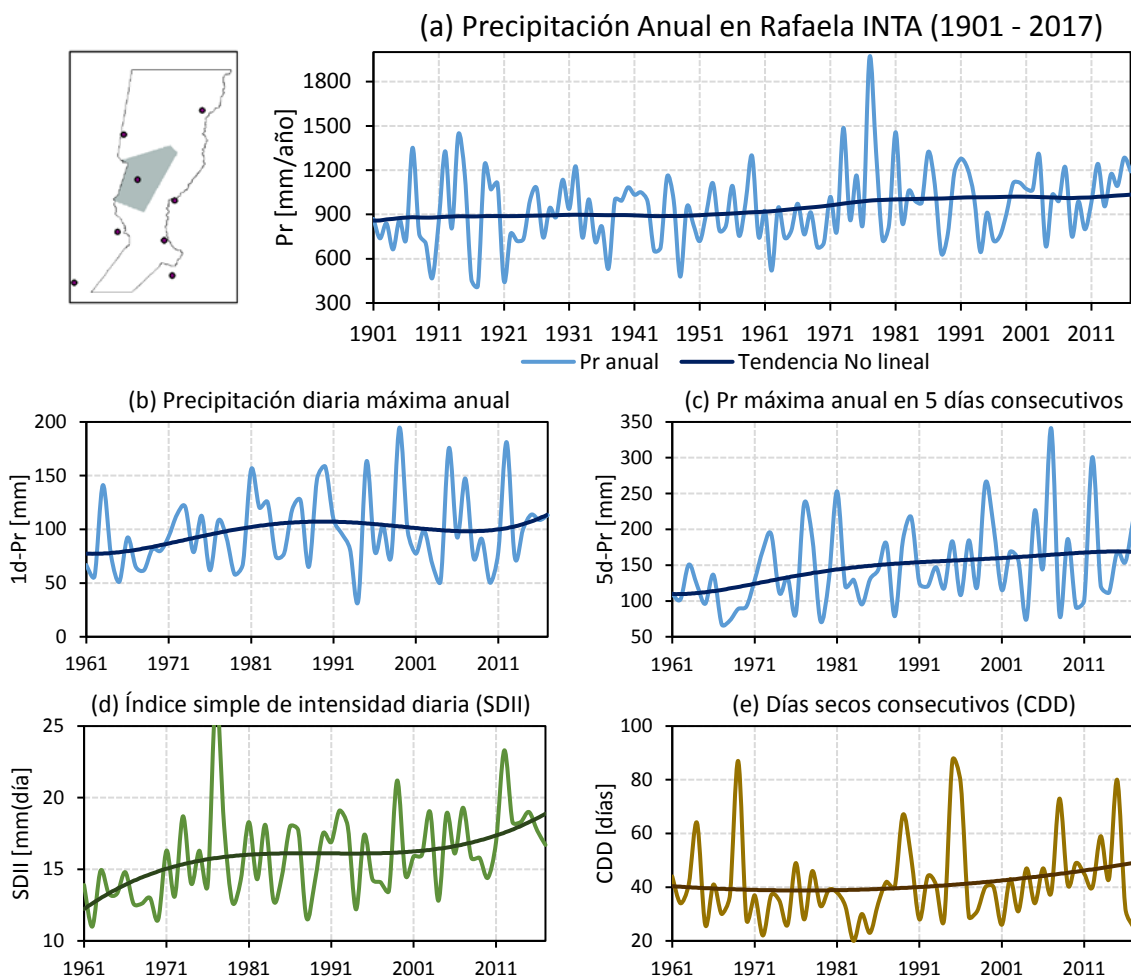


Figura 8: Series temporales en Rafaela de (a) Precipitación anual (1901-2017) y de extremos de precipitación (1961-2017): (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (d) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

5.4 Zona centro-este (estación Paraná)

La precipitación anual muestra un importante aumento a partir de 1960 en el centro-este, creciendo de valores medios de 950 mm entre 1917 y 1960 hasta aproximadamente 1100 mm entre 1980 y 2017 (Figura 9a), lo que representa un incremento del 16% anual. La precipitación en esta región presenta una gran variabilidad interanual, afectada por el comportamiento cíclico asociado a los eventos El Niño y La Niña de entre 2 y 6 años y con ciclos próximos a los 9 años.

Los extremos de precipitación presentan un aumento en la magnitud de los eventos de lluvia máxima anual de 1 y 5 días (Figuras 9b y 9c) y de su intensidad (Figura 9d). Se observa un incremento en la intensidad de las tormentas a partir de la década de 1970, y en particular en la década de 1990 y 2000 con picos frecuentes de aproximadamente 200 mm/día y cercanos a 300 mm en 5 días. Contrariamente a lo observado en el norte provincial, los días secos consecutivos han disminuido levemente a partir de 1970 (Figura 9e).

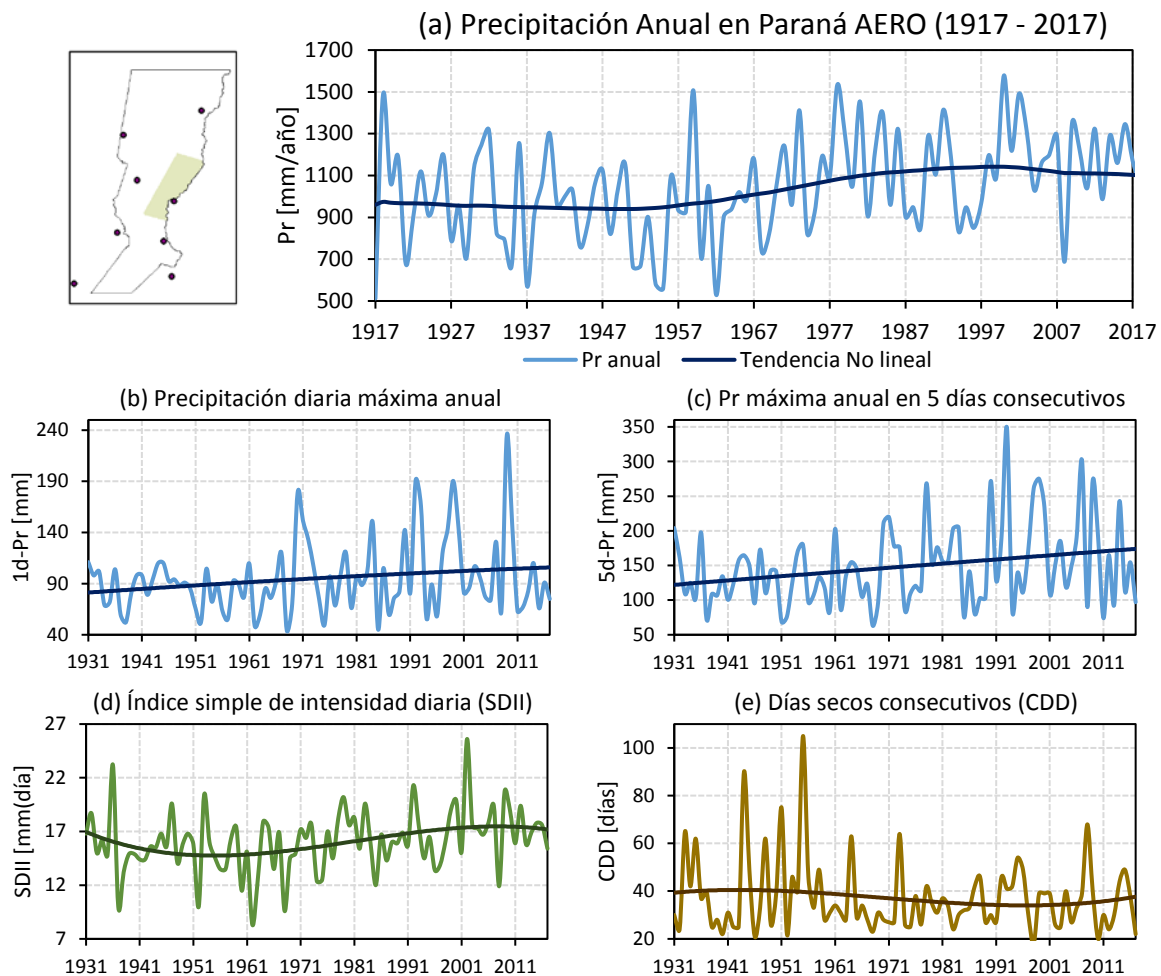


Figura 9: Series temporales en Paraná de (a) Precipitación anual (1917-2017) y de extremos de precipitación (1931-2017): (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (c) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

5.5 Zona centro-suroeste (estación Marcos Juárez)

Los valores medios de la precipitación anual se han incrementado en la zona centro-suroeste de la provincia (Figura 10a), tal como en el resto del territorio provincial. La tendencia en la estación Marcos Juárez aumenta desde principios del siglo XX. También se observa una gran variabilidad interanual con ciclos de entre 2 y 6 años, originando años con déficits marcados (principalmente asociados a eventos La Niña) y años con excesos (fundamentalmente asociados a eventos El Niño).

Los eventos extremos de lluvias intensas se han incrementado en magnitud (Figuras 10b y 10c) e intensidad (Figura 10d) a partir de 1970. Son muy frecuentes en las últimas décadas los eventos de más de 120 mm en un día (Figura 10b), con intensidades crecientes a partir del año 2000 (Figura 10d). También se registró un leve incremento de los días secos consecutivos a partir de la década del 2000, con un pico durante la sequía del año 2008 de 110 días consecutivos sin precipitaciones.

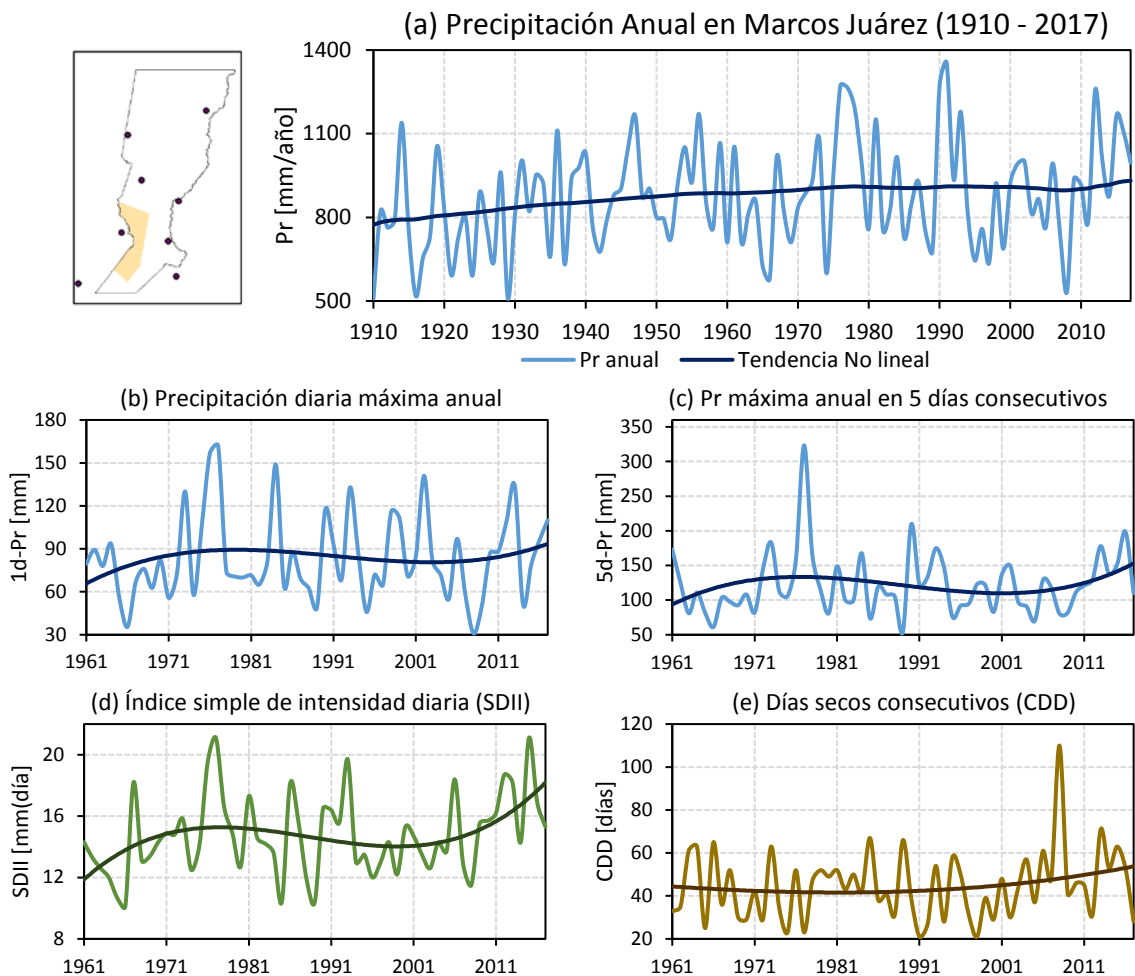


Figura 10: Series temporales en Marcos Juárez de (a) Precipitación anual (1910-2017) y de extremos de precipitación (1961-2017): (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (d) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

5.6 Zona centro-sureste (estación Rosario)

Rosario, estación que caracteriza la zona centro-sureste de la provincia, presenta un incremento de la precipitación anual a partir de principios del siglo XX, pasando de valores medios de 950 mm hasta el año 1960, a 1050 mm entre 1970 y 2017 (Figura 11a). Si bien este aumento significa un 10% de los promedios anuales (algo menor al incremento en el norte de la provincia), las tendencias son crecientes en la actualidad. Este comportamiento se observó en todo el sur de Santa Fe. Nuevamente, la variabilidad interanual tiene un rol fundamental en el desarrollo de años con déficits y excesos hídricos a través de ciclos de entre 2 y 6 años, principalmente influenciados por los eventos El Niño y La Niña.

Los eventos extremos de precipitación muestran un aumento en magnitud e intensidad a partir de 1980 (Figuras 11b, 11c y 11d), alcanzando un pico en 5 días consecutivos de 365 mm en 2007 (Figura 11c). Es notorio el incremento de la intensidad de las lluvias a partir de 1990 (ver Figura 11d). Los días secos consecutivos (Figura 11e),

si bien se mantienen en el rango histórico con máximos cercanos a los 60 días, también han aumentado en sus valores medios a partir de 1970.

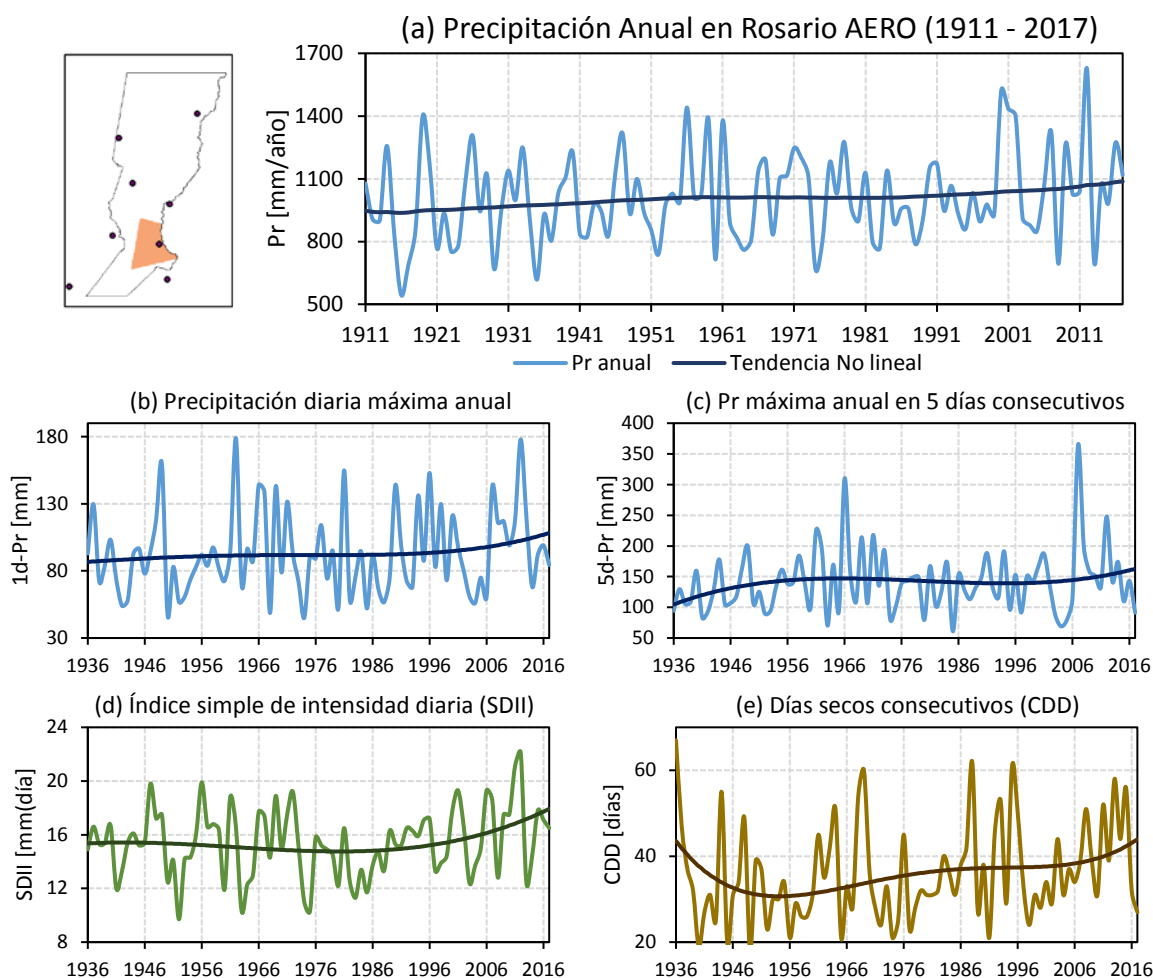


Figura 11: Series temporales en Rosario de (a) Precipitación anual (1911-2017) y de extremos de precipitación (1936-2017): (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (d) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

5.7 Zona suroeste (estación Laboulaye)

En el extremo suroeste de la provincia, la tendencia observada de la precipitación anual es creciente desde 1903, pasando de valores medios cercanos a los 700 mm a principios de siglo, a 950 mm en la actualidad (Figura 12a). Esta zona presenta una variabilidad interanual con ciclos de alta frecuencia (2 años), que provoca excesos y déficits en cortos períodos de tiempo.

Los extremos de precipitación no registran un incremento tan notorio en magnitud y frecuencia como en el resto de la provincia, aunque presentan un aumento medio a partir de la década de 2000 (Figuras 12b y 12c). La intensidad de las lluvias se ha incrementado a partir de la década de 1990 (Figura 12d). Los días secos consecutivos no tienen una tendencia creciente diferenciada, con valores picos normales de aproximadamente 70 días.

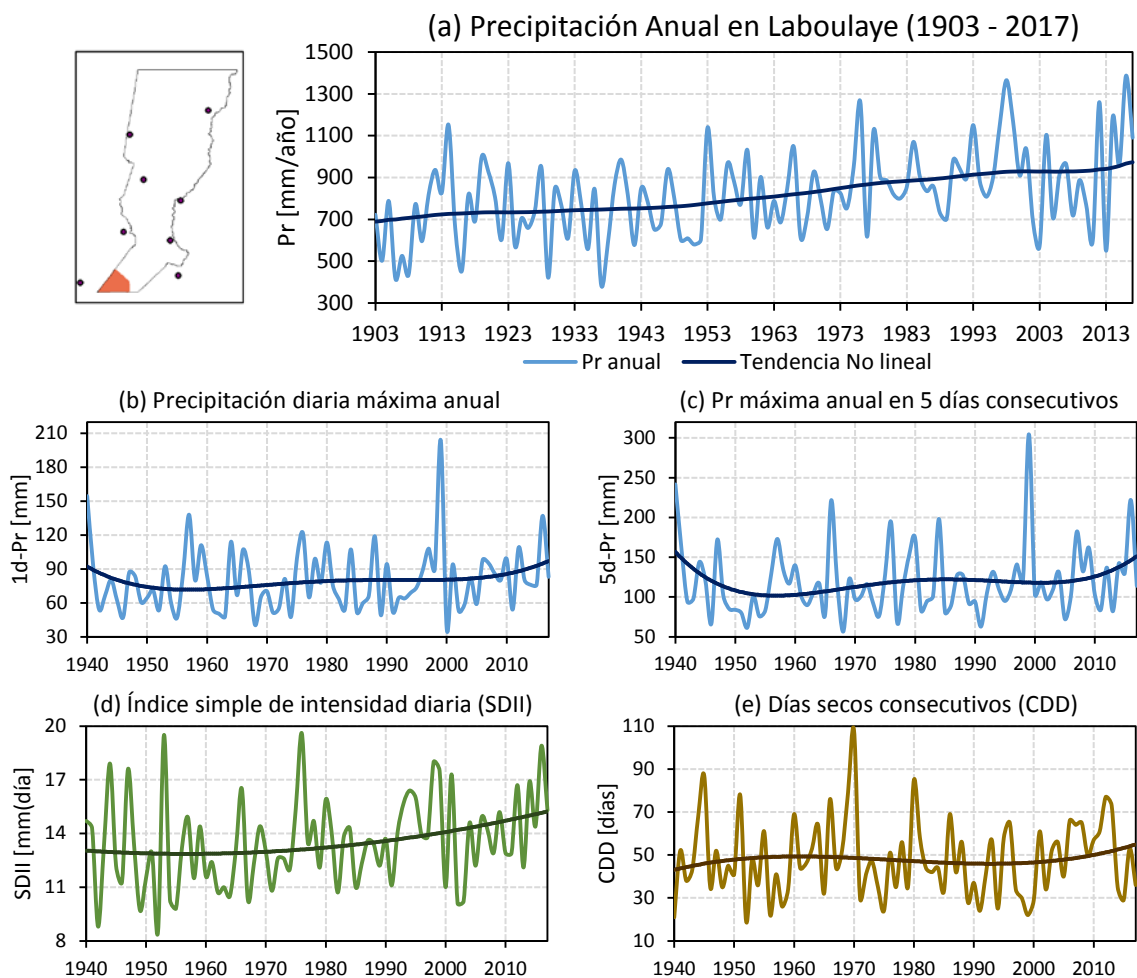


Figura 12: Series temporales en Laboulaye de (a) Precipitación anual (1903-2017) y de extremos de precipitación (1940-2017): (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (d) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

5.8 Zona sureste (estación Pergamino)

En el extremo sureste de la provincia, la precipitación anual presenta una tendencia creciente en todo el período analizado, aumentando desde aproximadamente 850 mm por año a principios de siglo, a 1050 mm por año en 2017 (Figura 13a). En esta zona se destaca la variabilidad interanual con ciclos de muy corto período (2 años), aunque tienen una importante implicancia los ciclos de hasta 6 años, ambos muy influenciados por los eventos de El Niño y La Niña asociados con excesos y déficits de precipitación, respectivamente.

Al igual que en el suroeste, los extremos de precipitación no registran un incremento tan notorio en magnitud y frecuencia como en el resto de la provincia (Figuras 13b y 13c). La intensidad de las lluvias ha fluctuado con variaciones decadales (Figura 13d). A diferencia del resto de la provincia, los días secos consecutivos presentan una leve tendencia negativa a partir de 2000, con valores extremos de aproximadamente 60 días en todo el período analizado.

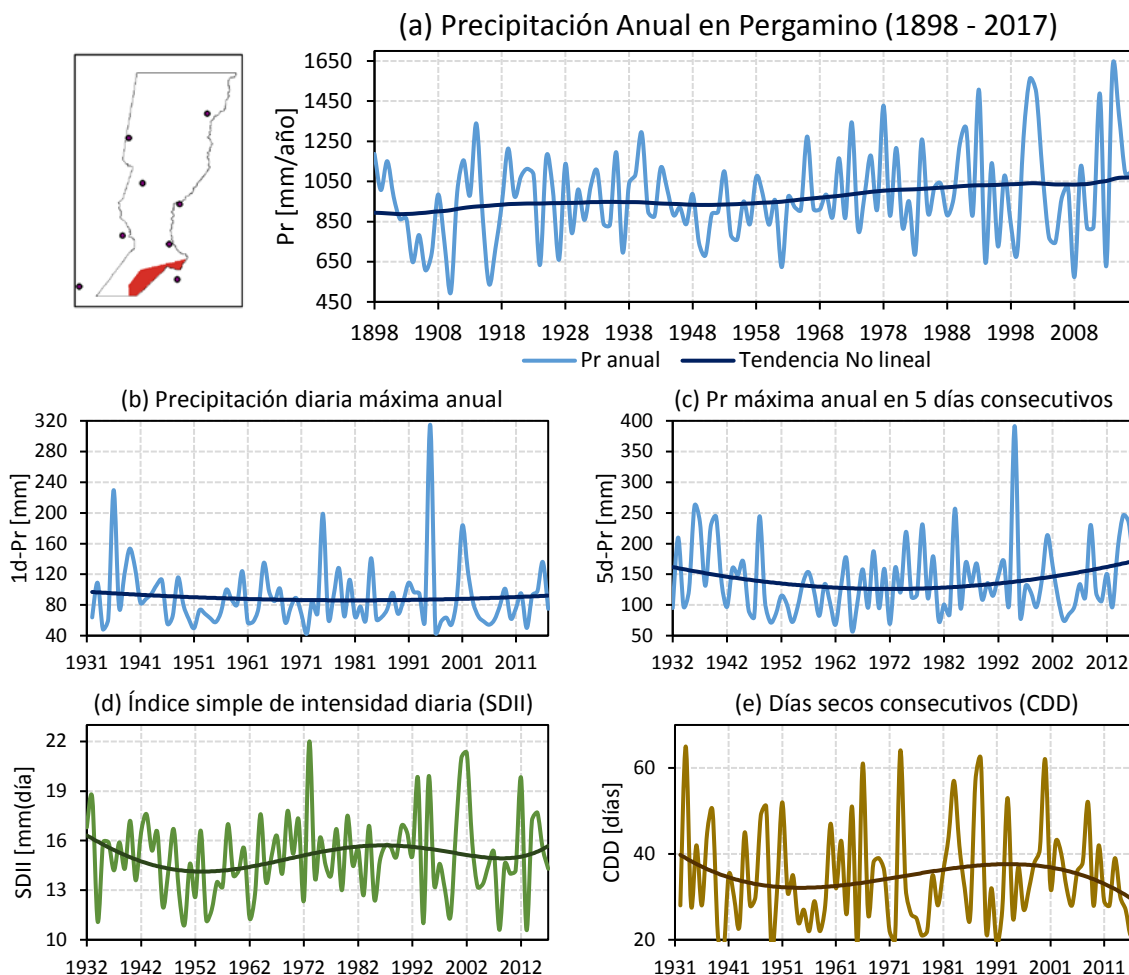


Figura 13: Series temporales en Pergamino de (a) Precipitación anual (1898-2017) y de extremos de precipitación (1932-2017): (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (d) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

6. IMPACTOS DE LOS EVENTOS EXTREMOS

Es bien sabido que cambios en la frecuencia, intensidad, duración o extensión espacial de los eventos extremos causan diversos impactos: alteran los ecosistemas, afectan la producción de alimentos y el suministro de agua, dañan los asentamientos humanos y causan morbilidad y mortalidad en todo el mundo (Field et al., 2013). Existe abundante evidencia que demuestra que los cambios en la frecuencia, intensidad, duración y extensión espacial de tales eventos aumentarán la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas socio-ecológicos ocasionando desastres sin precedentes (Seneviratne et al., 2012; Magrin et al., 2014).

En particular, los cambios en las principales variables del clima (precipitación y temperatura) sumados a la gran variabilidad hidroclimática del noreste de Argentina afectaron los recursos hídricos superficiales e impactaron en las actividades agrícolas y ganaderas (Lovino et al., 2018a). Los principales impactos observados en la región son discutidos en Lovino et al. (2018a), y son atribuidos a los incrementos de las precipitaciones, los caudales y los extremos hidroclimáticos húmedos desde las décadas de 1960 y 1970. Estos incrementos elevaron los niveles freáticos regionales y favorecieron el escurrimiento superficial. Todos estos cambios, combinados con la significativa variabilidad hidrológica en escalas interanuales, aumentaron la frecuencia de crecidas y favorecieron las severas inundaciones de los principales ríos de la provincia en las últimas décadas. Por ejemplo, en 1983 y 1998, las crecidas extraordinarias del río Paraná forzaron la evacuación de cientos de miles de personas en toda la cuenca, con costos estimados de más de 1000 millones de dólares. En el sector agroindustrial, la crecida extraordinaria de 1998 inundó 3.5 millones de hectáreas en toda la cuenca del Paraná y las pérdidas alcanzaron los 750 millones de dólares en Argentina (Herzel et al., 2004). La inundación del río Paraná en 1998 afectó 53.000 familias de pequeños productores rurales y comunidades indígenas, sin considerar el impacto en las grandes ciudades (Herzel et al., 2004).

También los asentamientos humanos fueron severamente impactados por las grandes crecidas de los ríos. Un caso icónico ha sido la inundación del río Salado en 2003. Este evento forzó la evacuación de 120.000 personas en Santa Fe y afectó 20.000 hogares. Este desastre resultó en severos daños a la infraestructura urbana, estimados en 450 millones de dólares incluyendo agua potable y saneamiento, energía y redes de transporte y telecomunicaciones (CEPAL, 2003).

El contexto más húmedo luego de 1960, junto a otros cambios tecnológicos, económicos y sociales, permitió la expansión de la agricultura a zonas antiguamente marginales (noroeste de la provincia de Santa Fe). Debido a la demanda creciente de productos de soja en el mundo y el contexto adecuado para su siembra en la región, el cultivo de soja creció de 38.000 hectáreas a 16 millones de hectáreas en todo el noreste de

Argentina entre 1970 y 2000. Esta expansión de cultivos ha llevado a un fuerte proceso de cambio del uso del suelo, principalmente hacia el noroeste de la provincia de Santa Fe. El cambio de uso de suelo, mayormente influenciado por el cambio de paradigma productivo (siembra directa y barbecho), y el contexto más húmedo de las últimas décadas produjo un gran aumento de los niveles freáticos que se encuentran, en muchas regiones de la provincia, próximos a la superficie. Esto produce una disminución en la capacidad de infiltración de los suelos y favorece el desarrollo de inundaciones aun con bajas cantidades de precipitación.

En este escenario, la vulnerabilidad regional a las inundaciones locales ha crecido en gran medida en los últimos 20 años (Lovino et al., 2018a). Por ejemplo, las lluvias intensas durante enero de 2017 anegaron los suelos de la región núcleo de cultivos causando pérdidas al sector agrícola-ganadero por 1.750 millones de dólares (La Nación, 2017). Asimismo, fueron cuantiosos los ejemplos de eventos de precipitaciones intensas que produjeron severas complicaciones en los sistemas de drenaje urbano en varias ciudades y pueblos de la región, causando inundaciones urbanas que afectaron la infraestructura y la producción local en montos económicos millonarios. Recientemente, las inundaciones de enero 2019 en el norte de la provincia, afectaron el total de la producción de los cultivos de verano como el algodón y el girasol, comprometiendo severamente la posibilidad de sembrar soja o maíz (Clarín, 2019).

En contraposición a lo anterior, la gran variabilidad hidroclimática de la región favoreció el desarrollo de sequías agrícolas e hidrológicas que causan severos impactos a la producción y a la población de la provincia (Lovino et al., 2018a). Estos impactos se magnifican debido a que estas actividades dependen primordialmente de la precipitación, ya que los principales cultivos de la región (maíz y soja) son de secano y el riego constituye solo el 3% de la zona de cultivada (Siebert et al., 2013). Por ejemplo, el cultivo de maíz es muy sensible a los déficits de agua (Minetti et al., 2007), mientras que la producción del cultivo de soja es afectada tanto por el déficit como por los excesos (Penalba et al., 2007).

Una de las sequías que mayor impacto produjo en gran parte de Argentina fue el evento de 1988-1989, en la cual el área cultivada se redujo en un 35% y el rendimiento de los cultivos en un 15%, resultando una disminución de la producción agrícola del 44% que impactó fuertemente en la economía del país (FMI, 1990). En la Figura 14 se muestran los rendimientos en kg/ha de los tres cultivos principales en la provincia de Santa Fe, a los que se les extrajo la tendencia del período 1970-2018 para eliminar los efectos de las mejoras tecnológicas de las prácticas agrícolas (Bert, 2006). Se observa que los rendimientos son negativos, es decir por debajo del valor medio, en años puntuales donde ocurrieron eventos secos severos. El cultivo de maíz tuvo las mayores pérdidas de rendimiento en toda la provincia durante la sequía de 1988-1989, y fue la mayor para los tres cultivos en ese período. La reciente sequía de 2018 produjo la mayor pérdida en el cultivo de soja, aunque la de maíz también fue muy importante. Posteriormente la sequía 2008-2009 provocó pérdidas cuantiosas en los tres cultivos, destacándose la mayor pérdida en el cultivo de trigo (Sgroi, 2017).

En referencia a los extremos de déficit hídrico mencionados, las sequías de 2008-2009 y 2011-2012 provocaron pérdidas de 8.765 millones de dólares al sector agropecuario de la región núcleo de cultivos. En particular, la sequía 2011-2012 causó pérdidas del orden de 2.500 millones de dólares debido a sus impactos en la soja y el maíz (Webber, 2012). la sequía extensa y persistente ocurrida durante 2008-2009 que afectó principalmente el nordeste argentino, ocasionó pérdidas de aproximadamente el 40% de la producción de cereales en Argentina (Bidegain, 2009). De acuerdo al informe del INTA (Corti y Mendoza Gallo, 2012) se registraron pérdidas económicas por 347 millones de pesos contabilizando cultivos de soja, girasol, maíz, sorgo, caña de azúcar y trigo solo en 4 departamentos del norte de la provincia. Además, hubo una caída del 6% de la producción vacuna. En referencia a los asentamientos humanos, las sequías severas alteraron la seguridad alimentaria y el acceso al agua en poblaciones del norte de la provincia de Santa Fe. La sequía de 2008-2009 afectó el suministro de agua y favoreció la aparición de brotes de enfermedades transmitidas por el agua. La duración de la sequía 2008-2009 fue en su momento la más intensa de los últimos 50 años de registro (Skansi et al., 2009; Müller et al., 2014). También se vio afectada la navegabilidad del río Paraná en su tramo medio (ocasionando complicaciones en la exportación de granos y el suministro de combustible en ciudades del Litoral) y perturbó el suministro de agua en varias ciudades costeras.

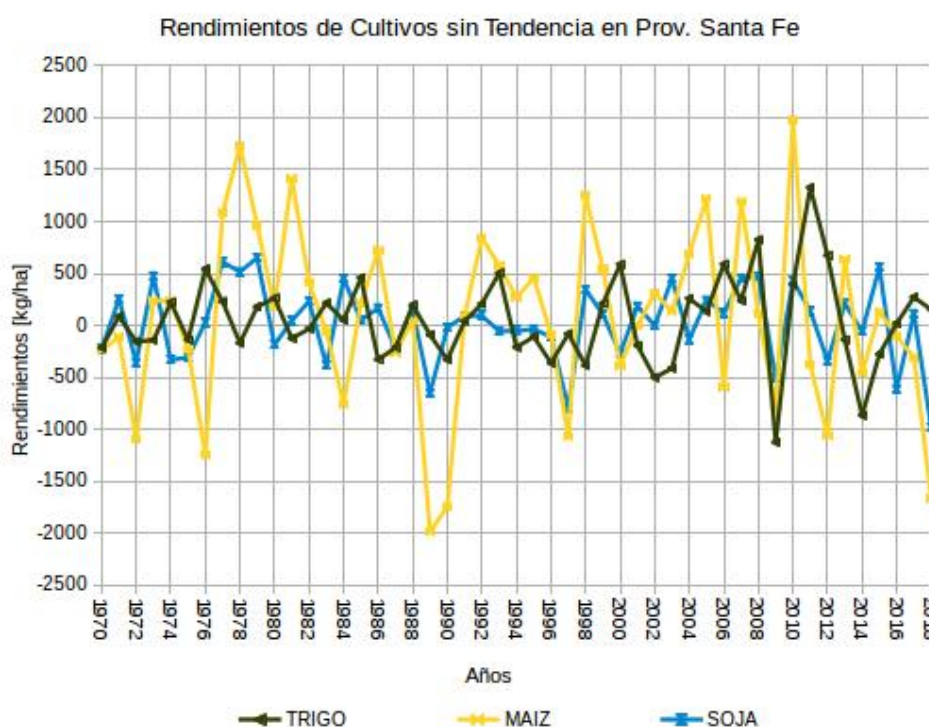


Figura 14: Rendimiento anual sin tendencia de cultivos de trigo, maíz y soja en la provincia de Santa Fe. Período 1970-2018. Adaptado de Sgroi (2017). Datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina (<https://datos.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>)

Finalmente, la sequía más reciente comenzó a gestarse durante el último trimestre del año 2017 y se extendió hasta abril de 2018. Este evento afectó particularmente a la provincia de Santa Fe alcanzando un déficit de precipitación de 350 mm durante el primer trimestre

de 2018 (El Litoral, 2018). La figura 15 muestra la situación de la provincia de Santa Fe y la región en marzo de 2018 mediante el indicador SPI2 (índice estandarizado de precipitación de 2 meses). Este índice es capaz de reflejar la intensidad de las sequías con valores negativos (de déficits), es decir, cuanto más se aleja de valores nulos, mayor es la intensidad de las sequías. Se observa que la mayor parte de la provincia estuvo seriamente afectada durante este evento, principalmente el sur, donde se registraron valores de SPI2 menores a -1.5. El impacto de esta sequía se evidenció al momento de la cosecha de los principales cultivos de verano de la campaña 2017-2018. La producción de soja y maíz se redujeron un 31,6% y 15,2% respectivamente respecto a la cosecha de la campaña anterior, provocando una pérdida en las exportaciones de granos del orden de 3.500 millones de dólares según el reporte del Ministerio de Agroindustria de la Nación (Clarín, 2018).

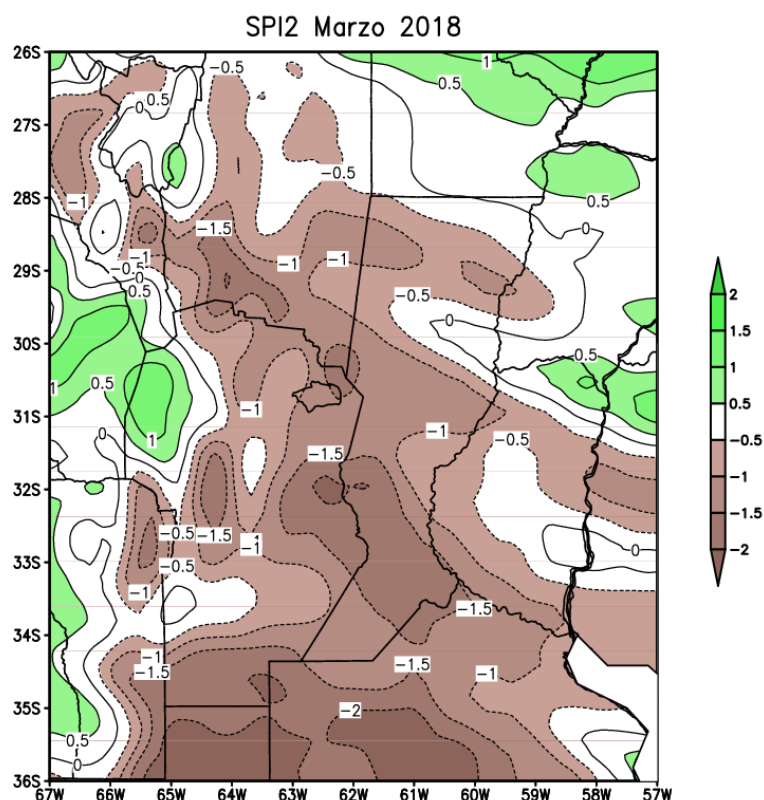


Figura 15: Situación espacial del estado de la sequía a la fecha de Marzo de 2018, mediante el indicador estandarizado de precipitación de 2 (SPI2).

Los cambios y la variabilidad de los extremos de temperatura, de la misma manera que los extremos de precipitación, también han provocado importantes impactos sectoriales. El incremento en la temperatura mínima en las últimas décadas disminuyó los rendimientos de trigo y colza y afectó los ciclos del maíz (el acortamiento del período de heladas permitió adelantar la siembra). En las ciudades, los aumentos en la temperatura mínima y máxima afectaron las demandas energéticas. Las condiciones más cálidas alteraron el suministro de energía, especialmente incrementando la demanda para refrigeración en verano.

Finalmente, considerando la magnificación de los eventos extremos observados y sus impactos en todo el nordeste de Argentina (Lovino et al., 2018b), surge la necesidad de mejorar los sistemas de gestión del riesgo climático que enfrenta la región actualmente. Esta mejora requiere ampliar el conocimiento sobre la vulnerabilidad hidroambiental de la región a los eventos extremos. De esta manera, se aspira poder asistir a los tomadores de decisión y proporcionar información con base científica para la elaboración de políticas públicas orientadas a aumentar la resiliencia de la región ante desastres de origen hidroclimático.

Referencias Bibliográficas

- Andreoli, R. V. and Kayano, M. T. (2005). ENSO-related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific Decadal Oscillation regimes, *Int. J. Climatol.*, 25, 2017–2030, <https://doi.org/10.1002/joc.1222>.
- Barreiro, M., Diaz, N., and Renom, M. (2014). Role of the global oceans and land–atmosphere interaction on summertime interdecadal variability over northern Argentina, *Clim. Dynam.*, 42, 1733–1753, <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2088-6>.
- Berri, G.J., M.A. Ghiotto and N.O. García, (2000). The influence of ENSO in the flows of the Upper Paraná River of South America over the past 100 years. *Journal of Hydrometeorology*, 3, 57-65.
- Berri, G.J., E.A. Flamenco, L. Spescha, R.A. Tanco and R. Hurtado, (2002). Some Effects of La Niña on Summer Rainfall, Water Resources and Crops in Argentina, pág. 124-133, Capítulo de *La Niña and Its Impacts: Facts and speculation*, Glantz, M.H. (Ed.), United Nations University, ISBN 92-808-1071-5.
- Bert, F. E., Satorre, E. H., Toranzo, F. R., y Podestá, G. P. (2006), Climatic information and decision-making in maize crop production systems of the Argentinean Pampas, *Agricultural Systems*, 88 (2), 180–204.
- Bidegain, M. (2009). Severe drought in central Argentina and Uruguay [in “State of the Climate in 2008”]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90 (8), S138.
- Camilloni, I. and Barros, V. (2003). Extreme discharge events in Paraná River and their climate forcing, *J. Hydrol.*, 278, 94–106, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00133-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00133-1).
- Cavalcanti I. F. A, and coauthors, (2015). Precipitation extremes over La Plata Basin—review and new results from observations and climate simulations. *J Hydrol (Amst)* 523: 211–230.
- Carril A. F., and coauthors, (2016). Extreme events in the La Plata basin: a retrospective analysis of what we have learned during CLARIS-LPB project. *Clim Res* 68:95-116. <https://doi.org/10.3354/cr01374>
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2003). Las inundaciones de 2003 en Santa Fe. <https://www.cepal.org/publicaciones/xml/8/12608/lclbuel185eParte%201.pdf>.
- Clarín.(2018).https://www.clarin.com/rural/oficial-perdidas-sequia-alcanzan-23-soja-18-maiz_0_HyWT3o83M.html.
- Corti, A. F., y Mendoza Gallo, L. (2012), Informe Impacto de la Sequía en el norte de Santa Fe – Abril de 2009, EEA INTA Reconquista, pp. 41.
- Donat, M. G., Alexander, L., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Caesar, J., (2013): Global Land-Based Datasets for Monitoring Climatic Extremes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94, 997–1006.
- Doyle, M. E. and Barros, V. R. (2011). Attribution of the river flow growth in the Plata Basin. *Int. J. Climatol.*, 31: 2234-2248. doi:10.1002/joc.2228.
- El Litoral. (2018). https://www.ellitoral.com/index.php/id_um/167540-santa-fe-en-el-ojo-de-la-sequia-crisis-hidrica-campolitoral.html.
- Field, C. B. and coauthors, 2014: Technical summary. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC* [Field, C.B et al. (eds.)]. Cambridge University Press, NY, USA, pp. 35-94.

- Fondo Monetario Internacional (FMI). (1990), Primary Commodities: Market Developments and Outlook, pp. 12.
- Herzel, H., Caputo, M. G., and Celis, A. (2004). Capítulo III: Análisis regional: cuenca del río Paraná, in: Gestión de riesgos de desastre ENSO en América Latina, Informe Final IAI, Centro de estudios sociales y ambientales. <http://www.cambioglobal.org/enso/informes/anho4/Argentina/Cap%203%20CUENCA%20DEL%20PARANA.pdf>.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the AR5 of the IPCC [Field, C.B. et al (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Jacques-Coper, M. and Garreaud, R. D. (2015). Characterization of the 1970s climate shift in South America, *Int. J. Climatol.*, 35, 2164–2179, <https://doi.org/10.1002/joc.4120>.
- Kiladis, G.N and K. C. Mo, 1998: Pacific Ocean. *Meteorology of the Southern Hemisphere*, Meteor. Monogr., Amer. Meteor. Soc., Chapter 8.
- Krepper, C. M., García, N. O., and Jones, P. D., 2008: Low-frequency response of the upper Paraná basin, *Int. J. Climatol.*, 28, 351–360, <https://doi.org/10.1002/joc.1535>.
- Krepper, C. M. and Zucarelli, G. V. (2010), Climatology of water excesses and shortages in the La Plata Basin, *Theoretical and Applied Climatology*, 102, 13–27.
- La Nación. (2017). Inundaciones: pronostican pérdidas para el campo de hasta U\$S 1750 millones <http://www.lanacion.com.ar/1976462-inundaciones-pronostican-perdidas-para-el-campo-de-hasta-us-1750-millones>
- La Voz. (2017). <http://agrovoy.lavoz.com.ar/clima/la-nina-asoma-cada-vez-con-mas-fuerza-sequia-severa-en-2018>.
- Lovino, M. A., García, N., Baethgen, W. (2014). Spatiotemporal analysis of extreme precipitation events in the Northeast region of Argentina (NEA). *J. Hydrol.: Reg. Stud.* 2, 140-158.
- Lovino, M. A. (2015). Impacto ambiental de la variabilidad climática y los eventos extremos en la provincia de Santa Fe, en el contexto del cambio climático. Tesis Doctoral, UNL, Argentina, 238 pp. <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/handle/11185/707>
- Lovino, M. A., Müller, O. V., Müller, G. V., Sgroi, L. C., and Baethgen, W. E. (2018a). Interannual-to-multidecadal Hydroclimate Variability and its Sectoral Impacts in northeastern Argentina, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 3155-3174, <https://doi.org/10.5194/hess-22-3155-2018>.
- Lovino, M. A., Müller, O., Berbery, E. H., Müller, G. (2018b). How have daily climate extremes changed in the recent past over northeastern Argentina? *Global and Planetary Change*, 168, 78-97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.06.008>.
- Magrin, G. and coauthors, 2014; Central and South America. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the AR5 of the IPCC [Barros, V. et al (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Minetti, J. L., Vargas, W. M., Vega, B., & Costa, M. C. (2007). Las sequías en la Pampa Húmeda: Impacto en la productividad del maíz. *Revista Brasileira de Meteorología*, 22(2), 218-232.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2016). Disponible en: <https://datos.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>.
- Ministerio de Agroindustria. (2018). Campaña 17/18, Informe Especial Sequía. Disponible en: https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/_pdf/Informe_especial_Sequia_Agroindustria_Mayo18.pdf
- Mo, K. C., and Schemm, J. E. (2008), Relationships between ENSO and drought over the southeastern United States, *Geophysical Research Letters*, 35 (15).

- Mo, K. C. and Berbery, E. H. (2011). Drought and Persistent Wet Spells over South America Based on Observations and the U.S. CLIVAR Drought Experiments, *J. Climate*, 24, 1801–1820, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3874.1>.
- Müller, G., Nuñez, M., and Seluchi, M. (2000). Relationship between ENSO cycles and frost events within the Pampa Húmeda region, *Int. J. Climatol.*, 20, 1619–1637.
[https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20001115\)20:13<1619::AID-JOC552>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20001115)20:13<1619::AID-JOC552>3.0.CO;2-F).
- Müller, G.V., Compagnucci, R., Nuñez, M., Salles, A., (2003). Surface circulation associated with frosts in the wet pampas. *Int. J. Climatol.* 23 (8), 943–961. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.907>.
- Müller, Gabriela V. (2006). 'Variabilidad Interanual de las Heladas en la Pampa Húmeda'. *Revista Brasileira de Meteorología*, 21, 1, 135-141.
- Müller GV, Ambrizzi T, Nunez MN (2005) Mean atmospheric circulation leading to generalized frosts in Central Southern South America. *Theor Appl Climatol* 82:95–112.
- Müller, O. V., Berbery, E. H., Alcaraz-Segura, D., and Ek, M. B. (2014), Regional model simulations of the 2008 drought in southern South America using a consistent set of land surface properties, *Journal of Climate*, 27 (17), 6754–6778.
- Penalba, O. C., Bettolli, M. L., y Vargas, W. M. (2007), The impact of climate variability on soybean yields in Argentina. *Multivariate regression, Meteorological applications*, 14 (1), 3–14.
- Penalba, O. C. and Rivera, J. A. (2016). Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America – emphasis in regional drought occurrences, *Adv. Geosci.*, 42, 1–14, <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-1-2016>.
- Rusticucci, M., (2012). Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America. *Atmospheric Research*, 106, 1–17.
- Rusticucci, M., Barrucand, M., and Collazo, S. (2017). Temperature extremes in the Argentina central region and their monthly relationship with the mean circulation and ENSO phases, *Int. J. Climatol.*, 37, 3003–3017, <https://doi.org/10.1002/joc.4895>.
- Seager, R., Naik, N., Baethgen, W., Robertson, A., Kushnir, Y., Nakamura, J., and Jurburg, S. (2010). Tropical Oceanic Causes of Interannual to Multidecadal Precipitation Variability in Southeast South America over the Past Century, *J. Climate*, 23, 5517–5539, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3578.1>.
- Seneviratne, S. I. and coauthors, 2012: Changes in climate extremes and their impacts on the natural hysical environment. In: Field, C. B. et al (Eds.), *A Special Report of Working Groups I and II of the IPCC*. USA, pp. 109–230.
- Sgroi, L. C. (2017), Modelación de variables hidroclimáticas de superficie y evolución de su comportamiento en eventos extremos secos. Tesis de Doctorado. FICH. UNL, pp. 151.
- Siebert, S., Henrich, V., Frenken, K., y Burke, J. (2013). Update of the digital global map of irrigation areas to version 5. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, Germany and Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Skansi, M.M., S. E. Núñez, G. P. Podestá, H. Veiga y N. Garay (2009), La sequía del año 2008 en la región húmeda argentina descripta a través del Índice de Precipitación Estandarizado, CONGEMET 2009, Buenos Aires, 5-9 Octubre 2009.
- Skansi, M. M., and coauthors, (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100, 295–307.
- Webber, J. (2012), Argentina's drought: counting the costs, *Financial Times*, Jan 23, 2012.