



SISSA

CARACTERÍSTICAS DE LAS SEQUÍAS EN EL SUR DE SUDAMÉRICA

Pasado, presente y futuro de una problemática cada vez más frecuente en Sudamérica. ¿Por qué se producen? ¿Tienen alguna periodicidad? ¿Con qué herramientas contamos para preverlas y mitigar sus efectos?

CAROLINA VERA

Universidad de Buenos Aires (UBA)-CONICET, Argentina.
Unidad de Coordinación SISSA.

MARÍA SKANSI

Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Argentina.
Unidad de Coordinación SISSA.

MARCELA GONZÁLEZ

Universidad de Buenos Aires (UBA)-CONICET, Argentina.
Unidad de Coordinación SISSA.

SISSA-ART-001-2023
JUNIO 2023

SISSA.CRC-SAS.ORG



Financiado por
la Unión Europea



ÍNDICE

SIGLAS Y ABREVIATURAS	3
INTRODUCCIÓN	4
DEFINICIÓN Y ESTRATEGIAS DE MONITOREO DE LAS SEQUÍAS DE LA REGIÓN	5
CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS A TRAVÉS DE ÍNDICES	5
MONITOREO DE LAS SEQUÍAS METEOROLÓGICAS.....	6
Índices de sequía basados en precipitación	6
Índices de sequía basados en precipitación y temperatura.....	7
MONITOREO DE LAS SEQUÍAS AGRÍCOLAS / ECOLÓGICAS.....	8
Índices de humedad del suelo	9
Índices de vegetación	10
MONITOREO DE LAS SEQUÍAS HIDROLÓGICAS.....	10
Índices combinados.....	11
CASOS DE SEQUÍAS RECIENTES	12
MEGASEQUÍA DE CHILE CENTRAL Y DEL CENTRO-OESTE DE ARGENTINA (2010-CONTINÚA A LA FECHA).....	12
SEQUÍA EN LA CUENCA DEL PLATA (2019-2023)	14
VARIABILIDAD CLIMÁTICA	17
CAPACIDADES Y DESAFÍOS EN LA PREDICCIÓN DE LAS SEQUÍAS	20
CAMBIOS OBSERVADOS Y PROYECTADOS A FUTURO DE LAS SEQUÍAS	23
REFLEXIONES FINALES	24
ACERCA DEL SISSA	24
REFERENCIAS	25



SIGLAS Y ABREVIATURAS

AIC: Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas

CRC-SAS: Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur

ENOS: El Niño-Oscilación del Sur

ESI: índice de estrés evaporativo

EVI: Índice de vegetación mejorado (Enhanced Vegetation Index)

IOD: Dipolo del Océano Índico

IPCC: Panel Intergubernamental de Cambio Climático

MODIS: Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada
(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)

NDVI: Índice de vegetación (Normalized Difference Vegetation Index)

NMME: North American Multimodel Project

OIP: Oscilación Interdecadal del Pacífico

OMA: Oscilación Multidecadal del Atlántico

PET: Evapotranspiración potencial

SAM: Modo Anular del Sur

SESA: Sudeste de Sudamérica

SISA: Sistema de Información sobre Sequías para el sur de Sudamérica

SPEI: Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración

SPI: Índice de Precipitación Estandarizado



INTRODUCCIÓN

Actuar con antelación para reducir el impacto de las sequías requiere conocer su estado y su posible futura evolución. A diferencia de otros eventos meteorológicos o climáticos que se producen abruptamente, como las tormentas severas, las sequías son eventos de lento desarrollo, cuyas causas requieren un monitoreo constante de las variables o factores que las explican.

El conocimiento sobre las condiciones climáticas que pueden dar lugar a una sequía en el sur de Sudamérica se ha incrementado en las últimas décadas. El incremento de las estaciones meteorológicas en varios países de la región, así como la disponibilidad de información satelital y la implementación de diversos proyectos de investigación y desarrollo –tanto nacionales como internacionales– han contribuido a incrementar el conocimiento relacionado con las sequías en la región.

En las siguientes secciones se describen brevemente los aspectos más salientes de las sequías en la región en general, los procesos climáticos que las explican, algunas de las sequías regionales más severas y recientes, sus perspectivas futuras en el contexto del cambio climático y los desafíos que involucran su monitoreo y predicción.

La discusión no es exhaustiva y se concentra en aquellos aspectos necesarios para entender las estrategias posibles de monitoreo y pronóstico de las sequías de la región. Por otra parte, si bien el foco se centra en las sequías meteorológicas, la discusión se complementa con descripciones sobre algunos aspectos relacionados con las sequías hidrológicas y agrícolas/ecológicas que son objeto de estudio actual de esta etapa del SISSA y serán abordadas en consecuencia con mayor profundidad en otras publicaciones futuras.



DEFINICIÓN Y ESTRATEGIAS DE MONITOREO DE LAS SEQUIÁS DE LA REGIÓN

El monitoreo de las sequías en sus diferentes tipos se ha extendido en la región. Tanto el número de instituciones que lo realizan como las estrategias que aplican se incrementa continuamente. El uso de indicadores como la precipitación, la temperatura, los caudales fluviales o la humedad del suelo ha sido la estrategia básica de monitoreo utilizada históricamente. Más recientemente se ha sumado el uso de índices –representaciones numéricas basadas en las variables indicadoras que permiten determinar la ocurrencia y/o severidad de las sequías–, que hacen posible realizar un seguimiento más ajustado a las características del fenómeno.

CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUIÁS A TRAVÉS DE ÍNDICES

Para describir y monitorear las características de las sequías meteorológicas se utilizan diferentes índices, que pueden estar basados solo en la precipitación o considerar otras variables relevantes. Estos índices se calculan a partir de datos medidos en estaciones, derivados de información satelital o de modelos numéricos de simulación de la atmósfera.

Las sequías pueden ser caracterizadas mediante la utilización de los *deciles*, que surgen de dividir en 10 partes iguales la distribución de las precipitaciones acumuladas en un determinado lugar durante un período de tiempo dado. Al ordenar de menor a mayor estos valores y dividirlos por 10 obtenemos los deciles, que son los valores umbrales de cada categoría.

De manera equivalente, se pueden dividir los valores en 100 partes iguales y obtener los *percentiles*. Esta distribución –que se puede calcular no solo para la lluvia sino también para cualquier variable atmosférica– se asocia con funciones matemáticas teóricas. Pero, mientras que la mayoría de las variables atmosféricas (como la temperatura o la presión) se asocian con la distribución llamada *normal* o *gaussiana*, la lluvia se asocia con una distribución llamada *Gamma*. Dado que los parámetros estadísticos típicamente utilizados en series temporales de datos –como el promedio y el desvío estándar– requieren que la distribución sea *normal*, es necesario entonces transformar la distribución de la precipitación antes de utilizarla como indicador o para calcular algún otro índice.



MONITOREO DE LAS SEQUIÁS METEOROLÓGICAS

ÍNDICES DE SEQUÍA BASADOS EN PRECIPITACIÓN

Uno de los índices más utilizados es el de Precipitación Estandarizado (conocido por su sigla en inglés SPI), que permite comparar los registros de precipitación de lugares con diferentes condiciones climáticas y es simple de calcular, ya que solo tiene en cuenta la cantidad de lluvia caída.

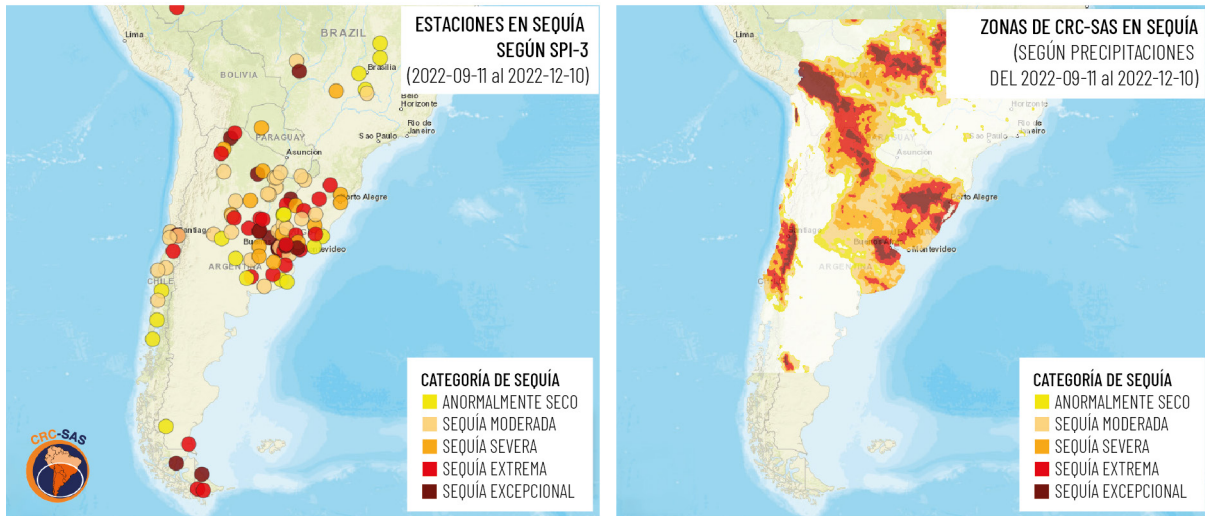
El índice SPI representa el número de desvíos estándar de la precipitación acumulada en un período determinado con respecto al promedio correspondiente. Generalmente se lo computa en escalas de 3 (SPI3), 6 (SPI6) y 12 (SPI12) meses para representar sequías de corto, medio y largo término. El SPI es un índice apropiado para describir las sequías en el sur de Sudamérica. Sin embargo, en una región tan extensa y compleja, y con una heterogeneidad de condiciones climáticas de base, uno de los desafíos es determinar qué tipo de datos de precipitación se deben utilizar para su cómputo.

Los datos de lluvia de mayor calidad son aquellos obtenidos en las estaciones meteorológicas convencionales o automáticas que mantienen los servicios meteorológicos u otros organismos públicos de los diferentes países. Pero la densidad de estas redes en Sudamérica es relativamente pobre, y generalmente la extensión temporal de los registros no es muy larga (para calcular las climatologías se requieren aproximadamente 30 años de datos).

Complementariamente, se utilizan estimaciones de precipitación basadas en información satelital o inclusive en la combinación de información satelital y de datos de estaciones meteorológicas *in situ*. Estas estimaciones han permitido contar por primera vez con una visión zonalmente integrada de las condiciones de sequías, y su aplicación para el cómputo de índices como el SPI es muy promisorio. Sin embargo, todavía se necesita avanzar en la corrección y ajuste de estas estimaciones para lograr que proporcionen cuantificaciones de la precipitación local y regional de calidad.

Otro tema a tener en cuenta es que la información satelital y las estimaciones de precipitación derivadas son provistas abiertamente por centros ubicados en países que no pertenecen a la región, como por ejemplo los Estados Unidos. Si, por alguna razón, la disponibilidad de estos datos se ve interrumpida, puede afectar la provisión de los productos derivados para monitorear la sequía.

En consecuencia, actualmente se están investigando y desarrollando en el sector científico metodologías que combinan estimaciones de precipitación de diferentes fuentes. Esta estrategia no solo mejoraría el desempeño de los productos, sino que también resolvería la falta temporal de alguno de los productos que se combinan.



El [SISSA](#) proporciona diferentes productos basados en los índices de sequías meteorológicas. Dos de ellos son el mapa de estaciones meteorológicas bajo condiciones de sequía y el mapa de las zonas que se encuentran en sequía según las estimaciones de precipitación CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data). Ambos fueron computados a partir del índice SPI3 para un determinado período. CHIRPS estima la precipitación combinando datos satelitales con observaciones in situ de las estaciones meteorológicas. Las categorías de sequía se calculan en base a los percentiles de precipitación acumulada tomando como período de referencia los 35 años comprendidos entre 1982 y 2016 inclusive. En base a estos percentiles, se asigna una categoría de sequía según las especificaciones del United States Drought Monitor.

ÍNDICES DE SEQUÍA BASADOS EN PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA

Los índices basados solo en la precipitación señalan esencialmente la oferta de agua, pero no reflejan los efectos asociados con otros factores, como por ejemplo la temperatura. El Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés) es una extensión del SPI ampliamente utilizado. El SPEI está diseñado para tener en cuenta tanto la precipitación como la evapotranspiración potencial (PET) a la hora de cuantificar la sequía¹. Por lo tanto, a diferencia del SPI, el SPEI incluye el impacto del aumento de las temperaturas en la demanda de agua.

El procedimiento para calcular el SPEI es similar al utilizado para el SPI. Sin embargo, el SPEI compara el agua disponible con la demanda evaporativa atmosférica, y por lo tanto proporciona una medida más integrada de la severidad de la sequía. La desventaja que tiene este índice es que requiere datos de más variables meteorológicas para su cálculo. Además, sus valores dependen del método utilizado para estimar la evapotranspiración potencial.

El análisis comparativo de un conjunto de diferentes índices puede dar una visión integrada y complementaria, ya que permite apreciar rápidamente consistencias (o no) entre las diferentes formas de cuantificar las condiciones relacionadas con las sequías.

1 La evapotranspiración potencial es la evaporación de agua del suelo y la transpiración de las plantas que se producirían si la humedad del suelo y la cobertura vegetal se encontraran en óptimas condiciones (es decir, si tuvieran la mayor cantidad de agua posible). Para más información, ver Thornthwaite (1948).



VALORES DE ÍNDICES | 16 DE OCTUBRE DE 2022 AL 15 DE ABRIL DE 2023 (6 MESES)

ÍNDICE		VALOR ACTUAL VS. VALOR ANTERIOR
SPI SEQUÍA SEVERA		-1.33 ▼ -0.89
SPEI SEQUÍA EXTREMA		-1.71 ▼ -1.62
Decil SEQUÍA SEVERA		2 = 2
% Precip. Normal SEQUÍA MODERADA		67 ▼ 76

Valores de índices de sequías estimados por [SISA](#) a partir de las observaciones de la estación Rocha, en Uruguay, para una escala temporal de 6 meses. La primera columna indica la categoría actual de las condiciones secas, normales o húmedas para cada índice. La segunda columna indica en forma gráfica el valor actual de cada índice (representado por la "aguja" del gráfico). Las diferentes categorías de condiciones (moderadas a extremas o normales) se representan con distintos colores. La tercera columna compara el valor actual (indicado por un número en tamaño grande a la izquierda de la columna) con el valor inmediatamente anterior (indicado con el número de menor tamaño a la derecha de la columna).

MONITOREO DE LAS SEQUÍAS AGRÍCOLAS / ECOLÓGICAS

Como se discutió en la sección *Introducción*, las sequías se inician con períodos de déficit anormal de precipitación, combinados con determinadas condiciones anómalas de temperatura, radiación y viento. La persistencia de estas condiciones puede dar lugar a la ocurrencia de sequías agrícolas / ecológicas y/o sequías hidrológicas, que requieren estrategias específicas de monitoreo en cada caso.

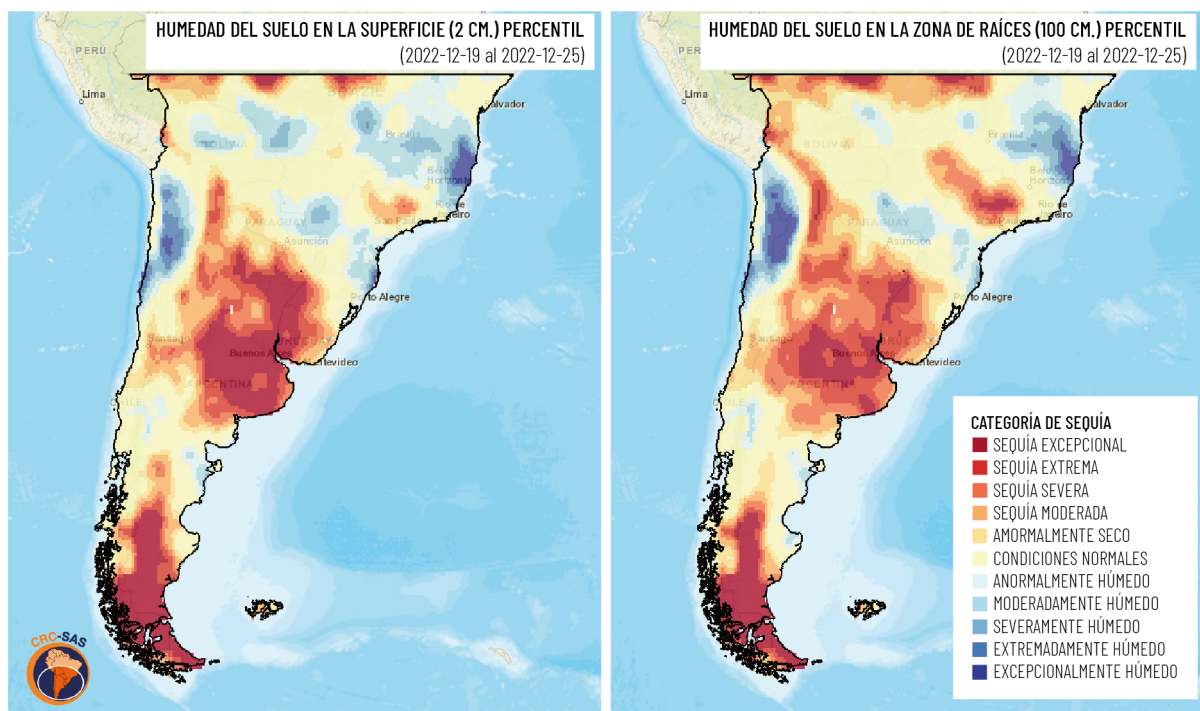


ÍNDICES DE HUMEDAD DEL SUELO

El monitoreo de las sequías agrícolas / ecológicas se realiza analizando principalmente las variaciones de la humedad del suelo y se complementa con el seguimiento de las condiciones de la vegetación. Pero, en la mayor parte del sur de Sudamérica, las mediciones *in situ* de humedad del suelo son muy escasas y no se realizan de manera rutinaria. Por ese motivo, las estimaciones derivadas de información satelital son la fuente principal para monitorear las condiciones deficitarias de agua en el suelo. La información que proporcionan los sensores satelitales se combina con datos de diferentes variables y modelos de suelo, lo que permite obtener información no solo sobre la humedad del suelo sino también sobre, por ejemplo, la cantidad de nieve o agua subterránea.

La utilización de modelos de suelo, como en el caso de los datos de la misión GRACE realizada de manera conjunta entre la NASA y la Agencia Espacial Alemana, permite discriminar entre la humedad del suelo en superficie (es decir, agua contenida en los primeros 2 cm de profundidad), la humedad del suelo en la zona de raíces (agua contenida en los primeros 100 cm) y el almacenamiento de agua subterránea (agua acumulada por debajo de los primeros 100 cm).

La comparación de la humedad del suelo a diferentes niveles permite monitorear el grado de evolución de una determinada sequía y sus potenciales impactos o consecuencias en los cultivos agrícolas o en los ecosistemas naturales.



Izquierda: Condiciones de humedad del suelo en superficie (los primeros 2 cm). Derecha: Condiciones de humedad del suelo en la zona de las raíces (los primeros 100 cm). Ambas, estimadas por SISA a partir de los datos de GRACE. La comparación entre ambos paneles permite distinguir la diferencia en la severidad de la sequía entre el nivel de superficie y el nivel subterráneo de las raíces.



Las validaciones de este tipo de estimaciones de humedad del suelo en el sur de Sudamérica resultan promisorias. Sin embargo, la falta de mediciones *in situ*, así como las limitaciones de las técnicas de calibración para considerar adecuadamente la heterogeneidad de la superficie, son algunos de los problemas detectados. Estos desafíos son objeto actual de investigaciones que permitan mejorar a futuro la calidad cuantitativa de este tipo de datos de humedad de suelo.

ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Los índices de vegetación son indicadores del verdor de las áreas vegetadas, que es función del área foliar, el contenido de clorofila y la estructura de la vegetación (el canopy). Además, estos índices permiten distinguir zonas sin vegetación, zonas construidas o superficies de agua.

En el marco de SISSA se utilizan el NDVI (por sus siglas en inglés, Normalized Difference Vegetation Index) y el EVI (iniciales en inglés de Enhanced Vegetation Index), calculados a partir de datos del sensor MODIS (en inglés, Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA. Ambos índices permiten caracterizar el rango de estados y procesos relacionados con la vegetación global en el tiempo y el espacio. En especial, las series temporales de estos índices muestran variaciones en el desarrollo de la vegetación natural y de los cultivos agrícolas.

El NDVI es un indicador de verdor y tiene una fuerte relación con la biomasa verde, que es indicativa de crecimiento pero es sensible a la luminosidad del suelo y a los efectos atmosféricos. El índice EVI corrige al NDVI por la dispersión de los aerosoles presentes en la atmósfera y mejora el ajuste del dosel o *canopy* (estrato superior) de la vegetación.

Asimismo, el índice de estrés evaporativo (ESI, por su sigla en inglés) identifica regiones donde la vegetación está sufriendo por falta de agua. Los valores de ESI negativos indican tasas de evapotranspiración por debajo de lo normal, lo que muestra que la vegetación sufrió debido a la humedad inadecuada del suelo, ya que la primera respuesta de las plantas cuando están estresadas por la falta de agua es reducir su transpiración para conservarla dentro de la planta. ESI resulta un buen indicador del desarrollo de las llamadas "sequías repentinas", que pueden impactar en las plantas en cuestión de semanas. El estrés de la vegetación en desarrollo es detectable en esta información satelital a través de cambios en la temperatura de la superficie incluso antes de que se detecte un cambio en la vegetación misma.

MONITOREO DE LAS SEQUÍAS HIDROLÓGICAS

Las sequías hidrológicas se asocian con déficit en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (ríos, embalses, lagos, etc). El conocimiento sobre este tipo de sequías ha crecido globalmente, y también lo ha hecho en Sudamérica en particular. Sin embargo, su monitoreo todavía resulta un desafío por la necesidad de observar e integrar los diferentes componentes del ciclo hidrológico involucrados.

Para monitorear su evolución existen diferentes estrategias. Entre ellas, podemos mencionar los índices que se elaboran sobre la base de datos de caudales fluviales, que a su vez pueden estar basados en umbrales o en diferencias utilizando el promedio y desvío estándar, como el índice normalizado de caudales fluviales, similar al índice SPI. Estos índices resultan fáciles de



calcular, pero dependen de la disponibilidad de información sobre caudales. En el caso del sur de Sudamérica, si bien hay sistemas de observación de los caudales de los grandes ríos, existen todavía importantes limitaciones en la observación de los ríos tributarios, y existe una cierta dificultad para considerar el efecto de las represas .

Índices similares se aplican también a caudales afluentes de embalses en combinación con información sobre los volúmenes medios de almacenamiento. Por otra parte, un desafío adicional es la observación de la nieve en las nacientes de los ríos de montaña, que es limitada en la región y que recientemente se está realizando también utilizando información satelital.

Asimismo, todavía se ha hecho poca investigación sobre la ocurrencia y propagación de sequías en el agua subterránea de los acuíferos de la región. Esto es muy relevante teniendo en cuenta la extensa duración que las sequías están teniendo en algunas partes de la región, como se discute en la siguiente sección. El agua subterránea juega un papel importante en estos casos, y existen evidencias significativas del impacto negativo en los acuíferos sobreexplotados, aunque el monitoreo del volumen y la calidad del agua subterránea es en general todavía muy limitado en la región.

ÍNDICES COMBINADOS

Ante tanta diversidad de estrategias y metodologías, durante los últimos años han surgido propuestas para combinar y sintetizar la información proveniente de diferentes indicadores o índices para generar índices integrados. Este tipo de índices están resultando útiles y valiosos para monitoreo y toma de decisiones ante problemas como, por ejemplo, evaluar la disponibilidad de agua en una zona o región. Índices integrados orientados a monitorear las sequías que afectan a la agricultura pueden combinar la información del SPI, humedad del suelo y datos de condiciones de la vegetación obtenidos por sensoramiento remoto.

Por otra parte, los índices integrados orientados a las sequías hidrológicas en una determinada cuenca pueden combinar información de lluvia y caudales. En el sur de Sudamérica la provisión de este tipo de índices es todavía incipiente, pero hay evidencias de que se incrementará en el futuro cercano.

En suma, si bien existen diferentes indicadores e índices para monitorear las sequías, no es posible identificar uno solo que sirva para para tal tarea. El enfoque más común es el de utilizar un conjunto de indicadores e índices que se puedan producir en forma operativa, que sean de libre utilización y que resulten útiles para los tomadores de decisión. El conjunto de los usuarios y las instituciones proveedoras es quien tiene que determinar qué índices utilizar dependiendo de las circunstancias y capacidades regionales, nacionales y subnacionales.



CASOS DE SEQUIÁS RECIENTES

La ocurrencia ocasional de sequías forma parte de los fenómenos que la variabilidad climática natural del sur de Sudamérica puede promover. Inclusive existen evidencias de que la influencia humana en el clima está alterando su frecuencia e intensidad, y el cambio que se proyecta también a futuro se discute en la última sección. Recientemente han ocurrido dos eventos particulares de sequías que vale la pena discutir en detalle por su extensión, duración y severidad.

MEGASEQUÍA DE CHILE CENTRAL Y DEL CENTRO-OESTE DE ARGENTINA (2010-CONTINÚA A LA FECHA)

La región central de Chile ha experimentado un evento de sequía persistente y severa desde 2010, que continúa a la fecha. Por sus características, se la ha denominado *megasequía*. Hasta 2018, ha sido la secuencia de años secos más larga registrada en el período observacional (que inicia en 1914) y no tiene casi ninguna situación análoga en el último milenio. Ha tenido hasta el momento impactos importantes en la disponibilidad de agua, la vegetación y en la ocurrencia de incendios.

Las condiciones secas y persistentes han afectado también el centro-oeste de Argentina. La disponibilidad de agua en esta región binacional –esencial para el consumo y el desarrollo productivo, como el turismo invernal y la producción de vino y frutas finas, entre otras–, depende principalmente de los caudales de los ríos alimentados por las nevadas invernales. Durante la década 2010-2020, la muy reducida acumulación de nieve sobre las montañas de los Andes ha impactado negativamente en el turismo de invierno, y ha promovido una sequía hidrológica que ha restringido el uso del agua para irrigación y uso doméstico, llevando a importantes disputas sociopolíticas.

La magnitud de la sequía hidrológica no tiene precedentes en –al menos– los últimos 50 años de registros de caudales de la región argentina. Este déficit hidrológico puso en evidencia los desafíos que enfrentan los administradores para proporcionar agua para riego en los principales oasis agrícolas, con una sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos para complementar la limitada escorrentía superficial. Allí también se localiza un gran número de presas hidroeléctricas que proveen energía hidroeléctrica, lo que genera un impacto adicional en la economía regional y nacional.

Las investigaciones muestran que la duración excepcional de esta sequía está relacionada con la reiteración ininterrumpida de condiciones anómalas de circulación en el hemisferio sur –llamados generalmente “patrones de circulación atmosférica de gran escala”– que durante el invierno han impedido el pasaje de las tormentas que producen la lluvia sobre el centro de Chile y el centro-oeste de Argentina. Este patrón se caracteriza por condiciones anómalas de alta presión sobre la región centro-este del Pacífico subtropical, y de baja presión sobre el mar de Amundsen-Bellinghausen.



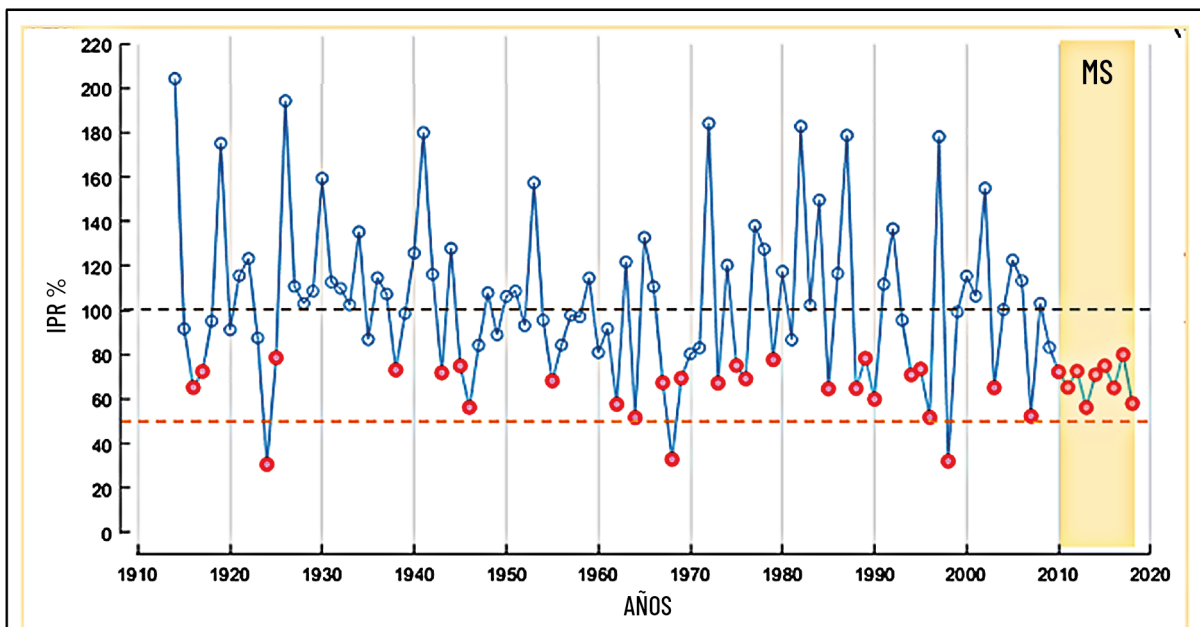
En sequías históricas que esta región experimentó previamente, se había identificado a los eventos de “la Niña” –una de las fases del fenómeno de “el Niño-Oscilación del Sur” (ENOS)- como principales responsables de estas condiciones de circulación anómala. Sin embargo, esta megasequía ha ocurrido principalmente bajo condiciones neutras del ENOS, excepto en los inviernos de 2010 (la Niña), del 2015 (el Niño fuerte) y entre 2020 y 2022 (la Niña).

La variabilidad natural del clima de nuestro planeta puede producir condiciones tan persistentemente extremas. En particular, se ha observado durante el período de la megasequía un calentamiento sostenido de la superficie del océano en el Pacífico sudoeste, región cercana a Nueva Zelanda, desde la que se generan cambios en la circulación atmosférica hasta Sudamérica que promueven las recientes condiciones secas en Chile central y Cuyo en Argentina.

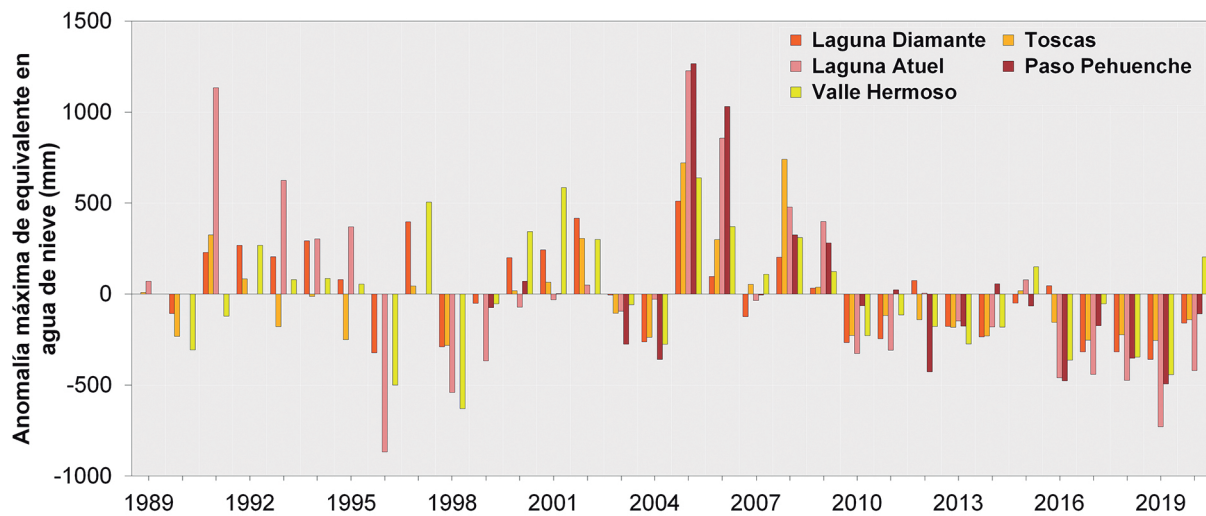
Pero, además, existen evidencias de que el cambio climático producido por las actividades humanas podría tener un papel para explicar esta sequía en particular. Como veremos más adelante, tanto el aumento de gases de efecto invernadero como la disminución del ozono estratosférico asociados a las actividades humanas están ya alterando la circulación del aire en el Pacífico Sur y en el sur de Sudamérica, de manera tal que también explicarían al menos en parte la persistencia de esta megasequía.

Esto permite especular entonces que solo se podrían anticipar recuperaciones parciales de las condiciones de precipitación en esta región para las próximas décadas mientras el cambio climático antropogénico continúe.

ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN REGIONAL



Evolución de los valores anuales de un índice de precipitación regional definido como la mediana de los valores anuales estandarizados de lluvia acumulada observada en 7 estaciones de Chile central. Los años anómalamente secos están identificados con un círculo rojo (figura adaptada de Garreaud et al., 2020).



Evolución temporal del “valor máximo anual del equivalente de agua de nieve” en 5 estaciones en las montañas del centro-oeste de Argentina, calculado como desvío con respecto al período 1990-2020 (figura adaptada de Rivera et al., 2021).

SEQUÍA EN LA CUENCA DEL PLATA (2019-2023)

Una sequía multianual ha afectado la cuenca del Plata desde mediados de 2019 hasta al menos los primeros meses de 2023. Debido a su prolongada duración y severidad, la sequía ha afectado seriamente la disponibilidad de agua para las diferentes actividades socioeconómicas y para los ecosistemas naturales. Esto incluye interrupciones en la provisión de agua, incendios forestales, reducción en los rendimientos agrícolas, disminución del transporte fluvial y una importante reducción en la producción de energía hidroeléctrica. El impacto en los ecosistemas naturales y la biodiversidad ha sido severo y especialmente agudo en el Pantanal, uno de los humedales más grandes del continente sudamericano.

Esta sequía comenzó con precipitaciones por debajo de lo normal a mediados de 2019 en las cuencas altas de los ríos Paraguay y Paraná, en el centro-sur de Brasil, tornándose rápidamente en condiciones de sequía severas, extremas y excepcionales. A finales de 2019, la sequía afectaba a los estados brasileños de Mato Grosso, Goiás, São Paulo y Paraná, así como a Paraguay y el centro de Argentina. Esta situación continuó durante 2020 y se extendió espacialmente a fines de 2020, cuando también el norte y las pampas del centro-este de Argentina sufrieron una sequía generalizada.

El déficit de lluvia en la cuenca del Plata en el período 2019-2021 ya se puede clasificar entre los cinco eventos más extremos en el sudeste de Sudamérica desde la década de 1950. Las condiciones de sequía en la cuenca del Plata en Brasil-Argentina para septiembre de 2022 han sido las peores desde 1944. Si bien la zona tropical de la cuenca se caracteriza por una estación lluviosa con un pico de octubre a abril, el año hidrológico 2020-2021 fue muy deficitario en precipitaciones, y la situación se extendió al 2021-2022. Las lluvias por debajo de lo normal también fueron dominantes en el sudeste de Brasil, el norte de Argentina, Paraguay y Uruguay. En 2021, las regiones del sur y sudeste de Brasil enfrentaron sus peores sequías en nueve décadas.



La escasez de precipitaciones ha tenido impactos significativos en el ciclo hidrológico de la cuenca, afectando por ejemplo la humedad del suelo y el almacenamiento de agua subterránea, así como los caudales de los ríos. La respuesta a la disminución de la precipitación se ha traducido inclusive en una reducción más que proporcional del flujo de agua superficial y subterránea. La falta de lluvias –principalmente en la parte superior de la cuenca– llevó a una disminución extrema del caudal de los ríos Paraná y Paraguay.

El impacto de esta sequía sobre la humedad del suelo ha sido intermitentemente mitigado por lluvias esporádicas promovidas por la variabilidad atmosférica en escalas de días (sinóptica) y semanas (subestacional). Sin embargo, no han sido suficientes para restaurar los niveles de agua y de aguas subterráneas totales.

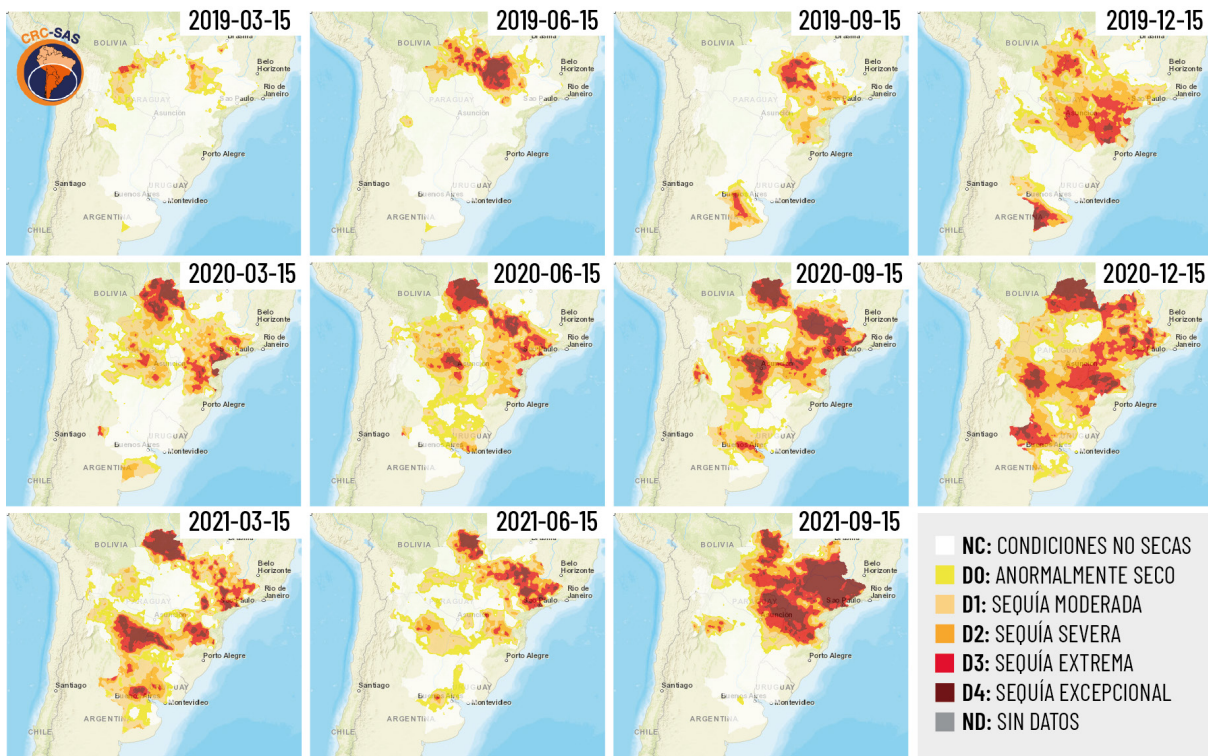
A través de simulaciones numéricas se confirmó que las tendencias negativas de lluvia, humedad de suelo y de condiciones de agua subterráneas promovieron –especialmente en 2021– niveles anormalmente bajos en los ríos. Fuentes locales reportaron que, en agosto de 2021, el flujo del río Paraná a la altura de las ciudades argentinas de Corrientes y Rosario era menos de la mitad del valor promedio de los últimos 25 años. La Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas (AIC) informó que el río Paraná alcanzó su nivel más bajo en 77 años en mayo de 2021 con 1,47 metros por debajo de su nivel normal en la ciudad argentina de Rosario. Los niveles extremadamente bajos del Paraná promovieron ese año una sequía hidrológica que ha sido la más severa registrada desde 1981, con impactos muy serios en la generación de energía hidroeléctrica.

En la mayor parte de la cuenca del Plata, la ocurrencia de eventos de la Niña suele ir acompañada de sequías, lo que tiene efectos particularmente negativos en el sur de Brasil, el noreste de Argentina, Paraguay y Uruguay. El análisis de este evento en particular muestra que, si bien desde mediados del 2019 hasta mediados de 2020 se observaron condiciones neutras de ENOS, desde la segunda mitad del 2020 hasta febrero 2023 se han detectado prácticamente sin interrupciones condiciones de la Niña.

Dadas sus inusuales características, las causas de este evento multianual de la Niña están siendo estudiadas por investigadores del mundo entero. Asimismo, queda por estudiar si otros factores, como el cambio del uso del suelo y el aumento antropogénico de las emisiones de gases de efecto invernadero, puedan haber tenido un papel para explicar la ocurrencia de esta sequía multianual.



SISSA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA



Condiciones de sequía en la cuenca del Plata derivadas del índice SPI-6 a partir de datos CHIRPS desde el 15/3/2019 hasta el 30/9/2021 (figura adaptada de Naumann et al. 2021, que a su vez utilizó la información de SISSA).



VARIABILIDAD CLIMÁTICA

La variabilidad climática en el sur de Sudamérica, que puede promover alteraciones en la frecuencia e intensidad de las sequías, exhibe una magnitud considerable tanto en escalas interanuales como decadales, e inclusive más largas. Esta variabilidad no solo es detectable en parámetros atmosféricos como la precipitación y la temperatura, sino también en parámetros de superficie, como los caudales de los ríos y la humedad del suelo o la evapotranspiración.

La influencia de la actividad del ENOS es considerada como la más importante sobre la variabilidad climática regional. El ENOS es el principal patrón climático en la región tropical del Pacífico, con una periodicidad de alrededor de 2-7 años. Es capaz de afectar las condiciones de circulación en el hemisferio sur (como la presión y los vientos), generando teleconexiones entre el Pacífico tropical y la región sudamericana que alteran a su vez las condiciones climáticas regionales como la precipitación y temperatura.

En los eventos de la Niña se registra un incremento en la probabilidad de ocurrencia de sequías en diversas regiones del sur de Sudamérica. La mayor influencia de La Niña sobre la ocurrencia de sequías (tanto descritas con el SPI3 como con el SPI12) se encuentra en especial sobre el sudeste de Sudamérica (SESA, que engloba al centro-este de Argentina y Paraguay, Uruguay y sur de Brasil), así como también en la región montañosa de los Andes, entre Chile central y el centro-oeste de Argentina y la región patagónica. Esta influencia varía con la época del año y es más importante y coherente hacia el fin del año en que se inició La Niña, y en general hasta el otoño del año siguiente.

Además del patrón ENOS, existen otros patrones climáticos de gran escala que tienen influencia en el sur de Sudamérica. Uno de ellos es el llamado patrón del "Dipolo del Océano Índico" (conocido por su sigla en inglés, IOD), que se define por la diferencia en la temperatura de la superficie del mar entre dos áreas (o polos, por lo tanto, un dipolo): un área occidental en el Mar Árabe (Océano Índico occidental) y el área sur del Océano Índico oriental, al sur de Indonesia.

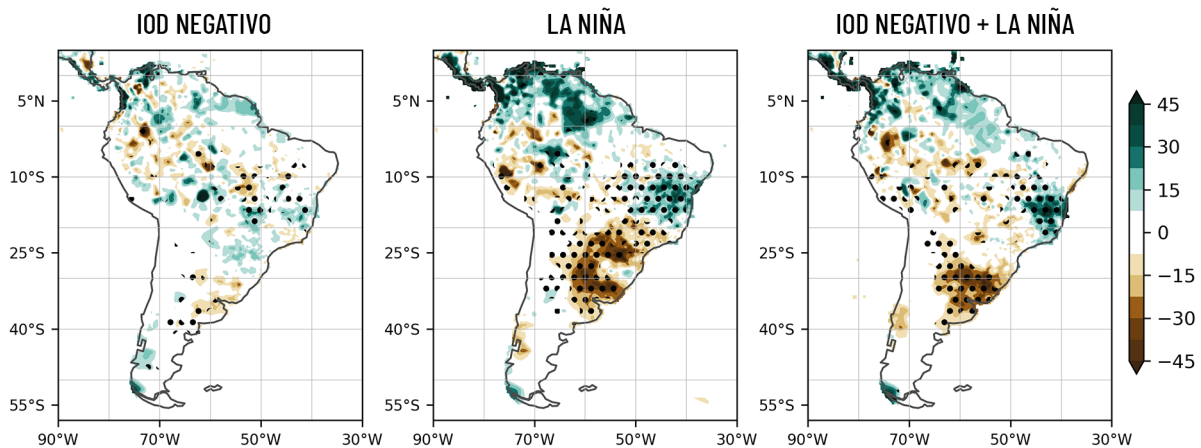
Como el ENOS, el IOD es un patrón oscilatorio con una periodicidad de alrededor de 2-4 años. En su fase positiva (IOD-P) presenta condiciones anómalamente más cálidas al oeste que al este; y en su fase negativa (IOD-N), condiciones opuestas. Su actividad en el invierno y la primavera influye sobre las condiciones climáticas en el hemisferio sur, y en particular en el sur de Sudamérica, a través del fenómeno de teleconexiones.

Teniendo en cuenta las vinculaciones climáticas que existen entre las porciones tropicales del Pacífico e Índico, es posible que eventos IOD y ENOS se den en conjunto o por separado. Hay una mayor frecuencia de ocurrencia de eventos del Niño en conjunto con eventos IOD-P, y de eventos de La Niña con eventos de IOD-N. Como muestra la siguiente figura, en la primavera del hemisferio sur (septiembre, octubre y noviembre) déficits significativos de precipitación se destacan en asociación con eventos puros de la Niña sobre el sudeste de Sudamérica y en el norte-centro de la región andino-patagónica entre Argentina y Chile.

Sin embargo, en aquellos eventos de la Niña que ocurren en combinación con una fase IOD-N, los déficits de lluvia se concentran principalmente sobre Uruguay y el centro-este de Argentina, mientras que en la cordillera de los Andes son menos intensos y ubicados más al norte que en



los casos de la Niña puros. Se destaca también que, inclusive actuando en ausencia de la Niña, eventos IOD-N promueven déficits significativos de lluvia en el centro de Argentina, sur de Uruguay y en los Andes del sur.



Anomalías de precipitación de SON durante eventos IOD-N puros, eventos La Niña y eventos combinados la Niña y IOD-N en el período 1950-2020. (Figura adaptada de Andrian et al., 2022).

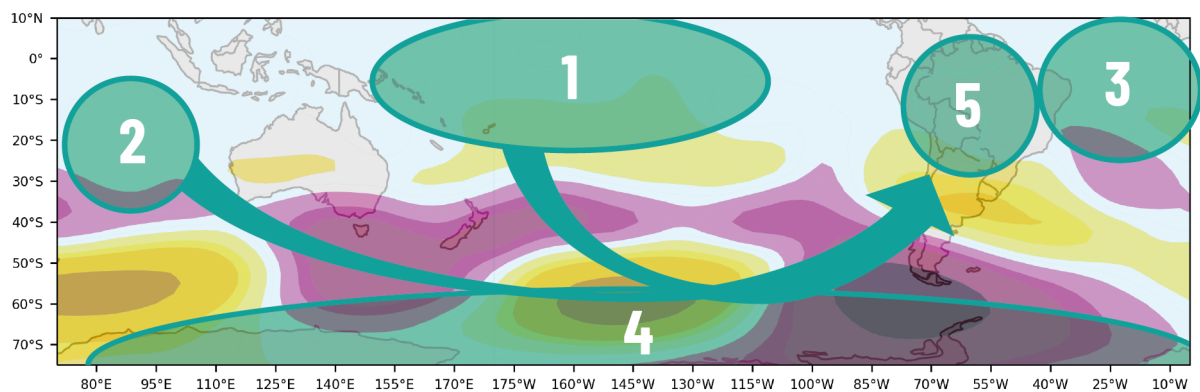
Además de la influencia tropical, la circulación atmosférica del hemisferio sur exhibe una importante variabilidad asociada a un patrón llamado Modo Anular del Sur (o SAM, por su sigla en inglés). SAM se caracteriza por anomalías de presión de signo opuesto entre las regiones polares-antárticas y las latitudes medias. En su fase positiva, presiones más bajas que lo normal dominan la zona polar y presiones más altas que lo normal se extienden en las latitudes extratropicales y subtropicales, promoviendo una intensificación de los vientos del oeste y una migración de las trayectorias de los sistemas meteorológicos más al sur. Esto induce condiciones anómalamente más secas en la región de Chile central y centro-oeste de Argentina, así como en el SESA. Desde mediados de los años ochenta hasta aproximadamente el año 2015 se ha detectado una correlación significativa negativa entre la actividad del ENOS y del SAM en primavera y verano. Esto se asocia con una mayor frecuencia de ocurrencia conjunta de eventos de la Niña con fases positivas del SAM, lo que refuerza las condiciones de sequedad anómalas que ambos patrones producen en el sur de Sudamérica de manera individual.

Analizando lo que ocurre en escalas de décadas, e inclusive más largas, los estudios muestran que la precipitación y los caudales de los ríos en el sur de Sudamérica, como los ríos andinos y los que conforman la cuenca del Plata, exhiben ciclos de variabilidad con periodicidades de alrededor de 20 años. Esta variabilidad es en buena parte inducida por la Oscilación Interdecadal del Pacífico (OIP) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA), lo que es nuevamente una evidencia de la importancia de la influencia de la variabilidad oceánica tropical en el clima del sur de Sudamérica.

Mientras que las décadas de 1930 y 1940 se asociaron con una fase negativa de la OIP y sequías importantes en el sur de Sudamérica, el período entre mediados de los 70 y el año 2000 se ha asociado con una fase positiva de la OIP y condiciones relativamente más húmedas en promedio



que lo normal en la región sudamericana. Más recientemente, la variabilidad decadal y multi-decadal estaría promoviendo condiciones regionales más secas que lo normal desde alrededor del 2010 hasta al menos 2022. En este sentido, cabe resaltar la importancia de considerar esta variabilidad en largas escalas temporales en el contexto del cambio climático inducido por las actividades humanas, que discutiremos más adelante.



Esta infografía representa las principales fuentes de variabilidad climática de gran escala que contribuyen a promover las condiciones regionales que resultan en eventos de sequías. (1) El Pacífico ecuatorial está asociado con la actividad de los patrones ENOS en escalas interanuales y de la OIP en escalas decenales mientras que (2) el Índico tropical se asocia con la actividad del patrón IOD en escalas interanuales. Todos estos patrones se caracterizan con condiciones oceánico-atmosféricas anormales en la banda tropical que alteran la circulación atmosférica (teleconexiones) que llega hasta Sudamérica (flechas). (3) Además, condiciones anormales en el Atlántico tropical pueden influir en el transporte de humedad hacia Sudamérica. Por otra parte, (4) en las regiones polares la actividad del SAM promueve cambios en los vientos del oeste en latitudes medias del hemisferio sur que, o bien intensifican o debilitan las teleconexiones de los patrones tropicales si están activos, o alteran en forma independiente la circulación sobre el sur de Sudamérica. (5) Durante el verano, una actividad intensificada del Monzón de Sudamérica puede promover condiciones secas y cálidas sobre el sur de Sudamérica. En sombreados rojizos y azulados se visualizan las regiones con presiones por encima y por debajo de lo normal respectivamente durante marzo de 2023.



CAPACIDADES Y DESAFÍOS EN LA PREDICCIÓN DE LAS SEQUIÁS

Teniendo en cuenta la duración típica de las sequías de meses, e inclusive años, las herramientas de predicción para anticipar su ocurrencia y magnitud se derivan y apuntalan a partir del conocimiento y las capacidades asociados con la predicción climática. Se denomina de esta manera a las estrategias de pronóstico con semanas, meses, estaciones e inclusive años de anticipación.

Los pronósticos de las variables atmosféricas son sensibles a las condiciones iniciales, es decir que su predictibilidad depende del estado inicial del sistema. Pero, por la naturaleza caótica que caracteriza en buena parte al comportamiento de la atmósfera, la memoria de ese estado inicial se limita a aproximadamente los 10 días. Esto genera un límite a la capacidad del pronóstico meteorológico. Sin embargo, aunque los eventos meteorológicos individuales no son predecibles más allá de los 10 días, el "comportamiento promedio" (es decir, el clima) puede verse influenciado por condiciones de contorno durante varios meses o más, y puede ser –al menos en parte– predecible. A esto se le llama *predictibilidad potencial*, y su grado o nivel varía según la región del planeta y/o de la estación del año.

Esto abre la posibilidad de predecir las condiciones climáticas, al menos en forma probabilística. Estas condiciones de contorno o fuentes de predictibilidad son, por un lado, la "memoria inercial", es decir, la inercia con la cual las condiciones climáticas tardan períodos relativamente largos en decaer. El contenido de calor en el océano, la humedad del suelo, la cubierta de nieve o las variaciones en la capa freática son ejemplos de memoria inercial.

Otra fuente de predictibilidad climática es la asociada con la actividad de los patrones climáticos de gran escala. La actividad de patrones como el ENOS o el IOD, que mencionamos previamente, pueden dar lugar a variaciones en variables climáticas claves que persisten mientras el patrón esté activo. Los forzamientos externos (tales como el incremento de gases de efecto invernadero, el cambio de uso de la tierra o las fluctuaciones de la radiación solar) son también fuentes de predictibilidad climática.

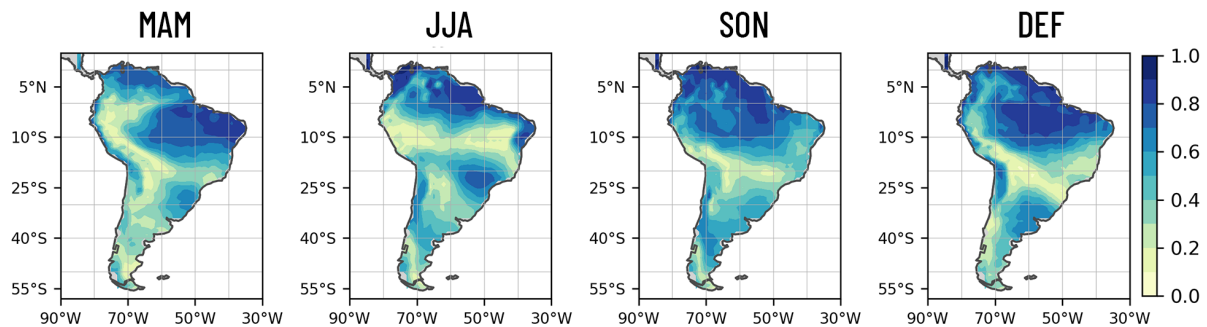
Este concepto de predictibilidad climática, en especial aquella asociada con la influencia oceánica, ha sido aplicado para generar herramientas estadísticas de predicción. Actualmente, los modelos numéricos globales del clima se han convertido en una herramienta importante para la predicción climática a nivel regional.

Las investigaciones muestran que la predictibilidad y la calidad de la predicción en escalas estacionales aumenta cuando se utiliza un conjunto de predicciones provenientes de diferentes modelos. Estos modelos son desarrollados y operados solamente por un número relativamente pequeño de organismos en el mundo. Los pronósticos que estos modelos generan son el insumo indispensable para el desarrollo y operación de herramientas de predicción climática a escala regional, como las que se precisan en el sur de Sudamérica. La provisión de los pronósticos climáticos regionales por parte de los Servicios Meteorológicos del sur de Sudamérica depende del conocimiento y la posibilidad de acceder a los pronósticos climáticos globales para generar esas herramientas.



En este sentido, el Centro Regional del Clima para el sur de Sudamérica (CRC-SAS) ha jugado un papel fundamental para convertir el conocimiento generado por las instituciones científicas de la región sobre la predictibilidad y predicción regional del clima en productos operativos de predicción de las variables claves, como la lluvia y la temperatura, disponibles en forma abierta y en tiempo real.

La predictibilidad potencial, tanto de la lluvia como la temperatura en escalas estacionales en Sudamérica, es generalmente máxima en las regiones tropicales, principalmente por la influencia oceánica, y disminuye hacia los polos. Esto ocurre en todas las regiones del planeta, aunque en Sudamérica se destaca que tanto el SESA como la región de los Andes extratropicales exhiben niveles relativamente altos de predictibilidad dependiendo de la estación. La fuente de estos niveles de predictibilidad se debe principalmente a la influencia del patrón ENOS.

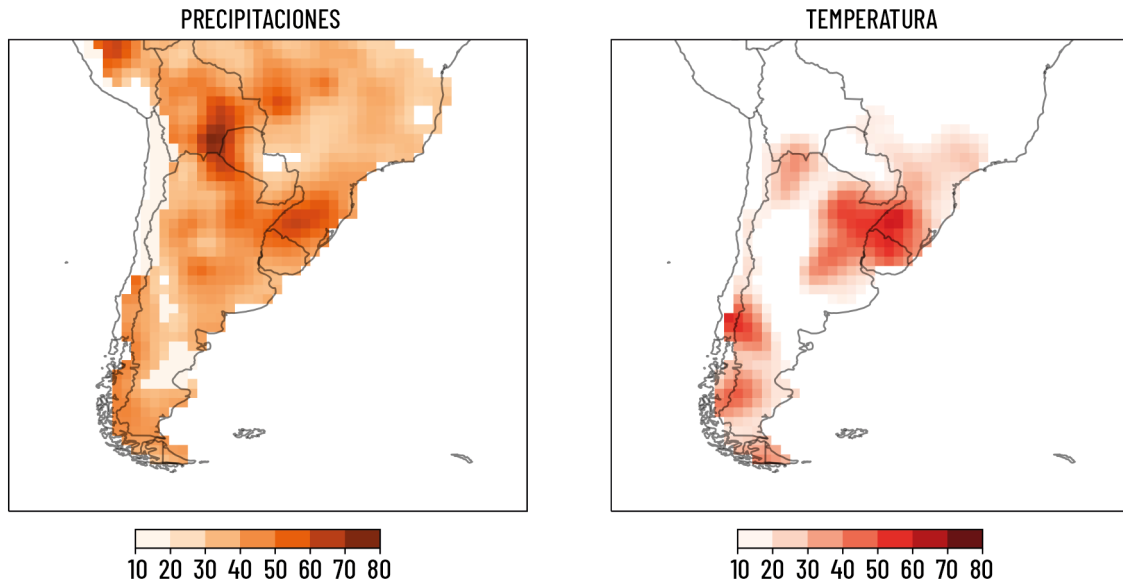


Predictibilidad potencial de la lluvia basada en un conjunto de modelos del "North American Multimodel Project" (NMME) y representada por trimestres del año (figura adaptada de Andrian et al., 2022).

Los pronósticos proporcionados por el North American Multimodel Project (NMME) fueron entonces calibrados con observaciones locales y combinados para producir pronósticos probabilísticos de lluvia y temperatura confiables sobre Sudamérica. Recientemente, previsiones climáticas estacionales para la precipitación acumulada y la temperatura media están disponibles periódicamente en el portal del [CRC-SAS](https://www.crc-sas.org/). La información es provista en forma de probabilidades asociadas a tres categorías: "superior a lo normal", "normal" e "inferior a lo normal", definidas en función de los terciles de la distribución de la variable.

Este tipo de productos no solo ha incrementado la información para los tomadores de decisión de la región, sino que también facilitan el desarrollo de productos de predicción estacional de sequías. Por ejemplo, productos de pronósticos probabilísticos de lluvia y temperatura considerando otras categorías más relevantes para evaluar las sequías, como condiciones extremadamente secas y extremadamente cálidas (como lo muestra la siguiente figura), serán provistos por el SISA en 2023.

Otra estrategia que ha mostrado resultados promisorios es combinar las predicciones estacionales de lluvia con datos de lluvia observada para producir predicciones estacionales de SPI.



Probabilidad de que el trimestre diciembre-enero-febrero de 2023 sea (izquierda) extremadamente seco –representado como la probabilidad de que la lluvia no supere el percentil 20- y (derecha) extremadamente cálido –representado como la probabilidad de que la temperatura del aire en superficie supere el percentil 80- a partir de las condiciones observadas en noviembre 2022. Productos basados en pronósticos del conjunto NMME, calibrados con observaciones locales (figura adaptada de Osman et al., 2021).

Si bien la escala estacional es la que más frecuentemente se utiliza para desarrollar una predicción o perspectiva de las condiciones futuras de las sequías, la evaluación de su panorama en el término de días o un par de semanas puede ser información valiosa para algunos sectores socioeconómicos, como el agropecuario. En particular, este tipo de pronósticos con una, dos o tres semanas de antelación resulta en valiosa información para anticipar el desarrollo y evolución de las llamadas “sequías repentinas”, que pueden causar grandes e inesperados impactos ambientales y socioeconómicos.

A partir de investigaciones realizadas en la región, SISA planea desarrollar herramientas de predicción en estas escalas, no solo de variables climáticas sino también para contribuir a avanzar en la predicción hidrológica y de condiciones de suelo.



CAMBIOS OBSERVADOS Y PROYECTADOS A FUTURO DE LAS SEQUIAS

El clima global ha venido cambiando desde hace décadas, según concluyen los reportes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). No solo ha aumentado la temperatura media global, sino que los cambios climáticos recientes son evidentes en todas las regiones del planeta de múltiples formas.

Según concluyen los reportes del 6º ciclo del IPCC, resulta indiscutible la influencia humana en estos cambios, que aumentarán a futuro. Esta influencia está siendo especialmente evidente en la frecuencia y/o intensidad de los fenómenos meteorológicos o climáticos extremos, incluyendo las olas de calor y las sequías. El incremento en la frecuencia y/o severidad de las sequías, en combinación con el de las olas de calor, tiene un impacto negativo en las personas, sus actividades y los ecosistemas. Asimismo, la influencia humana está provocando un aumento de la combinación de condiciones cálidas, secas y ventosas, que conducen a incendios forestales. Se concluye que, si no se reducen de manera rápida, inmediata y en gran escala las emisiones de los gases de efecto invernadero, estos cambios se incrementarán.

Dentro de los cambios que el clima del sur de Sudamérica está experimentando y experimentará a futuro, se ha identificado la tendencia al secamiento en la región andina que comparten el centro de Chile y Argentina. Este déficit de lluvia y caudales, que se inició alrededor de 2010 y que discutimos previamente, fue al menos en parte ya atribuido tanto al incremento de los gases de efecto invernadero como al agotamiento del ozono. Inclusive se ha demostrado que estos eventos de sequía extrema en el sudoeste de Sudamérica son inusuales en los últimos 600 años. Existe para esta región confianza media y alta en que continuarán incrementándose a futuro las condiciones de déficit de precipitación y la disminución del volumen de los glaciares, así como el aumento de las olas de calor y las condiciones que dan lugar a incendios.

Por otra parte, la región del SESA ha experimentado en las últimas décadas una tendencia positiva significativa en la lluvia media, en los eventos de lluvia extrema y en las inundaciones. Hay una baja confianza en que las sequías en esta región hayan cambiado su frecuencia o severidad debido a la influencia humana sobre el clima, pero no es posible descartar totalmente estos cambios en escenarios futuros. Asimismo, existen evidencias de que en eventos de sequía ocurridos en la región, como el de 2011-2012, la influencia humana ha incrementado la evapotranspiración y la temperatura. Esto pone en un riesgo mayor de sequías a la región aún sin cambios atribuibles en la lluvia.

Finalmente, cabe mencionar que el impacto del cambio climático antropogénico se combina con el impacto de las actividades humanas sobre la biodiversidad, los suelos y los recursos hídricos, aumentando las amenazas a los ecosistemas y personas tanto en la actualidad como en el futuro. Si bien las acciones de adaptación –que incluyen el fortalecimiento de los sistemas de alerta temprana– han aumentado, el progreso es desigual y no se están implementando lo suficientemente rápido. Por lo que, además de acelerar las acciones de mitigación, incrementar las de adaptación es también urgente y necesario.



REFLEXIONES FINALES

Las causas y evolución de las sequías de la región sur de Sudamérica son diversas, y pueden combinarse entre ellas dando lugar a un abanico de diferentes situaciones. Afortunadamente, este conocimiento se está traduciendo en la elaboración de diferentes productos de monitoreo y pronóstico –como los que desarrolla el SISSA– que apuntalan la toma de decisiones necesarias para reducir el impacto de las sequías.

Si bien el monitoreo de las sequías se puede realizar a través de diferentes indicadores que se pueden orientar o ajustar a las necesidades específicas de cada sector, el pronóstico de las mismas, como se discutió previamente, experimenta las mismas barreras que tiene el pronóstico climático. Estas barreras están asociadas, por un lado, con la naturaleza en parte caótica del clima y, por el otro, con las limitaciones que los modelos climáticos y sistemas de observación tienen todavía para describir algunos procesos regionales y locales.

Asimismo, los cambios futuros en la ocurrencia y magnitud de las sequías por la influencia humana en el clima dependen de los escenarios socioeconómicos futuros de emisiones de gases de efecto invernadero, así como del uso futuro de la tierra. En suma, este conocimiento incrementado pero que incluye un cierto grado de incertidumbre, plantea un desafío al diseño e implementación, tanto de sistemas de monitoreo y pronóstico de sequías, como de los planes de acción locales, regionales y nacionales para enfrentarlas.

ACERCA DEL SISSA

El Centro Regional del Clima para el sur de América del Sur (CRC-SAS), a través de su Proyecto SISSA (Sistema de Información sobre Sequías para el sur de Sudamérica), tiene como objetivos contribuir a reducir los considerables impactos económicos, sociales y ambientales de la sequía sobre la producción agropecuaria, generación hidroeléctrica, y navegación fluvial en el sur de Sudamérica, junto con mejoras en: (i) las capacidades institucionales regionales, (ii) la planificación y preparación, y (iii) la gobernanza de la gestión de riesgos.

A través de mapas y visualizaciones útiles para monitorear el estado actual e histórico de la sequía, la información que suministra es de vital importancia para anticipar los impactos esperables en sectores económicos y comunidades. Además, el SISSA fomenta la planificación y preparación anterior al evento de sequía, de manera de mitigar sus daños, aumentar la resiliencia y reducir la vulnerabilidad.

En la iniciativa participan servicios y direcciones de meteorología, agencias gubernamentales, instituciones académicas, organizaciones no gubernamentales y el sector privado de los seis países miembros del CRC-SAS: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay. El intercambio de experiencias y capacidades resulta un componente clave destinado a enriquecer y fortalecer las acciones que se llevan a cabo tanto a nivel país como en toda la región sur de Sudamérica.



REFERENCIAS

- Andrian, L.G., Osman, M. and Vera, C.S, 2022:** Climate predictability on seasonal timescales over South America from the NMME models. *Clim Dyn.* <https://doi-org.insu.bib.cnrs.fr/10.1007/s00382-022-06506-8>
- Andrian, L. G., M. Osman, C. S. Vera, 2022:** Impactos del Dipolo de Océano Indico y su acción combinada con ENSO sobre el clima de SESA durante la primavera. Congreso Argentino de Meteorología (CONGREGMET), 7-12 Noviembre de 2022, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales/UBA, Buenos Aires, Argentina.
- Cai, W., McPhaden, M.J., Grimm, A.M. et al., 2020:** Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nat Rev Earth Environ* 1, 215–231 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>
- Climate Change 2021:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.
- Climate Change 2022:** Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shunkla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J. (2015).** The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* vol. 2. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
- Garreaud, R., J. P. Boisier, R. Rondanelli, A. Montecinos, H. Sepúlveda, D. Veloso-Aguila, 2020:** **The Central Chile Mega Drought (2010–2018):** A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40, 1, 421–439, doi: 10.1002/joc.6219
- González, M. H., F. Losano and S. Eslamian, 2021** “Rainwater Harvesting Reduction Impact on Hydro-Electric Energy in Argentina”, cap 17 en *Handbook of Water Harvesting and conservation*, ISBN: 978-1-119-47895-9, ISBN print 9781119775980, Editor: S. Eslamian, 1100p. Ed. John Wiley & Sons, NY, USA.
- Marengo, J.A., Cunha, A.P., Cuartas, L.A., Deusdará Leal, K.R., Broedel, E., Seluchi, M.E., Michelin, C.M., De Praga Baião, C.F., Chuchón Ângulo, E., Almeida, E.K., 2021.** **Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020:** Characterization, Causes, and Impacts. *Frontiers in Water* 3, 13.



- Naumann, G., Podestá, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera, D., Arias Muñoz, C., Barbosa, P., Cammalleri, C., Chamorro, L., Cuartas, A., de Jager, A., Escobar, C., Hidalgo, C., Leal de Moraes, O., McCormick N., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., Seluchi, M., Skansi, M. M., Spinoni, J., Toreti., A. The 2019-2021 extreme drought episode in La Plata Basin, EUR 30833 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-41898-6 (online), doi:10.2760/773 (online), JRC126508.
- Naumann, G., Podestá, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera D., Acosta Navarro, J., Arias Muñoz, C., Barbosa, P., Cammalleri, C., Cuartas, A., de Estrada, M., de Felice M., de Jager, A., Escobar, C., Fioravanti, G., Giordano, Harst Essenfelder, A., L., Hidalgo, C., Leal de Moraes, O., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, Osman, M., Rossi L., M., Seluchi, M., Skansi, M. M., Spennemann, P. Spinoni, J., Toreti., A, Vera, C., Extreme and long-term drought in the La Plata Basin: event evolution and impact assessment until September 2022, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/62557, JRC132245.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Asociación Mundial para el Agua (2016):** Manual de indicadores e índices de sequía (M. Svoboda y B.A. Fuchs). Programa de gestión integrada de sequías, Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías. Ginebra.
- Osman, M. and C. Vera, 2017:** Climate predictability and prediction skill on seasonal time scales over South America from CHFP models. *Climate Dynamics*, 49: 2365. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3444-5>.
- Osman, M., C. A. S. Coelho, C. S. Vera, 2021:** Calibration and combination of seasonal precipitation forecasts over South America using Ensemble Regression. *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05845-2>
- Penalba, O.C., J. A. Rivera, 2016:** Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America – emphasis in regional drought occurrences. *Adv. Geosci.*, 42, 1-14, doi:10.5194/adgeo-42-1-2016
- Rivera J. A., J. M. Infanti, R., Kumar, J. N. Mutemi, 2021:** Challenges of Hydrological Drought Monitoring and Prediction. *Frontiers in Water*, 3, doi: 10.3389/frwa.2021.750311.
- Rivera, J., S. Otta, C. Lauro, N. Zazulie, 2021:** A Decade of Hydrological Drought in Central-Western Argentina. *Frontiers in Water*, 3, doi: 10.3389/frwa.2021.640544.
- Thorntwaite, C. W. (1948).** An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.
- van Gardener, L. and J. Mindlin, 2022:** A storyline attribution of the 2011/2012 drought in Southeastern South America. *Weather – June 2022*, Vol. 77, No. 6. <https://doi.org/10.1002/wea.4185>
- Vera, C.S., and M. Osman, 2018:** Activity of the Southern Annular Mode during 2015–2016 El Niño event and its impact on Southern Hemisphere climate anomalies. *Int. J. Climatol.*, 38, S1, e1288–e1295, <https://doi.org/10.1002/joc.5419>.