

CLIMATOLOGÍA DE SEQUÍAS DE RÁPIDO DESARROLLO EN LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA

Lucas L. Kucheruk¹, Pablo C. Spennemann¹, Gustavo Naumann², Juan A. Rivera³

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

²International Center for Environmental Monitoring (CIMA) Research Foundation, Savona, Italy

³Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA)

(Manuscrito recibido el 20 de diciembre de 2022, en su versión final el 29 de marzo de 2023)

RESUMEN

La sequía es uno de los fenómenos meteorológicos cuyo inicio generalmente se establece en forma lenta y está relacionado principalmente con un déficit de precipitación. Sin embargo, existen eventos de sequía que, a diferencia de las sequías ordinarias, su intensificación ocurre en lapsos menores a un mes, donde el déficit de precipitación se combina con altas temperaturas, mayor intensidad de viento y/o menor humedad atmosférica, lo cual genera una rápida disminución de la humedad del suelo a causa de un aumento sustancial en la evapotranspiración. A estos eventos se los denomina Sequías de Rápido Desarrollo (SRD). Este estudio realiza la primera climatología de SRD sobre la región de la Pampa Húmeda, mediante el uso de simulaciones de humedad del suelo del ERA-5 Land en 14 estaciones meteorológicas de la región. Se analizó la ocurrencia y características de estos eventos utilizando un índice de SRD que considera tanto su intensificación como su severidad. A lo largo del período 1981-2020 se observa que estos eventos ocurren generalmente durante el período octubre-mayo, favorecidas por el incremento estacional de la evapotranspiración. La duración total de cada SRD posterior al período de intensificación fue muy variable, durando desde algunas semanas hasta varios meses, siendo mayor la duración en las estaciones con menor cantidad de eventos. Las SRD representan un porcentaje significativo del total de eventos de sequía, generalmente mayor al 40 % de los eventos de sequías ordinarias totales. Así mismo, se observa un aumento significativo en la frecuencia de SRD en el período 2001-2020 respecto al período 1981-2000. Se identificó que la sequía 2017-2018, que afectó a la Pampa Húmeda, fue en 7 de las 14 estaciones analizadas la SRD de mayor severidad registrada en todo el período. Esta sequía, generó importantes pérdidas económicas, dado que el período de intensificación y su posterior evolución a sequía ordinaria coincidieron con el período crítico del maíz.

Palabras clave: sequías, caracterización, humedad del suelo..

FLASH DROUGHT CLIMATOLOGY OVER THE ARGENTINE HUMID PAMPAS

ABSTRACT

Drought is one of the meteorological events whose onset is generally slow and mainly related to a precipitation deficit. However, there are drought events that, unlike ordinary droughts, intensify in periods of less than one month, where the precipitation deficit is combined with high temperatures, higher wind intensity and/or lower atmospheric humidity, which generates a rapid decrease in soil moisture due to a substantial increase in evapotranspiration. These events are called Flash Droughts (FD). This study performs the first FD climatology over the Humid Pampas using ERA-5 Land soil moisture simulations at 14 meteorological stations in the region. The occurrence and main characteristics of these events were analysed using an FD index that considers both their intensification and severity. During the period 1981-2020, these events generally occurred during the November-May period, favoured by the seasonal increase in evapotranspiration. The duration of each SRD after the intensification period varied widely, lasting from a few weeks to several months, with a longer duration in seasons with fewer events. The FD represent a significant proportion of the total number of drought events, generally more than 40 % of the total number of ordinary drought events. Likewise, a significant increase in the frequency of FD was observed in the period 2001-2020 compared to the period 1981-2000. The 2017-2018 drought, that affected the Humid Pampa, was identified as a FD. This event was the most severe FD recorded between 1981-2020 period across 7 out of 14 stations resulting in significant economic losses as it coincided with the critical period for corn.

Keywords: droughts, characterization, soil moisture.

1. INTRODUCCIÓN

La sequía es uno de los fenómenos meteorológicos de mayor impacto socioeconómico. Generalmente, el inicio de las sequías se establece en forma lenta y está relacionado principalmente con un déficit de precipitación. En Argentina, la mayor frecuencia de eventos de sequías se observa en las regiones de la Pampa Húmeda y del noreste (Cavalcanti y otros, 2015), las cuales generalmente ocurren durante la primavera y el verano (Sgroi y otros, 2021). La región de la Pampa Húmeda Argentina es una región de gran importancia agrícola, donde la actividad agropecuaria se desarrolla mayormente en condiciones de secano, lo que hace a esta actividad particularmente vulnerable a los efectos de las sequías. En el contexto de los

últimos 70 años, los eventos de sequía más severos que afectaron la región se registraron entre las décadas de 1960 y 1990, aunque eventos recientes en los años 2006, 2008-2009, 2011 y 2017-2018 pusieron de manifiesto una reversión en las tendencias de precipitación hacia condiciones más secas (Rivera y Penalba, 2014; Naumann y otros, 2019). Por ejemplo, la sequía que afectó a esta región durante los años 2017-2018 tuvo su mayor intensidad durante los meses de febrero y marzo de 2018, en coincidencia con el período crítico del maíz, lo cual generó pérdidas económicas asociadas a los cultivos de verano del orden de los US\$1500 millones (GAR, 2021).

Existen eventos de sequías en los cuales el déficit de precipitación se combina con elevadas temperaturas, mayor intensidad de viento y/o

menor humedad atmosférica, generando como consecuencia una rápida disminución de la humedad del suelo a causa de un aumento considerable en la evapotranspiración. A este tipo de eventos, cuando la intensificación sucede en lapsos menores a 1 mes, se los denomina Sequías de Rápido Desarrollo (SRD). Este tipo particular de eventos de sequía fue acuñado por primera vez en el trabajo de Svoboda y otros (2002). Sin embargo, no fue hasta el evento de una SRD en el 2012 en los Estados Unidos que la comunidad científica comenzó a estudiar en mayor detalle a este tipo de sequías, debido a que en períodos menores a dos meses regiones con condiciones de no sequía pasaron a estar en condiciones de sequía extrema. Esta SRD generó, en dicho período de tiempo, impactos en las regiones de importancia agrícola, con pérdidas de 30 billones de dólares (Otkin y otros, 2018).

Si bien no hay actualmente un consenso sobre qué variables y qué enfoque metodológico es el más apropiado para analizar las SRD, en la revisión realizada por Lisonbee y otros (2021) se destacan los trabajos que utilizan la humedad del suelo, la precipitación, la evapotranspiración y la temperatura, en escalas sub-mensuales, generalmente en escala pentádica. Diversas investigaciones emplean índices que se construyen a partir de considerar una o más variables, las cuales pueden surgir de combinar observaciones y simulaciones numéricas. Por ejemplo, Noguera y otros (2020) utilizan como indicador el Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI, Vicente-Serrano y otros, 2010), que se construye a partir de datos de precipitación y de evapotranspiración. Por otro lado, Anderson y otros (2016) emplean el índice Evaporative Stress Index (ESI), el cual combina en un modelo de suelo estimaciones satelitales del Índice de Área Foliar y de temperatura superficial para simular la evapotranspiración. Muchos de estos trabajos se centran en la intensificación de estos eventos, pero únicamente el trabajo de Otkin y otros (2021), a la fecha de la realización de este trabajo,

combina explícitamente tanto la rápida tasa de intensificación de una SRD como la severidad de la sequía resultante en un índice denominado Flash Drought Intensity Index (FDII), siendo dicho índice capaz de capturar ambas dimensiones de una SRD.

El trabajo de Otkin y otros (2021), utiliza simulaciones de humedad del suelo del modelo Noah en el espesor 0-40 cm (Ek y otros, 2003) para analizar la frecuencia mensual de ocurrencia de SRD en Estados Unidos para el período 1979-2017. Los autores encuentran que las SRD ocurren durante el semestre cálido (abril-octubre) en buena parte del dominio. Y que la mayor frecuencia ocurre en el centro de Estados Unidos, con frecuencias que varían del 6% al 10% respecto al total de péntadas consideradas en el período de 38 años analizados (72 péntadas anuales en 38 años resulta en 2736 péntadas totales), resultado similar al encontrado por Christian y otros (2019).

En la actualidad existen pocos estudios de estas sequías con un foco regional en el sur de Sudamérica. Se puede mencionar, el trabajo de Anderson y otros (2016) que analiza el rol de un conjunto de índices para la detección temprana de algunos eventos de sequías agrícolas y SRD. Si bien el trabajo no se centra en caracterizar climatológicamente las SRD, documenta la ocurrencia de estas en el sur de Brasil, en los estados de Paraná y Rio Grande del Sur en los años 2009 y 2012, así como también eventos de SRD entre los años 2010 y 2013 en el noreste del país en el estado de Bahía.

La mayoría de los trabajos sobre SRD poseen una perspectiva global o centrada en casos de estudio en el Hemisferio Norte. Christian y otros (2021) analizaron la ocurrencia y las tendencias a escala global de las SRD en base el índice Standardized Evaporative Stress Ratio (SESR), que representa el estrés evaporativo total del ambiente, construido a partir de datos de evapotranspiración y evapotranspiración potencial de reanálisis. Los autores encontraron que en el período 1980-2015, la incidencia

de eventos de SRD en la Pampa Húmeda fue entre un 5% y un 10% del total de las péntadas consideradas en el período de 35 años (72 péntadas anuales en 35 años resulta en 2520 péntadas totales). Qing y otros (2022) analizaron la frecuencia global de SRD considerando el período 2000-2020 empleando, por un lado, un criterio de rápida disminución de la humedad del suelo (por ejemplo, Otkin y otros, 2021) y por otro lado el criterio propuesto por Mo y Lettenmaier (2015) que condiciona a las SRD a que no superen las 2 péntadas de duración. Empleando distintos conjuntos de datos globales basados en simulaciones de evaporación y humedad del suelo documentaron la ocurrencia de SRD en distintas regiones del planeta, así como también en la Pampa Húmeda. Detectaron que la frecuencia de eventos era más baja al considerar el criterio de rápida intensificación respecto al criterio de la duración, el cual captura eventos de tan solo 1 péntada de duración. En la región de la Pampa Húmeda la frecuencia de eventos de SRD, respecto al número total de péntadas (72 péntadas anuales en 20 años resulta en 1440 péntadas totales), en las últimas dos décadas fue entre un 10% y un 20% utilizando el criterio de rápida intensificación, mientras que entre un 50% y un 70% utilizando el criterio de la duración.

Frente a la escasez de estudios de SRD en Sudamérica y en particular sobre la Argentina, el objetivo de este trabajo se enfoca en la realización de una climatología de SRD en base a simulaciones de humedad del suelo en 14 estaciones meteorológicas ubicadas en la región de la Pampa Húmeda. Para llevar a cabo su identificación, se emplea el criterio propuesto por Otkin y otros (2021), el cual permite analizar la intensidad y la severidad de las SRD. A su vez, se le suma una evaluación previa de las simulaciones de humedad del suelo para dar mayor robustez a los resultados. Este trabajo se estructura de la siguiente forma: en la sección 2 se describe la región de estudio, los datos utilizados y las metodologías empleadas; en la sección 3 se muestran los principales

resultados; mientras que en la sección 4 se discuten los principales resultados y se exponen las conclusiones de este trabajo.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. Región de estudio y simulaciones de humedad del suelo

La región de interés de esta investigación corresponde a la Pampa Húmeda, comprendida por las provincias de Santa Fe, Entre Ríos, centro y este de Córdoba y gran parte de la provincia de Buenos Aires (Figura 1). Esta es una de las principales regiones agrícolas del mundo, dónde se obtiene gran parte de la producción nacional de cereales, soja, maíz y ganadería (Scian y otros, 2006). Las precipitaciones anuales en esta región varían entre los 600 mm al oeste hasta los 1400 mm al este, lo cual denota un marcado gradiente zonal (Spennemann y otros, 2015). Asimismo, la región es susceptible a la variabilidad interanual de las precipitaciones (Krepper y otros, 1989), la cual se asocia principalmente al fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), dando como resultado la ocurrencia de eventos de precipitaciones extremas y sequías de forma periódica (Penalba y Rivera, 2016).

Para este trabajo se utilizaron variables meteorológicas observadas y simuladas en 14 estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para la región correspondiente a la Pampa Húmeda (Figura 1) para el período 1981-2020. Estas estaciones son representativas de las características climáticas de la región de estudio y se encuentran a lo largo de la zona de mayor frecuencia de ocurrencia de sequías meteorológicas en los últimos 50 años (Cavalcanti y otros, 2015). Cabe destacar además la calidad y disponibilidad de estos datos de precipitación y evapotranspiración, los cuales fueron obtenidos a partir de la base de datos del Sistema de Información sobre Sequías para el Sur de Sudamérica (SISSA) como parte del Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur (CRC-SAS).

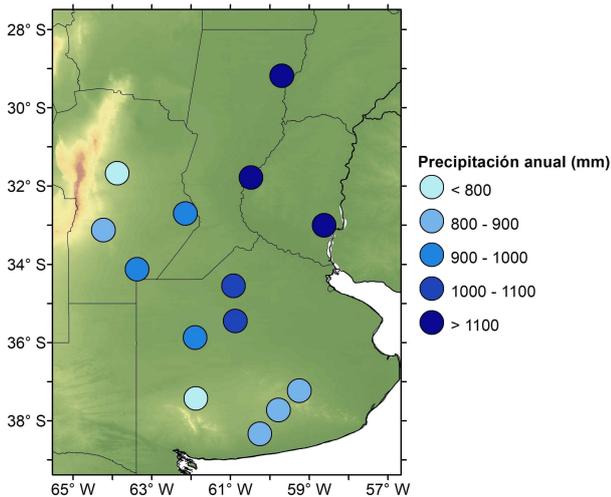


Figura 1: Área de estudio y ubicación de las localidades analizadas en el trabajo. Los colores de los círculos indican la precipitación media anual acumulada para el período 1981-2020.

Las simulaciones corresponden a datos horarios de humedad del suelo del modelo HTESSEL ($0,1^\circ \times 0,1^\circ$, Balsamo y otros, 2009) utilizado en el reanálisis ERA-5 Land (Hersbach y otros, 2020; Muñoz Sabater, 2019) correspondientes al mismo período. Las simulaciones de humedad del suelo, expresadas como lámina de agua (mm), corresponden a cuatro espesores de suelo (espesor 1: 0-7 cm, espesor 2: 7-28 cm, espesor 3: 28-100 cm y espesor 4: 100-189 cm). Este modelo considera hasta seis tipos de vegetación y presenta esquemas de infiltración y escorrentía que dependen de la textura del suelo y la orografía. En lo que respecta a los tipos de vegetación considerada por el modelo, se clasifican en vegetación alta y vegetación baja. La profundidad de las raíces de la vegetación alta supera la profundidad del espesor 3 (es decir, se ubican debajo del primer metro de suelo) y la profundidad de las raíces de la vegetación baja está contenida en el tercer espesor (entre los 28 y los 100 cm). En este trabajo se decidió trabajar con los primeros tres espesores debido a que esto permite considerar la profundidad de las raíces de la vegetación en la región de estudio. El espesor más profundo del modelo (100-289 cm) no se tuvo en cuenta,

dado que en general presenta variabilidades de humedad del suelo de más baja frecuencia a las que se enfoca este trabajo (ver Spennemann, 2015).

Debido a la falta de observaciones de humedad del suelo en la región, para analizar la representatividad o consistencia física de las simulaciones del ERA-5 Land se calcularon las correlaciones de Pearson entre las anomalías mensuales estandarizadas de humedad del suelo y el índice Standardized Precipitation Index (SPI, McKee y otros, 1993) y el SPEI en escala de 3 meses (SPI-3 y SPEI-3), los cuales son comúnmente utilizados como estimadores indirectos de la humedad del suelo (Spennemann y otros, 2015). Las anomalías mensuales de humedad del suelo se calcularon a partir de los datos mensuales de humedad del suelo del ERA-5 Land, con el objetivo de identificar períodos húmedos y secos, y se obtuvieron para cada espesor disponible y para diferentes combinaciones de estos. Los espesores utilizados fueron los espesores 1, 2 y 3, la combinación entre el espesor 1 y 2 (0-28 cm), la combinación entre el espesor 2 y 3 (7-100 cm), y la combinación entre los tres espesores (0-100 cm).

A fin de evaluar las condiciones regionales de las SRD, las estaciones se agruparon en base a la metodología de correlación espacial (Wilks, 2006). De acuerdo con esto, cada grupo se conforma de aquellas localidades donde las correlaciones de humedad de suelo son mayores a un umbral de $r = 0,53$, el cual resulta significativo al 95%. Esto permitió obtener 3 grupos de estaciones: el grupo 1 contiene a las estaciones ubicadas en las provincias de Santa Fe y Entre Ríos; el grupo 2 abarca las estaciones ubicadas en Córdoba y norte de Buenos Aires; y el grupo 3, que considera las estaciones ubicadas al sur de 35°S .

2.2. Índice de Sequía de Rápido Desarrollo

Las simulaciones horarias de humedad del suelo, para los puntos más cercanos a cada una de las

14 estaciones meteorológicas, se convirtieron en promedios pentádicos y luego se calcularon los percentiles. El criterio considerado para el cálculo de las péntadas establece que para cada mes se obtienen 6 datos que contienen los promedios por péntadas sumando en total 72 promedios/registros anuales. En cada mes, los 5 primeros promedios contienen 5 días, mientras que la sexta péntada contiene una longitud variable, desde los días 26 hasta el final del mes. Este criterio es empleado actualmente por el SISSA para la determinación de péntadas de diversas variables climáticas.

En base al criterio de Otkin y otros (2021), para que una sequía sea considerada como SRD debe satisfacer una condición donde el percentil de humedad del suelo esté por debajo del percentil 20 durante al menos 4 péntadas consecutivas. Además, debe responder a una caída de 15 percentiles de humedad del suelo en el período comprendido entre el inicio de la sequía y la cuarta péntada previa al inicio de dicha sequía. Por otro lado, se definió a una sequía como sequía ordinaria si solamente cumplía la primera condición mencionada.

El índice Flash Drought Intensity Index (FDII), definido en el trabajo de Otkin y otros (2021), es un índice adimensional que representa la intensidad y severidad de las SRD, es construido a partir del producto de dos términos, uno de los cuales mide la tasa de intensificación de la SRD, mientras que el otro captura la severidad de la SRD. El término que mide la tasa de intensificación de una SRD (FD_INT) para una péntada determinada se muestra en la ecuación 1, donde se puede observar que depende de una constante que representa la inversa de la tasa de intensificación mínima de referencia, donde ΔPER_{BASE} es 15 y ΔT_{BASE} es 4; y de la tasa de intensificación máxima observada ($\Delta PER_{OBS}/\Delta T_{OBS}$). La intensificación máxima se calculó buscando secuencialmente la tasa de intensificación máxima que ocurre durante períodos de tiempo que van desde las 2 hasta las 10 péntadas previas al inicio de la sequía.

$$FD_INT = \left(\frac{\Delta PER_{BASE}}{\Delta T_{BASE}} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta PER_{OBS}}{\Delta T_{OBS}} \right) \quad (1)$$

El término de severidad (DRO_SEV) se calculó considerando el período comprendido entre 244 el final de la etapa de intensificación de cada SRD y las 18 péntadas posteriores, como se 245 aprecia en la ecuación 2.

$$DRO_SEV = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} (DRO_{BASE} - DRO_{OBS(n)}) \quad (2)$$

donde n_p es el número de péntadas consideradas en el cálculo (valor fijo $n_p=18$). El valor de 249 n_p se determina debido a que las SRD son un fenómeno subestacional. $\Delta DRO_{OBS(n)}$ es el percentil observado para la péntada, y ΔPER_{BASE} es el umbral del percentil de referencia utilizado para representar el inicio de las condiciones de sequía, siendo $\Delta PER_{BASE} = 20$. Si para una péntada $\Delta DRO_{OBS(n)} > \Delta PER_{BASE}$ el aporte de esa péntada en la sumatoria es cero. Una vez calculados ambos términos, se procede a calcular el índice FDII como el producto entre ambos, como se muestra en la ecuación 3

$$FDII = FD_INT \cdot DRO_SEV \quad (3)$$

En la figura 2 se muestra a modo de ejemplo una situación teórica de SRD identificada por los índices de intensidad y severidad. Se puede apreciar que, en este evento idealizado, la máxima intensificación ocurrió nueve péntadas anteriores al comienzo de la SRD. La caída de humedad del suelo en ese período fue de 58 percentiles. Luego del período de inicio de la sequía, la misma se mantuvo por debajo del percentil 20 unas 10 péntadas más. El término de DRO_SEV se calculó para las 18 péntadas posteriores al inicio de la sequía. Y como se definió antes, las péntadas que presentaron percentiles mayores a 20, dentro del período de 18 péntadas, se les asignó un valor de cero en la sumatoria de la ecuación 2.

En este trabajo, se consideró que una SRD llegaba a su fin cuando luego del período

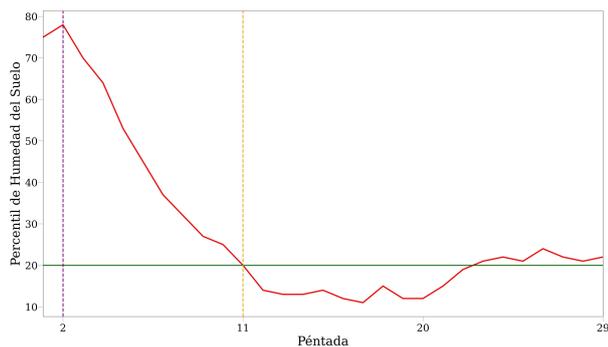


Figura 2: Criterio de Otkin y otros (2021) para el cálculo de FDII durante un evento teórico de SRD. El período de SRD comprende las 18 péntadas posteriores al inicio de la misma. Entre la línea violeta punteada y la línea naranja punteada se halla el período de intensificación máxima de las SRD, mientras que a la derecha de la línea naranja se halla el período en el que se calcula el término DRO_SEV (ver ec. 2). La línea naranja indica el inicio de la SRD, mientras que la línea violeta indica en que péntada comenzó el máximo período de intensificación de la SRD.

seco había como mínimo cuatro péntadas consecutivas de humedad del suelo por encima del percentil 20. Si el período seco se extendía durante más de 18 péntadas luego de la finalización del período de intensificación, se consideró que la SRD evolucionó a una sequía ordinaria, ya que a partir de esa péntada se consideró que la rápida intensificación deja de tener impacto en la evolución de la sequía.

3. RESULTADOS

3.1. Evaluación mensual de humedad del suelo del producto ERA-5 Land

En la figura 3 se muestran las correlaciones entre los índices SPEI-3 y SPI-3 en las estaciones meteorológicas consideradas y las anomalías mensuales estandarizadas de humedad del suelo en los distintos espesores considerados para los píxeles correspondientes a la ubicación de las estaciones meteorológicas. Se dejó de lado la estación Benito Juárez por faltante de datos

para la obtención de los índices SPI-3 y SPEI-3. En todos los casos las correlaciones resultaron estadísticamente significativas ($p < 0.001$). Por otro lado, también se muestran las correlaciones medias entre las anomalías de humedad del suelo y entre los índices SPEI-3 y SPI-3 respectivamente. Para ambos cálculos, el espesor 3 es el que presentó menor correlación media. El espesor de mayor correlación, para ambos cálculos fue el espesor 2, que presentó un valor medio de correlación idéntico a la suma de los espesores 1 y 2 (Figura 3). Mientras que el valor medio de correlación del espesor 0-100 cm para ambos índices, mostró también un buen acuerdo, con valores de $r = 0,61$ para el índice SPEI-3 y $r = 0,55$ para el índice SPI-3.

Dado que los resultados entre las correlaciones de ambos índices fueron similares, se realizó el análisis por regiones empleando la correlación con el índice SPEI-3, ya que este no solamente considera a la precipitación, sino que también toma en cuenta la evapotranspiración, representando así un balance hídrico simple. En la figura 3 se puede apreciar que las correlaciones más bajas entre las anomalías de humedad del suelo y el SPEI3 se obtuvieron en las estaciones de Marcos Juárez y Río Cuarto, ubicadas al sur de la Provincia de Córdoba, y en las estaciones de Nueve de Julio y Junín, ubicadas al norte de la Provincia de Buenos Aires. Las correlaciones más altas se observaron en las tres estaciones ubicadas más al sur: Tandil, Coronel Suárez y Tres Arroyos, junto a la estación Gualaguaychú, que está en la Provincia de Entre Ríos y a la estación de Pilar, en la Provincia de Córdoba.

En base a los resultados obtenidos, y que el foco de las SRD está puesto en el potencial impacto en los cultivos, es que se decidió utilizar el espesor (0-100 cm) para analizar cómo las simulaciones mensuales de anomalías estandarizadas de humedad del suelo representan los períodos húmedos y secos, junto a las series del índice SPEI-3. En la figura 4 se pueden observar las series temporales de la estación de Junín, donde se observó la menor correlación, y la estación Tres Arroyos donde

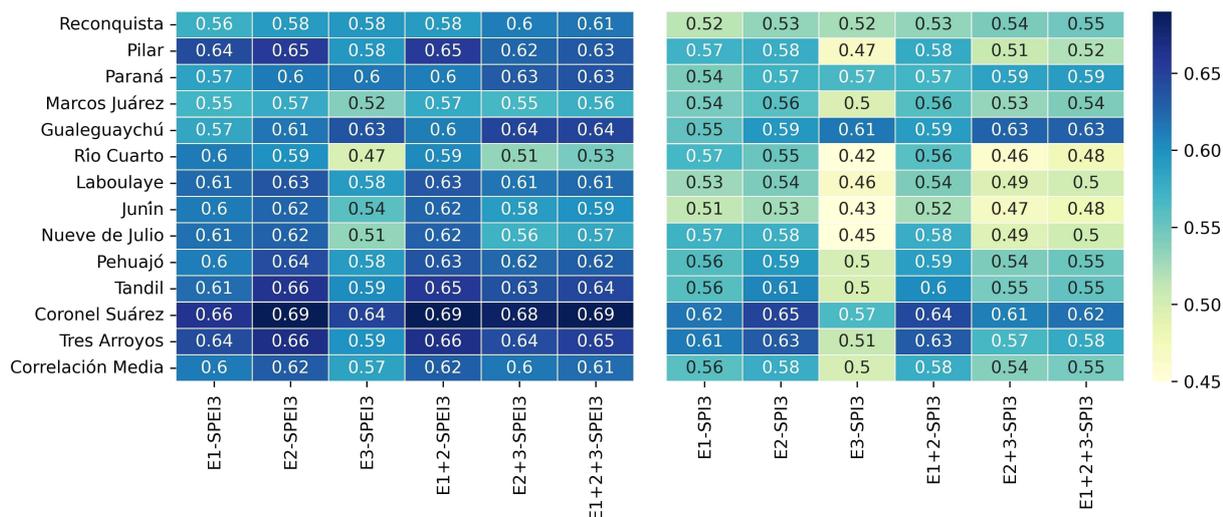


Figura 3: Correlación de Pearson entre las anomalías de humedad del suelo y los índices a) SPEI-3 y b) SPI-3 para las 14 estaciones meteorológicas, ordenadas de norte a sur, en el período 1981-2020. Las siglas E1, E2, E3, E1+2, E2+3 y E1+2+3 representan los espesores 1 (0-7 cm), 2 (7-28 cm) y 3 (28-100 cm), y la combinación de espesores 1 y 2, 2 y 3, y 1,2 y 3 respectivamente.

la correlación fue la mayor. Se puede apreciar que en general hay una buena consistencia entre ambas series de datos en representar los períodos secos y húmedos. Pero también, se pudo observar un desacople entre ambas variables únicamente en Junín durante los años 1984 y 1990 y en Tres Arroyos durante el año 1987.

3.2. Frecuencia de eventos de SRD en el período 1981-2020

En la tabla I se muestra la cantidad de eventos de SRD, en base a los percentiles de humedad del suelo del espesor 0-100 cm, obtenidos para cada localidad durante el período comprendido entre los años 1981 y 2020. Las estaciones que presentaron mayor cantidad de casos fueron Tres Arroyos y Reconquista (con 13 SRD), Nueve de Julio (12) y Benito Juárez (11). De las cuatro estaciones con mayor número de eventos, es importante destacar que, salvo Reconquista, que pertenece al grupo 1, el resto de las estaciones pertenecen al grupo 3. Por otra parte, las estaciones que presentaron menor cantidad de casos fueron Laboulaye (3 casos) y Río Cuarto (5). Es interesante destacar que

en 12 de las 14 estaciones analizadas las SRD corresponden a un porcentaje mayor o igual al 42% del total de los eventos de sequía. También es interesante notar que cuatro de las cinco estaciones donde se encontraron el menor número de SRD pertenecen a la Provincia de Córdoba (Grupo 2). Otro aspecto para destacar es que, a excepción de la estación Laboulaye, en el resto de las estaciones, el porcentaje de péntadas afectadas por una SRD respecto al total de péntadas, presentó valores de entre 4% y 11%.

Por otro lado, también se analizaron las frecuencias de eventos de SRD para los sub-períodos 1981-2000 y 2001-2020. En 12 de las 14 estaciones los eventos aumentaron en el último período, a excepción de las estaciones de Reconquista (en el período 1981-2000 se detectaron 8 eventos y en el período 2001-2020 se detectaron 5 eventos) y Pilar (donde en ambos períodos se observaron 4 eventos). El mayor incremento de eventos se pudo apreciar en las estaciones de Tres Arroyos (con 3 eventos en 1981-2000 y 10 eventos en 2001-2020) y en Coronel Suárez (con 2 eventos en 1981-2000 y 8 eventos en 2001-2020). Y en base a un

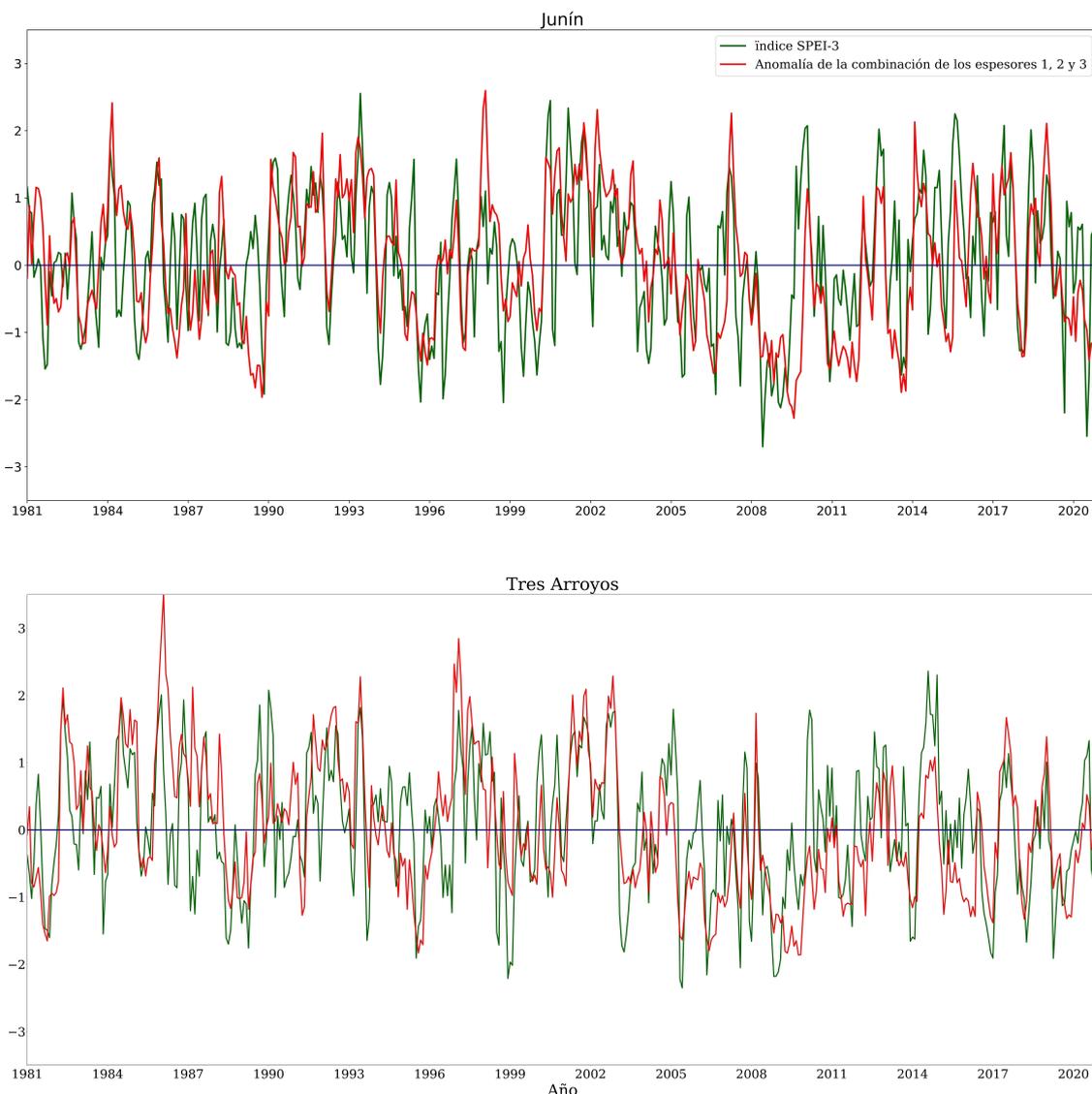


Figura 4: Series temporales de anomalías de humedad del suelo para la suma de espesores 1, 2 y 3 y del SPEI-3 para las estaciones de a) Junín y b) Tres Arroyos.

test T-Student, se determinó que hubo un aumento estadísticamente significativo ($p < 0,05$) en la frecuencia media, calculada sobre todas las estaciones, del sub-período 2001-2020 respecto a 1981-2000.

3.3. Índice FDII, Intensidad y severidad de las SRD

En la figura 5 se muestran los valores medios del índice FDII y del término DRO_SEV, así como el valor máximo y el mínimo para las 14 estaciones analizadas. Se observó que el valor medio del

índice FDII fue mayor en las estaciones Tandil (24,4) y Benito Juárez (23,2) pertenecientes al grupo 3. Los menores valores medios del índice FDII se observaron en Río Cuarto (7,9) y Laboulaye (5,4), pertenecientes al grupo 2. Para el resto de las estaciones, los valores medios se encontraron en el rango de 12,3 (Pehuajó) y 18,3 (Gualedaychú).

El valor medio del término FD_INT (no se muestra) fue similar para todas las estaciones, excepto para Río Cuarto y Laboulaye, donde los

Estación	Número total de eventos de SRD	Porcentaje de SRD respecto a sequías (%)	Frecuencia total de SRD respecto al número total de péntadas (en %)	Número de eventos de SRD en el período 1981-2000	Número de eventos de SRD en el período 2001-2020
Reconquista (G1)	13	56,5	7,0	8	5
Paraná (G1)	8	42,1	7,2	4	4
Gualeguaychú (G1)	10	47,6	6,0	3	7
Pilar (G2)	7	46,7	10,8	1	6
Marcos Juárez (G2)	8	44,4	10,1	2	6
Río Cuarto (G2)	5	29,4	6,7	1	4
Laboulaye (G2)	3	21,4	1,4	1	2
Junín (G2)	9	50,0	4,5	4	5
Nueve de Julio (G3)	12	57,1	7,0	5	7
Pehuajó (G3)	9	45,0	9,3	4	5
Tandil (G3)	10	58,8	5,7	3	7
Coronel Suárez (G3)	10	66,7	11,0	2	8
Benito Juárez (G3)	11	47,8	9,2	4	7
Tres Arroyos (G3)	13	59,1	6,2	3	10

Tabla I: Frecuencia de ocurrencia de SRD en el período 1981-2020, porcentaje de SRD respecto al total de las sequías ordinarias y eventos de SRD en los períodos 1981-2000 y 2001-2020. Entre paréntesis se indica la pertenencia a los diferentes grupos regionales.

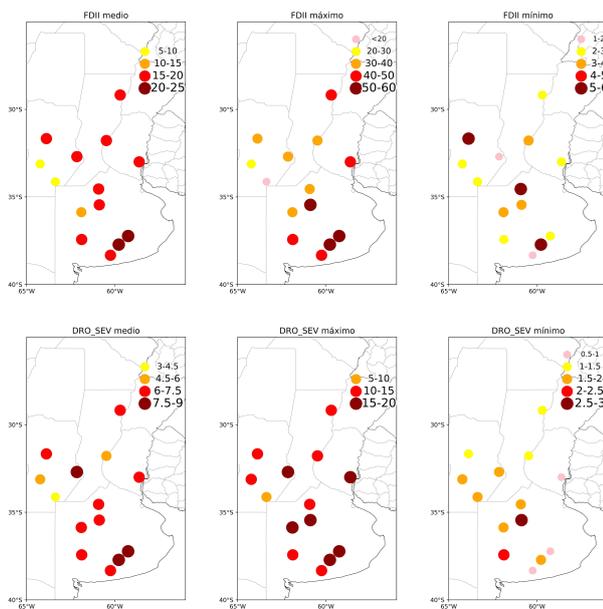


Figura 5: Distribución espacial de los valores de Índice FDII (ec. 3) a) medio, b) máximo y c) mínimo y término DRO_SEV (ec. 2) d) medio, e) máximo y f) mínimo en las 14 estaciones meteorológicas seleccionadas. Los umbrales corresponden a los cuartiles de los valores medios, máximos y mínimos del término DRO_SEV y del índice FDII.

valores medios fueron levemente inferiores (con valores de 1,6 y 2,0, a diferencia del resto de las estaciones donde tomaron valores mayores a 2,0).

Con respecto al valor medio de DRO_SEV se observaron diferencias dependiendo de la ubicación de las estaciones meteorológicas. En Río Cuarto, en Laboulaye y en Paraná se observaron los valores medios mínimos (con valores de 4,6, 3,0 y 5,7 respectivamente), y el máximo absoluto se observó en la estación de Marcos Juárez, con un valor medio de 8,2. En el resto de las estaciones meteorológicas no se observaron valores muy diferentes entre sí, aunque en las estaciones de Tandil y Benito Juárez se obtuvieron valores medios de 7,8; valor cercano al máximo obtenido en la estación de Marcos Juárez. En base a este análisis, se observó que el valor medio del índice FDII presentó características similares al término DRO_SEV y menor relación con el término FD_INT. Considerando la ecuación 3, donde FDII está pesado tanto por el término FD_INT y DRO_SEV, se observó que el valor de DRO_SEV fue dominante al momento de determinar el valor de FDII ya que los valores de DRO_SEV eran mayores y con mayor variabilidad que los valores de FD_INT.

En el panel central y derecho de la figura 5 se muestran el rango de los valores extremos del índice FDII y del término DRO_SEV. A partir de los resultados se obtuvieron valores de FD_INT extremos (no se muestran) que rondaron entre valores superiores a 1 y valores, en algunos casos, superiores a 4. Como el índice FD_INT está pesado por un término base definido para la intensificación de una SRD que es fijo y por el valor máximo de intensificación entre un intervalo de 2 a 10 péntadas (ecuación 1) sus valores no fluctúan demasiado en las diferentes sequías. En el caso de DRO_SEV (ecuación 2), como está definido por una sumatoria que solamente considera las péntadas con percentiles menores a 20, entonces su valor puede cambiar mucho de acuerdo con la cantidad de péntadas que cumplan dicha condición. En el caso del índice FDII (ecuación 3), su variación entre el valor máximo y el valor mínimo fue incluso mayor. Esto se refleja en los valores medios de la figura 5, donde se observó que la media de FD_INT era similar para todas las estaciones.

El máximo absoluto del índice FDII, entre todas las estaciones, se alcanzó en la estación de Benito Juárez, con un valor de 58,2. Mientras que el mínimo se alcanzó en Tres Arroyos, con un valor de 1,2. El máximo absoluto del término FD_INT se observó en las estaciones de Gualeguaychú, Junín y Tandil con un valor de 4,8. El mínimo se alcanzó en Nueve de Julio y Coronel Suárez con 1,0. Por último, el máximo absoluto del término de DRO_SEV se observó en Pehuajó con 17,6 y el mínimo en Tres Arroyos con un valor de 0,6.

En la tabla II se muestran las fechas de ocurrencia de SRD pertenecientes a los valores extremos de intensidad, los valores de severidad y del índice FDII, mostrados en la figura 5. A partir de esta tabla se determinó que los máximos de FD_INT y los máximos de DRO_SEV solo coincidieron en las estaciones de Río Cuarto y Coronel Suárez. Por otra parte, los mínimos de ambos términos sólo coincidieron en la estación de Coronel Suárez. Por lo tanto,

en general, la SRD con mayor intensificación no fue la más severa, y la sequía de menor intensificación no fue la menos severa.

Para las estaciones del grupo 1 correspondientes a la Provincia de Entre Ríos se observó que la SRD de mayor intensidad y de mayor índice FDII perteneció a la sequía del 2017-2018, una sequía que generó grandes pérdidas económicas en la región de la pampa húmeda (GAR, 2021). Las SRD de mayor severidad no coincidieron para esas dos estaciones debido a que en Paraná la SRD más severa ocurrió en 2020, mientras que en Gualeguaychú se dio en 2008. En Reconquista se observó que la sequía de mayor severidad fue la que presentó mayor magnitud en el índice FDII (ocurrió en 1995) y la SRD más intensa se tuvo lugar en el año 2003. En las tres estaciones del grupo 1 la SRD menos severa fue la de menor FDII y no coincidieron para ninguna estación, pero en las estaciones Paraná y Gualeguaychú ocurrieron en la década de 1980. Lo mismo sucedió para las SRD menos intensas ya que no solamente no coincidieron en fecha, sino que además en las tres estaciones ocurrieron en décadas diferentes.

De las cinco estaciones pertenecientes al grupo 2, en tres de ellas (Pilar, Laboulaye y Junín), la SRD más severa y de mayor FDII ocurrió en torno a la sequía del 2017-2018. Las SRD más intensas no coincidieron entre las distintas estaciones, excepto en Marcos Juárez y Río Cuarto (distanciadas en casi 300 kilómetros), donde la SRD más intensa se dio en el período 2010-2011. Respecto a las SRD menos severas, lo más destacable es que en Laboulaye y Marcos Juárez la SRD de menor severidad y de menor índice FDII ocurrió en torno a la sequía del 2017-2018, contrastando con el resto de las estaciones de la región. Por otra parte, en Laboulaye, de las dos SRD con valores mínimos de severidad, solo una de ellas correspondió a un mínimo en el índice FDII. Respecto a los valores mínimos de intensidad para las 5 estaciones del grupo corresponden a SRD diferentes, aunque se dieron generalmente en la década 2011-2020.

Estación	Fecha del máximo de DRO_SEV y del máximo de FDII	Fecha del máximo de FD_INT	Fecha del mínimo de DRO_SEV y del mínimo de FDII	Fecha del mínimo de FD_INT
Reconquista	4/10/1995	1/11/2003	01/03/1987	03/08/1996
Paraná	5/02/2020 (DRO_SEV) 4/11/2017 (FDII)	4/11/2017	01/05/2012	05/02/2020
Gualeguaychú	1/04/2008 (DRO_SEV) 3/11/2017 (FDII)	3/11/2017	01/09/1984	04/05/1988
Pilar	4/11/2017	02/02/2007	02/02/1988	05/01/2013
Marcos Juárez	05/02/1997	1/11/2010	6/11/2017	1/10/2019
Río Cuarto	01/01/2011	01/01/2011	04/03/1996	3/11/2008
Laboulaye	6/11/2017	4/10/2005	4/04/1989 (DRO_SEV y FDII) 4/10/2005 (DRO_SEV)	6/11/2017
Junín	06/01/2018	01/01/1989	06/04/2005	02/05/2006
Nueve de Julio	3/01/2018 (DRO_SEV) 2/02/2015 (FDII)	02/02/2015	1/02/1995 (DRO_SEV) 3/08/2020 (FDII)	03/08/2020
Pehuajó	3/01/2018 (DRO_SEV) 3/01/2009 (FDII)	05/02/2004	4/03/1991 (DRO_SEV) 1/01/2008 (FDII)	03/01/2018
Tandil	1/02/2018 (DRO_SEV) 5/05/2013 (FDII)	04/04/2005	06/02/1993	06/07/1983
Coronel Suárez	02/02/2018	02/02/2018	1/11/1988 (DRO_SEV) 5/09/2011 (FDII)	1/11/1988
Benito Juárez	03/04/2005	02/04/2011	04/03/1985	01/06/2013
Tres Arroyos	3/04/2005 (DRO_SEV) 5/03/2006 (FDII)	06/02/1995	05/04/2019	03/07/2007

Tabla II: Fecha de inicio de los eventos (formato péntada/mes/año) de SRD correspondientes a máximos y mínimos del índice FDII y los términos FD_INT y DRO_SEV. Cuando hay un solo valor en los campos de DRO_SEV y FDII significa que ambos valores coinciden. Cuando no lo hacen se especifican entre paréntesis.

De las seis estaciones pertenecientes al grupo 3 se observó que en cuatro de esas estaciones la SRD más severa ocurrió en torno a la sequía del 2017-2018. Pero a excepción de Coronel Suárez, en ninguno de las otras estaciones coincidió con la SRD asociada al máximo del índice FDII, a diferencia de lo que se veía en las estaciones pertenecientes a los otros grupos. En Benito Juárez y en Tres Arroyos, la SRD más severa se dio en el año 2005. Por lo tanto, no se aprecia un patrón espacial y temporal claro respecto a las SRD más intensas, ya que en cada estación generalmente ocurrieron en décadas diferentes. Las SRD menos severas sucedieron generalmente en la década de 1980 y las menos intensas ocurrieron en diferentes décadas.

3.4. Duración de los eventos de SRD

En la tabla III se muestra la SRD con mayor y menor duración para cada estación meteorológica, comprendidas en el período 1981-2020. Lo que se observó fue que la duración de una SRD es variable, desde unas pocas péntadas hasta varios meses luego de la rápida intensificación. En este sentido, se observó que en tres de las cinco estaciones pertenecientes al grupo 2, la duración media de las SRD fue de las más altas, mientras que por otro lado muestran la menor frecuencia de ocurrencia de SRD. Las estaciones son Río Cuarto (donde se detectaron 5 eventos y su duración media fue de 39,8 péntadas), Marcos Juárez (donde se detectaron 8 eventos y con duración media de

39,8 péntadas) y Pilar (donde se detectaron 7 eventos, con duraci3n media de 29,4 péntadas). Esto se explica por la relaci3n inversa entre frecuencia y duraci3n. Por ejemplo, en Río Cuarto la SRD de mayor duraci3n ocurri3 en noviembre del 2008 con una duraci3n de 90 péntadas. Por otra parte, tomando el segundo caso de mayor duraci3n en la misma estaci3n, se tiene que hubo una sequía que comenz3 en enero del 2011 y tuvo una duraci3n de 83 péntadas. Entonces, si bien Río Cuarto es de las estaciones que present3 menor número de casos, se destaca la duraci3n de dos de los eventos.

En las estaciones de Coronel Suárez y Pehuaj3 (pertenecientes al grupo 3) la duraci3n media de los eventos de SRD fue de 31,7 y 29,2 péntadas respectivamente. Pero a diferencia de las tres estaciones analizadas anteriormente, la cantidad de eventos totales de SRD fue 10 y 9 respectivamente, por lo que no est n entre las estaciones con menor cantidad de eventos. En el resto de las estaciones pertenecientes al grupo 3, la duraci3n media fue menor. Una característica de estas estaciones es que generalmente corresponden a aquellas donde se identificaron más eventos de SRD. Por ejemplo, en la estaci3n Nueve de Julio se detectaron 12 casos y la duraci3n media fue de 16,8 y en la estaci3n Tres Arroyos se detectaron 13 casos y la duraci3n media fue de 13,7. En Reconquista se identific3 el mismo patr3n ya que se identificaron 13 eventos y la duraci3n media fue de 15,5 péntadas. Este comportamiento se explica, en parte, debido a que la SRD de mayor duraci3n no es tan alta como en las estaciones mencionadas del grupo 2. Por ejemplo, en la estaci3n Tres Arroyos, donde se detect3 el mayor número de eventos, la SRD de mayor duraci3n comprendi3 41 péntadas.

A modo de síntesis, las estaciones que presentaron menores eventos de SRD tuvieron mayores duraciones medias (en promedio una duraci3n de 30 péntadas aproximadamente), mientras que ocurri3 lo opuesto para las estaciones con mayor cantidad de SRD (en promedio una duraci3n aproximada de 15

péntadas). Una excepci3n a este último caso fue la estaci3n Laboulaye donde se detectaron 3 casos y la duraci3n media fue de 14 péntadas. A su vez, se puede destacar que la duraci3n media en 8 de las 14 estaciones supera el umbral de 18 péntadas, lo cual implica que, en mayor medida los eventos de SRD evolucionaron a una sequía ordinaria.

3.5. Frecuencia mensual de eventos de SRD y Porcentaje mensual de péntadas afectadas por una SRD

En la figura 6 se muestra la frecuencia mensual de ocurrencia de SRD para las estaciones tomadas como referencia en el m3todo de correlaci3n espacial. Se puede apreciar que la máxima cantidad de eventos ocurre entre los meses de octubre-mayo, mientras que el mínimo ocurre en el invierno. Este era un resultado esperable a priori, dado que durante este período la demanda evaporativa es mayor respecto a los meses invernales. Sin embargo, en algunas estaciones se observaron eventos SRD durante el invierno.

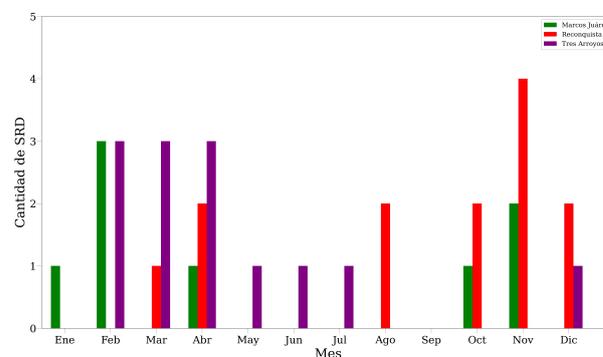


Figura 6: Distribuci3n de las SRD por mes para las 3 estaciones tomadas regionalmente como representativas de los grupos obtenidos mediante el m3todo de correlaci3n espacial.

En el caso de la estaci3n Tres Arroyos (que representa al grupo 3), la mayor frecuencia de eventos se observ3 durante el semestre cálido, en particular en los meses de febrero, marzo y abril, mientras que en los tres meses de invierno y en el mes de diciembre solo se observ3 un

Estación	Inicio SRD de mayor duración (año/mes/péntada)	Duración de la SRD más larga (en péntadas)	Inicio SRD de menor duración (año/mes/péntada)	Duración de la SRD más corta (en péntadas)	Duración media de las SRD (en péntadas)
Reconquista	5/11/2017	34	1/3/1987	5	15,5
Paraná	2/22/2008	70	1/5/2012	4	21,5
Guaquaychú	4/5/1988	65	1/9/1984	5	29
Pilar	2/3/2020	58*	2/2/1988	6	29,4
Marcos Juárez	1/10/2019	89	4/2/2002 6/11/2017	5	38,9
Río Cuarto	3/11/2008	90	2/3/2017	5	39,8
Laboulaye	6/11/2017	29	4/4/1989 4/10/2005	6	13,7
Junín	2/5/2008	44	5/2/1984	5	14,3
Nueve de Julio	5/2/1985	31	2/1/1989	7	16,8
Pehuajó	3/1/2009	67	5/11/2020	8*	29,2
Tandil	5/5/2013	33	6/2/1993	4	16,4
Coronel Suárez	6/4/2008	90	4/1/2017	4	31,7
Benito Juárez	1/6/2013	57	3/3/1995	5	24
Tres Arroyos	5/3/2006	41	3/3/2004 5/4/2019	4	13,7

Tabla III: Fechas de inicio de las SRD de mayor y menor duración para las 14 estaciones meteorológicas ordenadas de norte a sur y por grupos. El asterisco (*) indica que la sequía pudo haber continuado durante el año 2021.

caso. Con lo cual, las SRD están distribuidas en 7 meses. Para la estación de Reconquista (que representa al grupo 1), los eventos de SRD se dieron en el último trimestre del año (octubre, noviembre y diciembre), durante el mes de agosto (presentando 2 casos durante el invierno) y durante los meses de marzo y abril, por lo que los eventos de SRD se distribuyeron en 6 meses, de los cuales 4 están contenidos en el período cálido. En la estación de Marcos Juárez (que representa al grupo 2) los eventos de SRD se dieron principalmente en los meses cálidos, ya que los casos se concentraron en el período octubre-abril, exceptuando el mes de diciembre y el mes de marzo.

Para el período octubre-mayo, donde se detectó la mayor cantidad de eventos de SRD se calculó el porcentaje mensual de péntadas afectadas por una SRD. En la tabla IV se muestran los resultados para cada estación, el valor medio total mensual y por cada grupo. Se observa que el mayor porcentaje medio mensual de péntadas afectadas por una SRD se alcanza en el mes de abril (9,2%) seguido por marzo (9,0%), mientras que el menor porcentaje medio se da en el mes de octubre (5,7%), seguido por los meses de diciembre (6,2%), y noviembre (6,4%).

Dicho patrón de máximos es similar en el grupo 3, donde se concentran la mayor cantidad de estaciones, pertenecientes a la Provincia de Buenos Aires ya que el máximo valor medio se alcanza en abril (10,8%), aunque marzo ocupa el tercer puesto (9,5%) por detrás de mayo (10,7%). Pero el valor mínimo se alcanza en el mes de diciembre (4,2%), seguido por el mes de noviembre (4,9%), mientras que octubre aparece en tercer lugar (5,8%). Analizando las estaciones pertenecientes a ese grupo se puede ver que en las estaciones de Tandil y Tres Arroyos en los meses de noviembre y diciembre el porcentaje de péntadas afectados por una SRD fue muy bajo y hasta incluso nulo. Por otra parte, los máximos porcentajes fueron 15,0% en mayo en Benito Juárez, 13,8% en febrero en Benito Juárez y en enero en Pehuajó y 13,3% en febrero en Pehuajó y en Tres Arroyos.

El patrón medio total no coincidió con el patrón del grupo 1 (donde solamente se consideran 3 estaciones) ya que los máximos se observaron en el mes de noviembre (10,8%), diciembre (10,6%) y enero (9,0%). Eso se relaciona a que en las estaciones de Reconquista y sobre todo en Guaquaychú hubo un alto porcentaje de péntadas afectadas por las SRD durante

Estación	Mes							
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
G1								
Reconquista	2,5	11,7	8,8	9,6	7,1	7,1	8,3	8,3
Paraná	4,6	5,8	7,5	7,1	9,6	8,8	7,5	6,7
Gualeduaychú	9,6	15,0	15,4	10,4	5,4	7,1	10,0	8,8
Porcentaje medio mensual en G1	5,6	10,8	10,6	9,0	7,4	7,8	8,6	7,9
G2								
Pilar	5,0	5,0	7,1	7,5	11,7	12,1	10,0	7,5
Marcos Juárez	10,8	10,4	11,3	8,3	10,4	13,3	13,3	11,7
Río Cuarto	5,0	6,7	7,5	10,0	8,8	10,8	6,7	5,0
Laboulaye	1,3	1,7	2,5	2,5	2,5	2,5	2,9	1,3
Junín	4,2	4,2	1,3	2,9	7,5	6,3	5,4	8,8
Porcentaje medio mensual en G2	5,3	5,6	5,9	6,3	8,2	9,0	7,6	6,8
G3								
Nueve de Julio	5,8	5,0	4,6	5,8	12,5	10,0	7,9	6,7
Pehuajó	6,7	5,8	5,8	8,3	10,8	13,8	13,3	10,0
Tandil	3,3	0,4	0,0	2,5	5,8	6,3	7,1	9,6
Coronel Suárez	12,5	12,9	9,2	8,3	8,8	9,6	9,2	11,3
Benito Juárez	5,4	5,0	5,0	6,3	7,5	7,1	13,8	15,0
Tres Arroyos	1,3	0,0	0,8	2,1	3,8	10,4	13,3	11,7
Porcentaje medio mensual en G3	5,8	4,9	4,2	5,6	8,2	9,5	10,8	10,7
Porcentaje medio mensual	5,7	6,4	6,2	6,6	8,0	9,0	9,2	8,7

Tabla IV: Porcentaje mensual de péntadas afectadas por una SRD para las 14 estaciones, considerando los meses correspondientes al período cálido. Valor medio de dicho porcentaje mensual total y por grupos.

los meses de noviembre, diciembre y enero. El máximo absoluto se observó en diciembre con 15,4% en Gualeduaych .

En el grupo 2 están las estaciones con menor cantidad de eventos de SRD detectados (Ver tabla I), pero con una duración media mayor (Ver tabla III), sobre todo en las estaciones de Río Cuarto y Marcos Juárez. Esto queda reflejado en Marcos Juárez ya que 6 de los 7 meses considerados presentaron un porcentaje de péntadas afectadas por una SRD mayor al 10,0%, algo que no se observó en las demás estaciones. En Río Cuarto no se refleja tal patrón debido a que, de los 5 casos totales de SRD, únicamente 2 fueron de larga duración (Ver sección 3.4), mientras que en Marcos Juárez la cantidad de eventos fue mayor. Otra particularidad del grupo 2 es que en Laboulaye se dio el menor porcentaje general de péntadas afectadas por una SRD en todos los meses considerados. Esto se explica debido a que solamente se detectaron 3 eventos de SRD (Ver Tabla II) y dos de esos eventos tuvieron una duración de solo 6 péntadas (Ver Tabla III). En términos generales, el máximo valor medio se

alcanzó en el mes de marzo (9,0%) y el mínimo en el mes de octubre (5,3%).

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis realizado en este trabajo confirmó la ocurrencia de SRD en todas las localidades consideradas en la Pampa Húmeda, y que las mismas representan un porcentaje significativo del número total de eventos de sequías ordinarias, con una incidencia en general mayor al 40%. En este sentido, frecuencias de ocurrencia similares de SRD fueron documentados en otras regiones, como se muestra en el trabajo de Noguera y otros (2020) sobre España utilizando una metodología basada en el  ndice SPEI. Por otra parte, a excepción de la estación Laboulaye, la cual presentó menor cantidad de eventos de SRD, se observó que respecto al número total de péntadas del período analizado la frecuencia de SRD varió entre un 4% y un 11%. Estos resultados coinciden con los estudios a escala global de Christian y otros (2021) y Qing y otros (2022) que documentaron, mediante distintas metodologías, frecuencias de

ocurrencia similares de SRD en la región de la Pampa Húmeda.

En la Pampa Húmeda las SRD se concentran principalmente en el período octubre-mayo, lo cual se condice con los resultados de Otkin y otros (2021), donde documentaron que los eventos de SRD, también predominan en el período cálido (abril-octubre) en la región central de Estados Unidos. Esto se relaciona directamente con la mayor demanda evaporativa durante esos meses (Otkin y otros, 2018). En la Pampa Húmeda, la mayor frecuencia de SRD se observó en general en las estaciones correspondientes al este del dominio (Provincia de Buenos Aires junto a la estación de Reconquista, Santa Fe), mientras que las menores frecuencias se observaron al oeste (provincia de Córdoba). A su vez, los trabajos de Christian y otros (2019, 2021) y Chen y otros (2019) documentaron que las máximas frecuencias de SRD se observan en la región central de Estados Unidos, la cual posee similitudes climáticas con la Pampa Húmeda, siendo también una región de gran importancia agrícola.

A través del índice FDII, construido a partir de 2 términos que representan la intensidad y la severidad de las SRD, se observó que la magnitud del FDII responde directamente al término de severidad (DRO_SEV) de las SRD, mientras que no hubo relación apreciable respecto a la intensidad de las SRD (FD_INT), la cual mostró valores similares para todos los casos analizados. En este sentido, Otkin y otros (2021) en Estados Unidos, documento resultados similares en el peso relativo asociado a cada uno de los términos del FDII.

Resulta claro a partir del trabajo de Osman y otros (2021), que dependiendo de la metodología utilizada para determinar las SRD, las características climatológicas pueden diferir. Esto se destaca particularmente al comparar los criterios que las definen como de rápida intensificación (por ejemplo, Otkin y otros, 2021; Christian y otros, 2019) y los que las definen

como eventos de corta duración (por ejemplo, Mo y Lettenmaier, 2016). En el presente trabajo se decidió utilizar la metodología del FDII propuesta por Otkin y otros (2021) por 2 razones principales: 1) el FDII cuantifica conjuntamente la intensidad o rápida intensificación de una SRD, así como también la severidad; y 2) este índice contempla una duración mínima de 4 pñtadas a diferencia de eventos más cortos que pueden incluir eventos de solo 1 pñtada para los cuales el potencial impacto negativo en los cultivos es menos probable. Pero, por otro lado, hay ciertas particularidades del FDII que deben ser mencionadas. La primera particularidad se refiere a la condición de cuatro pñtadas consecutivas con percentil menor a 20 para definir el inicio de una sequía. Esta condición puede excluir eventos que hayan iniciado antes. Por ejemplo, si en pñtadas muy cercanas (4 pñtadas como máximo, ya que se consideró que una sequía finaliza si los percentiles de humedad del suelo superan el percentil 20 durante cuatro pñtadas consecutivas) hubo una o dos pñtadas consecutivas aisladas con valores menores al percentil 20. Esta situación mostró una segunda particularidad. Si la sequía comenzó antes, entonces no necesariamente fue una SRD, ya que en su inicio no presentó un desarrollo rápido, sino que lo tuvo en otra etapa de la sequía, lo cual no se considera como SRD según el criterio analizado. En la figura 7 se muestra una serie de percentiles de humedad del suelo de un evento identificado como SRD cuyo inicio ocurrió en la cuarta pñtada de enero del 2017. Lo que se puede apreciar es que tres pñtadas antes de la fecha identificada como SRD hay dos pñtadas consecutivas aisladas con percentiles de humedad del suelo menores a 20. Por lo que la sequía podría haber comenzado en la primera pñtada de enero del 2017. Si se considera esa fecha como el inicio de la sequía, la misma ya no es una SRD. Situación similar se repite en otra SRD de Coronel Suárez (identificada en la quinta pñtada de septiembre del 2011), en una SRD de Tandil (identificada en la primera pñtada de 1989) y en una SRD de Reconquista (identificada en la tercera pñtada de agosto de 1996).

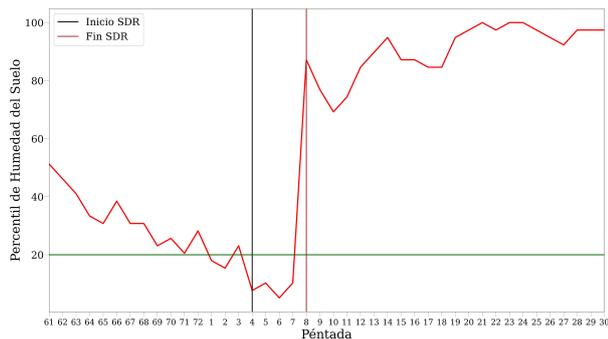


Figura 7: Evento de SRD identificado en la estación de Coronel Suárez que comenzó en la cuarta péntada de enero 2017 y finalizó en la primera péntada de febrero del 2017. Se muestra la serie de percentiles de humedad del suelo desde la primera péntada de noviembre del 2016 (péntada 61) hasta la última péntada de mayo del 2017 (péntada 30). Esta es una situación particular donde se observaron dos péntadas secas previo a la péntada identificada como el comienzo de la SRD.

La importancia de los potenciales impactos en el sector agrícola de las SRD quedó en evidencia con la sequía de 2017-2018, la cual fue la más severa SRD en la mitad de las estaciones meteorológicas analizadas. A lo que se sumó el hecho de coincidir con el período crítico del maíz, lo que produjo un impacto negativo en los rindes y por ende grandes pérdidas económicas en el sector agrícola. A su vez, la importancia de las SRD y sus impactos cobran aún mayor relevancia por el hecho del aumento significativo en las frecuencias observadas en las últimas 2 décadas, así como se ha documentado en este trabajo, y como también se puede inferir a partir de los resultados de Qing y otros (2022) y Christian y otros (2021). Si bien es necesario avanzar en el conocimiento de los forzantes de las SRD, para comprender mejor las razones de este aumento en la frecuencia, ciertos cambios observados en la precipitación y principalmente en la temperatura podrían estar relacionados. Por ejemplo, la reversión en las tendencias de las precipitaciones desde la década de 1990 (Rivera y Penalba, 2014), así como una tendencia hacia

mayores temperaturas medias y extremas en la región (Collazo y otros, 2022).

Si bien este trabajo sienta las primeras bases sobre las características climatológicas de las SRD en la Pampa Húmeda, investigaciones futuras se enfocarán en proponer posibles mejoras al FDII en base a las particularidades anteriormente mencionadas, analizar los forzantes más importantes, realizar comparaciones entre distintas metodologías y bases de datos para analizar la sensibilidad en la intensificación y severidad de las SRD, y así como también poder analizar los potenciales impactos de las SRD en los rindes de los principales cultivos de verano sobre la región. Se espera que esto permita avanzar con recomendaciones para el desarrollo de herramientas operativas para el monitoreo y la alerta temprana de este fenómeno.

Agradecimientos: El presente estudio fue financiado por los proyectos PICT-2019-2019-03639, PICT-2021-I-A-01097, PICTO-UUMM-2019-00004 y al proyecto SISSA financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y EUROCLIMA+18. Se agradece al Servicio Meteorológico Nacional a través del SISSA por el acceso a los datos de precipitación e índices de sequías. Los autores desean agradecer a los revisores por sus valiosos comentarios y sugerencias.

REFERENCIAS

- Anderson, M. C. y otros, 2016: The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts. *Remote Sensing of Environment* 174 (2016), 82–99, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.034>
- Balsamo, G. y otros, 2009: A revised hydrology for the ECMWF model: Verification from field site to terrestrial water storage and impact in the Integrated Forecast System. *Journals of Hydrometeorology* 10 (2009), 623–643, <https://doi.org/10.1175/2008JHM1068.1>

- Cavalcanti, I.F.A. y otros, 2015: Precipitation extremes over La Plata Basin – Review and new results from observations and climate simulations. *Journal of Hydrology* 523 (2015), 211–230, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.028>
- Christian, J. I. y otros, 2019: A Methodology for Flash Drought Identification: Application of Flash Drought Frequency across the United States. *Journal of Hydrometeorology* 20 (2019), 833-846, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0198.1>
- Christian, J. I. y otros, 2021: Global distribution, trends, and drivers of flash drought occurrence. *NATURE COMMUNICATIONS* (2021), 12:6630, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26692-z>
- Collazo, S. y otros, 2022: Evaluation of CMIP6 models in the representation of observed extreme temperature indices trends in South America. *Climatic Change*, volume 172, 21 (2022), 1-21, <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03376-1>
- Ek, M. B. y otros, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 108 (2021), <https://doi.org/10.1029/2002JD003296>
- GAR, 2021: UN Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. <https://www.preventionweb.net/publications/view/78456>
- Hersbach, H. y otros, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* (2020), 146, 1999-2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Krepper, C. M. y otros, 1989: Time and Space Variability of Rainfall in Central-East Argentina. *Journal of Climate*, American Meteorological Society (1989), 2, 39-47, [https://doi.org/10.1175/15200442\(1989\)002<0039:TASVOR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200442(1989)002<0039:TASVOR>2.0.CO;2)
- Lisonbee J., y otros, 2021: Making sense of flash drought: definitions, indicators, and where we go from here. *Journal of Applied and Service Climatology* (2021), 2021, 1-19, <https://doi.org/10.46275/JOASC.2021.02.001>
- McKee, T. B., Doesken N. J., y Kleist J., 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eight Conference on Applied Climatology* (1993), 179-184,
- Mo, K. C., y D. P. Lettenmaier, 2015: Heat wave flash droughts in decline. *Geophysical Research Letters* (2015), 42, 2823–2829, <https://doi.org/10.1002/2015GL064018>.
- Mo, K. C., y D. P. Lettenmaier, 2016: Precipitation deficit flash droughts over the United States. *Journal of Hydrometeorology* (2016), 17, 1169–1184, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0158.1>
- Muñoz Sabater, J., 2019: ERA5-Land hourly data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on 01-06-2022, <https://doi.org/10.5194/essd-134349-2021-supplement>)
- Naumann, G. y otros, 2019: Dynamics of Socioeconomic Exposure, Vulnerability and Impacts of Recent Droughts in Argentina. *Geosciences* (2019), 9 (1), 39, <https://doi.org/10.3390/geosciences9010039>
- Nogueira, M., 2020: Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences. *Journal of Hydrology* (2020), 583, 124632, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124632>
- Penalba O. C. y Rivera J. A. 2016. Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America - emphasis in regional drought occurrences. *Advances in Geosciences* (2016), 42, 114, <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-1-2016>
- Osman, M. y otros, 2020: Flash drought onset over the contiguous United States: sensitivity of inventories and trends to quantitative definitions. *Hydrology and Earth System Sciences* (2021), 25, 565–581, <https://doi.org/10.5194/hess-25-565-2021>
- Otkin, J. A. y otros, 2018: Flash Droughts: A Review and Assessment of the Challenges Imposed by Rapid-Onset Droughts in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* (2018), 99(5), 911-919, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0188.1>

[//doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0149.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0149.1)

- Otkin, J.A. y otros, 2021: Development of a Flash Drought Intensity Index. *Atmosphere* (2021), 12 (6), 741, <https://doi.org/10.3390/atmos12060741>
- Qing, Y. y otros, 2022: Accelerating flash droughts induced by the joint influence of soil moisture depletion and atmospheric aridity. *Nature Communications* (2022), 13:1139, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28752-4>
- Rivera J.A. y Penalba O., 2014: Trends and Spatial Patterns of Drought Affected Area in Southern South America. *Climate* (2014), 2, 264-278, <https://doi.org/10.3390/cli2040264>
- Scian, B. y otros, 2006: Characteristics of large-scale atmospheric circulation related to extreme monthly rainfall anomalies in the Pampa Region, Argentina, under non-ENSO conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, (2006), 85, 89–106, <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0182-8>
- Sgroi, L. C. y otros, 2021: Characteristics of droughts in Argentina's core crop region. *Hydrology and Earth System Sciences* (2021), 25, 2475–2490, <https://doi.org/10.5194/hess-25-2475-2021>
- Spennemann, P. C. y otros, 2015: A comparison of GLDAS soil moisture anomalies against standardized precipitation index and multisatellite estimations over South America. *Journal of Hydrometeorology* (2015), 16 (1), 158-171, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0190.1>
- Svoboda, M. y otros, 2002: The Drought Monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society* (2002), 83, 1181–1190, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083)
- Wilks, D. S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Vol 91, Second Edition, 2006, Academic Press is an imprint of Elsevier.