

ANÁLISIS DE SEQUÍAS AGRÍCOLAS REPENTINAS UTILIZANDO DATOS SATELITALES DE ESA-CCI

Lumila Masaro^{1,2}, Miguel A. Lovino^{1,2}, Gabriela V. Müller^{1,2}

lmasaro@unl.edu.ar. Autor/a correspondiente.

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

²Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático (CEVARCAM), Fac. de Ing. y Cs. Hídricas (FICH-UNL)

Palabras claves: sequías repentinas, datos satelitales, humedad de suelo

1. INTRODUCCIÓN

La economía del sudeste de Sudamérica (SESA) depende fuertemente de la agricultura de secano, lo que la hace particularmente vulnerable a sequías severas. En Argentina y Brasil, eventos de sequía severa han reducido drásticamente los rendimientos de cultivos, especialmente cuando ocurren durante etapas críticas de crecimiento, ocasionando pérdidas económicas sustanciales.

Las sequías repentinas (de rápida intensificación), conocidas como *flash droughts*, se ven favorecidas por déficits extremos de precipitación, temperaturas elevadas y evapotranspiración anómala (Otkin et al. 2018). Estas sequías de rápido desarrollo han ido aumentando en frecuencia e intensidad como consecuencia del cambio climático, particularmente en zonas de cultivo (Christian et al. 2023). SESA ha sido reconocida como una zona propensa a la ocurrencia de sequías agrícolas repentinas (SARs, Lovino et al. 2024), sin embargo, los estudios dedicados a estos eventos en la región aún son escasos (e.g., Kucheruc et al. 2024; Lovino et al. 2025). Considerando el incipiente conocimiento sobre la dinámica de las SARs, y dada su relevancia en el SESA en la producción agrícola, resulta crucial avanzar en su caracterización y en la comprensión de sus impactos asociados. Así, el objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de productos satelitales, particularmente ESA-CCI-RZSM, para identificar SARs en la región y sus impactos en la vegetación mediante indicadores de base satelitales.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. Región de estudio. La región de interés se encuentra comprendida entre las latitudes 17-40°S y longitudes 37-65°W, abarcando el sur de Brasil, sudeste de Bolivia, el centro-norte de Argentina, Paraguay y Uruguay. El SESA se destaca por su rol clave en la producción mundial de alimentos, principalmente maíz y soja, la cual se ha incrementado significativamente desde 1990 como consecuencia de grandes avances tecnológicos, expansión de tierras de cultivo y mejoras en las prácticas agronómicas.

2.2. Producto ESA-CCI: humedad de suelo. Para la identificación de SARs se utilizaron datos de humedad del suelo derivados de observaciones satelitales de ESA-CCI (European Space Agency - Climate Change Initiative) (ESA-CCI-RZSM v09.1, Pasik et al. 2023). Dicho conjunto de datos representa el contenido volumétrico de agua hasta una profundidad de suelo de 1 metro, con resolución espacial de 0.25x0.25° y temporal diario desde 1979 hasta 2023. Dado que los sensores detectan cambios de emisividad sólo en los primeros centímetros de suelo, se utiliza un filtro exponencial que simula la transferencia de humedad desde la superficie hacia el perfil de suelo, permitiendo reconstruir series temporales en profundidad (Pasik et al. 2023).

2.3. Productos MODIS: LSWI y GPP. Para evaluar el impacto de las SARs en la productividad y el estrés hídrico en la vegetación mediante observaciones satelitales se analizaron anomalías estandarizadas de la Productividad Primaria Bruta (GPP, por sus siglas en inglés) y el Índice de Agua de Superficie Terrestre (LSWI, por sus siglas en inglés), derivados de productos del sensor TERRA del Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) MOD17A2H.006 y MOD09A1.061 respectivamente, con resolución espacial de 500 metros y composición temporal de 8 días. El procesamiento se restringe al período 2001-2023 y se aplican filtros de calidad general y espectral para enmascarar píxeles poco confiables. GPP corresponde a un producto preprocesado y distribuido de forma preprocesada, mientras que LSWI se calcula a partir de bandas de reflectancia en superficie, mediante la expresión:

$$LSWI = \rho_{858} - \rho_{1640} / \rho_{858} + \rho_{1640} \quad (1)$$

donde ρ_{858} y ρ_{1640} es el porcentaje de radiación reflejada en la banda del infrarrojo cercano y en la banda del infrarrojo de onda corta, respectivamente. Las anomalías estandarizadas se obtuvieron a partir del cálculo de la media y la desviación estándar climatológica para cada período de ocho días.

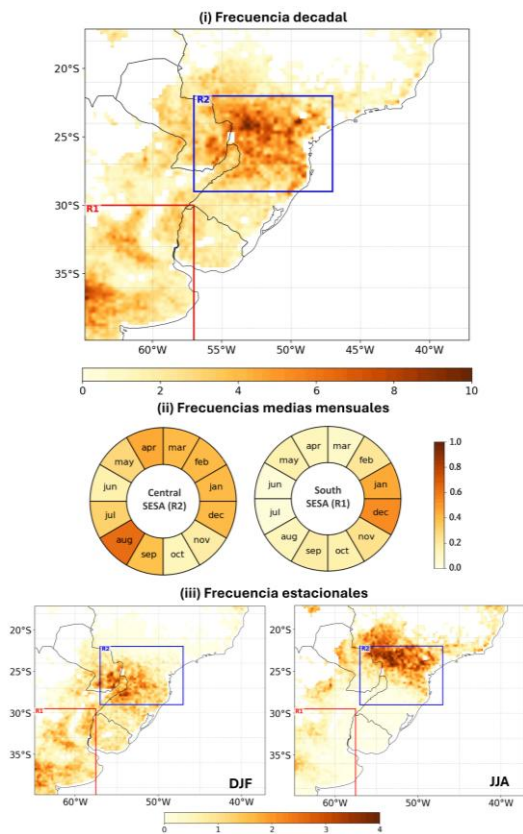


Figura 1: (i) Distribución de frecuencia media decadal [evento/década]; (ii) Frecuencia media mensual decadal de los eventos de SAR en las regiones R1- South SESA y R2- Central SESA; (iii) Frecuencia decadal para las estaciones con mayores frecuencias mensuales.

ambos países. La distribución espacial de eventos en la estación de verano abarca ampliamente a ambas regiones, con frecuencias medias de 3 eventos decadales, mientras que la ocurrencia de eventos en durante el invierno se concentra en el norte de R2, alcanzando frecuencias medias de hasta 4 eventos por década.

3.2. Evolución de una SAR en 2005-2006 y sus impactos. Se analiza la evolución de un evento de SAR ocurrido entre noviembre 2005 y mayo 2006 en el centro-este de SESA (Lovino et al. 2025) representando el decaimiento de humedad de suelo mediante anomalías estandarizadas y percentiles de ESA-CCI-RZSM (Filas 1 y 2, Fig. 2). Se observa una marcada caída en estos valores en la región donde se localiza el evento (Fila 1, Fig. 2), sin embargo, el rápido descenso de la humedad de suelo que originó el evento de SAR se ve suavizado a lo largo del tiempo como consecuencia del filtrado exponencial aplicado en ESA-CCI-RZSM, lo que dificulta la detección del evento mediante diferentes metodologías como la de Yuan et al (2023) y la de Lovino et al. (2024).

Las anomalías estandarizadas de indicadores con base satelital (Filas 3 y 4, Fig. 2) muestran un patrón espacial coincidente con las variaciones de humedad de suelo a lo largo del tiempo. LSWI es un índice sensible a los cambios de contenido de humedad foliar, lo que permite detectar estrés hídrico en la vegetación (Christian et al 2022). GPP es un indicativo de la tasa de asimilación de carbono por parte de la planta, lo que lo convierte en una medida directa de la actividad fotosintética de la misma y sus cambios en la productividad (Jing et al.2025). Ambos indicadores muestran el impacto de la sequía, con un estrés hídrico pronunciado en enero de 2006 que impactó la productividad de los cultivos en Uruguay, el centro-este de Argentina, sur de Paraguay y Brasil (Filas 3 y 4, segundo panel). En los meses siguientes se observa la intensificación del evento (marzo y mayo), con mayor déficit hídrico (anomalías negativas intensas de LWSI) y disminución de la productividad (anomalías negativas intensas de GPP) en el límite entre Argentina, Brasil y Uruguay, con marcadas anomalías de RZSM y valores de percentiles que caen por debajo de los 20.

2.4. Metodología para detección de SAR. Las SARs se identificaron aplicando la metodología de Yuan et al. (2023), basada en percentiles de humedad de suelo. Los valores diarios de humedad de suelo se agregan en medias de cinco días (pentadas) y luego se transforma la serie en percentiles utilizando la climatología 1979-2023. Una SAR se identifica cuando la humedad de suelo decae desde valores superiores al percentil 40 hasta por debajo del percentil 20, con una tasa de disminución mayor o igual a 5 percentiles por pentada. El evento finaliza cuando la humedad del suelo se recupera, superando el percentil 20, y su duración total debe ser mayor o igual a 4 pentadas, lo que equivale a 20 días.

3. RESULTADOS

3.1. Características de las SARs detectadas con ESA-CCI-RZSM. La Figura 1 expone los principales resultados obtenidos al aplicar la metodología de percentiles con los datos de ESA-CCI-RZSM, destacándose dos regiones de mayores frecuencias de SRAs: R1 en el sur de SESA y R2 en el centro de SESA, alcanzando la segunda frecuencias de 6 a 10 eventos por década (Fig. 1 a). Para la región sur de SESA, las SRAs son más propensas a ocurrir en los meses de diciembre y enero (Fig. 1b), coincidente con los períodos críticos de soja y maíz para Argentina (Sgroi et al., 2021). En cuanto al centro de SESA, coincidente en su mayoría con el sur de Brasil y Paraguay, se observa una elevada frecuencia de eventos en agosto, mes asociado con la cosecha del segundo cultivo de maíz en Brasil y con la siembra de éste en Paraguay (Lovino et al., 2025). En tanto para los meses de diciembre a abril, aunque menos frecuentes que agosto, se asocian al ciclo completo de plantación, crecimiento y cosecha de maíz y soja en ambos países.

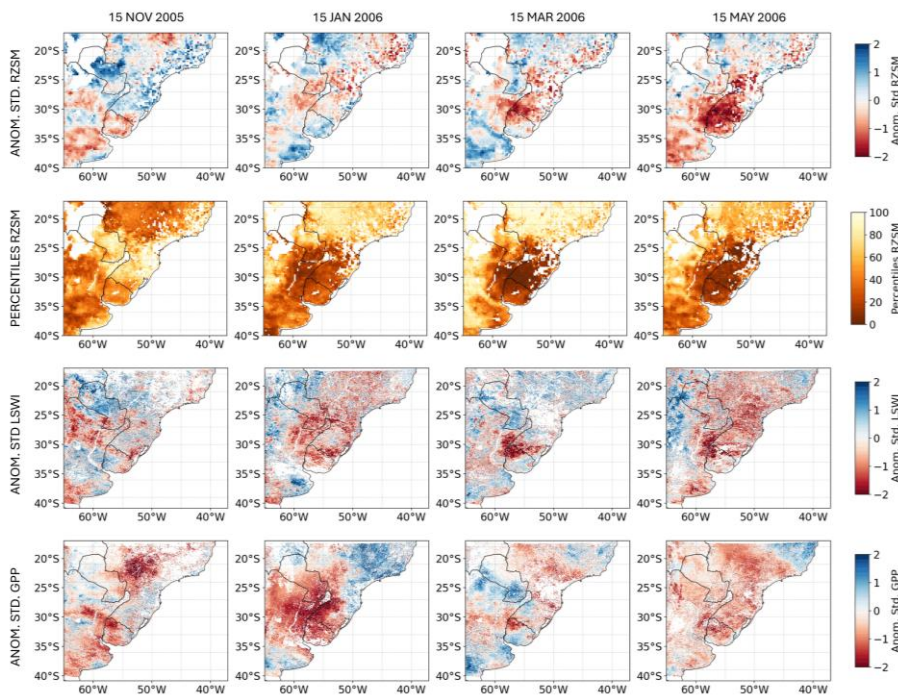


Figura 2: Evolución espaciotemporal de un evento de SAR desarrollado entre noviembre de 2005 y mayo de 2006 sobre el centro-este de SESA. Fila 1: anomalías estandarizadas de humedad del suelo radicular de ESA-CCI-RZSM; Fila 2: percentiles de la misma variable; Fila 3: anomalías estandarizadas del LSWI; y Fila 4: anomalías estandarizadas de GPP. Las fechas indicadas en la parte superior de cada columna corresponden a días representativos contenidos dentro de las ventanas temporales de los productos utilizados: pentadas para RZSM y composiciones de 8 días para los productos satelitales MODIS (LSWI y GPP)

que la aplicación de un filtro exponencial para extrapolar la humedad de suelo superficial hacia mayores profundidades tiende a suavizar las variaciones rápidas del contenido de humedad en la zona radicular. Los resultados muestran que el conjunto de datos detectó satisfactoriamente la evolución del evento de SAR 2005-2006 y sus impactos en la vegetación durante el período de persistencia de la sequía, aunque no la caída repentina de la humedad que da origen a la sequía repentina.

REFERENCIAS

- Christian J. I., Basara J. B. et al. 2022:** Flash drought identification from satellite-based land surface water index. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 26 100770
- Christian J. I., Martin E. R. et al. 2023:** Global projections of flash drought show increased risk in a warming climate *Commun. Earth Environ.* 4 165
- Jing, Y., Wang S., et al. 2025:** Gross primary productivity is more sensitive to accelerated flash droughts. *Com. Earth Env.* 6, 34
- Kucheruk L. L., Spennemann P. C., Naumann G. y Rivera J. C., 2024:** Climatología de sequías de rápido desarrollo en la Pampa húmeda Argentina *Meteorológica* 49 025
- Lovino, M. A., Pierrestegui M. J., Masaro L., et al. 2025:** Agricultural flash droughts and their impact on crop yields in southeastern South America. *Environ. Res. Lett.* 20 054058
- Lovino M. A., Pierrestegui M. J., et al. 2024:** The prevalent life cycle of agricultural flash droughts *npj Clim. Atmos. Sci.* 7 73
- Mukherjee S and Mishra A K 2022:** Global flash drought analysis: uncertainties from indicators and datasets *Earth's Future* 10 e2022EF002660
- Otkin J A, Svoboda M., Hunt E. D. et al. 2018:** Flash droughts: a review and assessment of the challenges imposed by rapid onset droughts in the United States *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 99 911–9
- Pasik, A., Gruber A., Preimesberger W. et al. 2023:** Uncertainty estimation for a new exponential-filter-based long-term root-zone soil moisture dataset from Copernicus Climate Change Service (C3S) surface observations, *Geosci. Model Dev.*, 16, 4957–4976
- Sgroi L. C., Lovino M. A., Berbery E. H. y Müller G. V. 2021:** Characteristics of droughts in Argentina's core crop region *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25 2475–90
- Yuan X. et al. 2023:** A global transition to flash droughts under climate change. *Science* 380, 187

4. CONCLUSIONES

El trabajo explora la utilidad del conjunto de datos de ESA-CCI-RZSMv09.1 para la identificación de SARs. El producto revela resultados de las características de las SARs consistentes con otros métodos (Lovino et al., 2025), aunque con disparidad en las regiones críticas. Estas disparidades ya han sido documentadas en otras regiones del mundo al utilizar diversos conjuntos de datos o definiciones (Mukherjee y Mishra, 2022). El conjunto de datos propone una alternativa muy prometedora para monitoreo de estos eventos en la región, principalmente por su aplicabilidad en la zona de raíces. No obstante, posee ciertas limitantes como la discontinuidad de datos, tanto espacial como temporal, que impide el análisis en diversas regiones o interrumpen la continuidad de las series de humedad de suelo. Además,