

# Determinación de regímenes de incendios y sequías usando información satelital y meteorológica para Córdoba, Argentina

Sánchez, S., Grilli, M., Karlin, M., Fachinetti, R. y Ravelo, A.

DOI: 10.31047/1668.298x.v39.n1.33798

## RESUMEN

El clima de la provincia de Córdoba ofrece, anualmente, condiciones predisponentes para la ocurrencia de incendios. Se analizó y modeló el impacto de la sequía mensual y las condiciones de humedad precedente en la actividad de los incendios para las principales ecorregiones del centro del país, a partir del índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI). Se creó un mapa de frecuencia de incendios para el período 2001-2020 a partir del producto de área quemada MCD64A1 de MODIS. Se observó una relación estadísticamente significativa entre los incendios y las sequías de la misma temporada, mientras que las condiciones climáticas precedentes jugaron un papel relativamente menor, según la región. La región serrana fue la más afectada en términos de superficie quemada y la frecuencia de incendios varió entre una y seis veces. Además, los modelos aquí presentados estimaron una respuesta positiva de la ocurrencia de incendios ante condiciones de mayor humedad en el año anterior. La región Bañados del Río Dulce obtuvo la mayor ocurrencia y frecuencia de incendios, con sitios que se quemaron hasta 11 veces. Los modelos presentados para las ecorregiones individuales son prometedores para desarrollar un sistema de pronóstico estacional que respalde las estrategias de manejo de incendios.

**Palabras clave:** área quemada, ecorregión, frecuencia de incendios, índice de Palmer, PDSI.

Sánchez, S., Grilli, M., Karlin, M., Fachinetti, R. and Ravelo, A. (2022). Determining fire regimens and droughts using satellite and meteorological information for Córdoba, Argentina. *Agriscientia* 39: 1-13

## SUMMARY

The climate in the province of Córdoba has suitable conditions for the occurrence of fires annually. The impact of current drought and preceding humidity conditions on fire activity was analyzed and modeled for the main eco-regions of the center of the country by using the Palmer Drought Severity Index (PDSI). A statistically significant relationship was observed between fires

and droughts for the same season, while preceding weather conditions played a relatively minor role, depending on the region. A fire frequency map for the period 2001-2020 was created from the MODIS burned area product MCD64A1. The mountain region was the most affected in terms of burned area and the fire frequency ranged from 1 to 6 times. Furthermore, the models presented here estimated a positive response of fire occurrence to higher humidity conditions in the previous year. The Bañados del Río Dulce region had the highest fire occurrence and frequency, with sites burned up to 11 times. The models presented for the individual eco-regions are robust enough for developing a seasonal forecasting system to support fire management strategies.

**Keywords:** burned area, ecoregions, fire frequency, Palmer index, PDSI.

*Sánchez, S. (ORCID: 0000-0003-1239-5225): Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA). Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal, Centro de Relevamientos y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (IMBIV-CREAN). Grilli, M. (ORCID:0000-0001-7189-6615): Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFYN). Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal, Centro de Relevamientos y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (IMBIV-CREAN). Karlin, M. (ORCID: 0000-0002-8642-4677): Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA). Manejo de Agrosistemas Marginales. Fachinetti, R. (ORCID: 0000-0002-7401-4451): Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal, Centro de Relevamientos y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (IMBIV-CREAN). Ravelo, A. (ORCID: 0000-0002-6764-0518): Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA). Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal, Centro de Relevamientos y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (IMBIV-CREAN).*

*Correspondencia a:* sofiasanchez@agro.unc.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

Los incendios juegan un rol fundamental como agentes reguladores de algunas funciones de los ecosistemas y ciclos biogeoquímicos globales (Bond y Keeley, 2005; Bowman et al., 2011). Las características del régimen de incendios (frecuencia, intensidad, estacionalidad, severidad, etc.) surgen de muchos incendios individuales en una variedad de escalas espaciales y temporales. Por lo que, tanto el tiempo como el clima, incluidas las sequías a corto y largo plazo, son importantes e influyen en varios aspectos de los regímenes de incendio (Littell et al., 2016; Abatzoglou et al., 2017).

La sequía es una anomalía temporal que afecta a todos los ecosistemas mundiales y tiene su origen en el déficit hídrico de precipitaciones con respecto a los valores habituales (Dracup et al., 1980; Ravelo et al., 2014). La combinación de altas temperaturas y condiciones de sequía aumentan el riesgo de incendios (Westerling et al., 2006; Aldersley et al.,

2011; Abatzoglou et al., 2017; Turco et al., 2017; Holden et al., 2018). Alrededor del mundo, diversas investigaciones han constatado la asociación entre sequías e incendios a partir del estudio de las variadas características del régimen de incendios y variables meteorológicas como el índice de severidad de sequía de Palmer (Palmer, 1965; Westerling et al., 2003; Keeley, 2004; Collins et al., 2006; Preisler y Westerling, 2006; Xiao y Zhuang, 2007; Littell et al., 2016; Abatzoglou et al., 2017).

El índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) se basa en un modelo físico de balance hídrico; usa tanto la precipitación como la temperatura del aire superficial como entrada, y toma en cuenta la condición precedente (Palmer, 1965; Keyantash y Dracup, 2002). Este índice sirve para evaluar los períodos secos y húmedos, la variabilidad mensual y la tendencia de las sequías en una serie histórica de años (Ravelo et al., 2014). En Córdoba (Argentina) el índice fue utilizado para evaluar los daños agroeconómicos relacionados tanto a los

déficits (sequías) como a los excesos hídricos (Ravelo et al., 2014; Ravelo et al., 2016; Zanvetter et al., 2017).

En el centro de Argentina, y particularmente sobre el Bosque Chaqueño, el régimen de fuego es un factor de perturbación importante y se registran zonas con alta frecuencia de incendios (Argañaraz et al., 2015). Estudios previos han encontrado una asociación positiva entre la actividad del fuego y las condiciones de sequía predominantes en el corto y mediano plazo (Fischer et al., 2012; Argañaraz et al., 2015; Argañaraz, 2016). Asimismo, como en otros ecosistemas áridos y semiáridos del mundo, se observó un mayor número de incendios luego de años que fueron más húmedos de lo normal (Grau y Veblen, 2000; van der Werf et al., 2008; Bravo et al., 2010; Archibald et al., 2013; Argañaraz et al., 2015). Los antecedentes sobre la dinámica espacial de los incendios para la región son clave para indagar en los múltiples aspectos que modulan los regímenes de incendios.

La utilización de la teledetección permite realizar una cartografía de cicatrices de quemaduras o incendios (postincendio) permitiendo cuantificar la superficie de área quemada en una gran extensión. El producto de área quemada global MCD64A1 del espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) es la base de los productos de emisión de incendios (Zhu et al., 2017). El algoritmo actualizado (colección 6) mejora las versiones pasadas del producto y ofrece una detección significativamente mejor de quemaduras pequeñas, una reducción en la incertidumbre temporal de la fecha de quemado y una gran reducción en la extensión de áreas no mapeadas (Giglio et al., 2018). La teledetección de incendios, a partir de productos MODIS, ha mejorado la comprensión de la relación sequía-incendios en estudios a nivel global y regional (Archibald et al., 2010, 2013; Abatzoglou et al., 2018; Mayr et al., 2018).

Los regímenes de incendios están controlados por las condiciones atmosféricas, el clima y el tipo de vegetación disponible como combustible (Pausas y Keeley, 2009; Krawchuk y Moritz, 2011). En particular, las sequías influyen en varios aspectos de los regímenes de incendios, pero no en todos (Littell et al., 2016). La hipótesis de este trabajo es que, bajo condiciones de sequía meteorológica severas, la temporada de incendios se agrava. Esta situación conlleva a mayor número de incendios y mayor superficie quemada en años más secos.

El objetivo de este trabajo fue analizar la relación entre las condiciones de sequía y la actividad de los

incendios en diferentes ecorregiones de la provincia de Córdoba, utilizando datos meteorológicos y de teledetección en un período de tiempo de 20 años. Además, para las regiones Sierras, Pampa y Bañados del Río Dulce, se modeló la ocurrencia de incendios, teniendo en cuenta la condición de humedad mensual y la condición precedente de hasta 12 meses. Para ello, se plantearon las siguientes preguntas: ¿Cuál es la distribución espacial y temporal de los incendios? ¿Cuáles son las condiciones de humedad que favorecen la actividad de incendios? ¿Cómo se distribuye espacialmente la recurrencia de incendios?

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

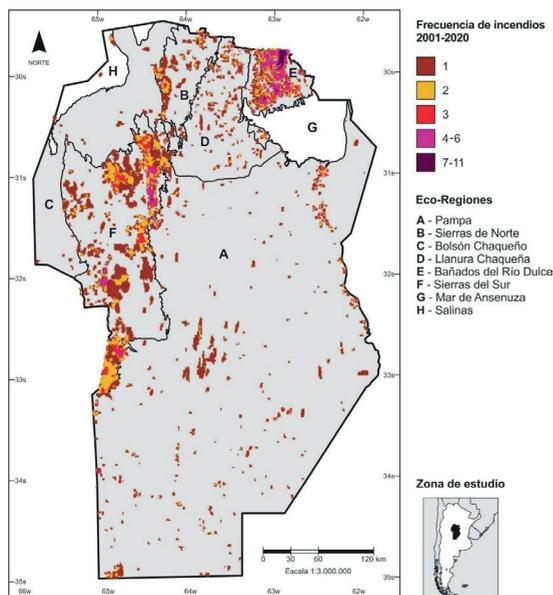
La provincia de Córdoba se encuentra en la región central de Argentina (29° 26' - 35° 01' S; 61° 46' - 65° 47' O) y presenta una superficie total de 165.321 km<sup>2</sup>. La provincia ha sido clasificada en diversas unidades ecológicas o ecorregiones, de acuerdo a las variables ambientales que se consideren (Cabrera, 1976; Luti et al., 1979; Cabido et al., 2003; Morello et al., 2012; Oyarzabal et al., 2018). De acuerdo con los objetivos de este trabajo, se reclasificaron y delimitaron cinco ecorregiones como unidades de análisis: Llanura Chaqueña, Bolsón Chaqueño, Sierras del Norte, Sierras del Sur, Bañados del Río Dulce y Pampa. Se utilizó como base el mapa Regiones Naturales, obtenido del portal web de la Infraestructura de Datos Espaciales de Córdoba (IDECOR) (<https://idecor.cba.gov.ar>) (Figura 1).

#### *Llanura Chaqueña*

Comprende la llanura extra serrana oriental (Sayago, 1969), entre los 29° 35' y 31° 10' de latitud Sur y los 63° 25' y 64° 25' de longitud Oeste. El clima es subhúmedo seco con precipitaciones anuales entre 700 y 800 mm (Morello et al., 2012). Hacia el norte de la región, la vegetación característica pertenece al Chaco Seco y se presenta en forma de parches de sabana, con zonas de bosque secundario y arbustal xerófilo, con predominio de suelo desnudo. Hacia el sur, la vegetación presenta relictos del espinal, con claros de gran extensión de probable origen antrópico (Bravo et al., 2001; Kunst et al., 2003; Morello et al., 2012).

#### *Bolsón Chaqueño*

La región está emplazada entre las Salinas Grandes hacia el oeste y el sistema serrano al este. Se ubica entre los 29° 30' y los 31° 50' de latitud Sur y entre los 64° 15' y los 65° 45' de longitud



**Figura 1.** Área de estudio y frecuencia de incendios durante el período 2001-2020 en las ecorregiones de la provincia de Córdoba

Oeste. Desde el punto de vista fitogeográfico, esta región pertenece al Distrito Chaqueño Occidental de Cabrera (1976) e incluye la expresión más seca y menos productiva del Gran Chaco Americano: el Chaco Árido (Karlin et al., 2013). El clima predominante de la subregión del Chaco Árido es subtropical seco mesotermal. Las precipitaciones presentan gran variabilidad estacional anual y plurianual (Morello et al., 1985). En los últimos años se registró un incremento en las lluvias a valores medios de entre 550 y 650 mm (Karlin, 2013). La evapotranspiración potencial es muy elevada durante todo el año, lo que genera deficiencias hídricas considerables (Cabido et al., 2003). Las diferentes estructuras vegetales que se encuentran en estos ecosistemas se deben principalmente a disturbios antrópicos, tales como el sobrepastoreo y la tala, con alto índice de suelo descubierto (Karlin et al., 2013).

### Región Serrana

El sector serrano forma parte del sistema de las Sierras Pampeanas. Comprende las Sierras del Norte (500 a 1000 m s.n.m.), entre los 29° 30' y 30° 40' de latitud Sur y entre los 63° 45' y 64° 30' de longitud Oeste; y las Sierras del Sur (550 a 2790 m s.n.m.), entre los 30° 45' y 33° 10' de latitud Sur, y entre los 64° 20' y los 65° 25' de longitud Oeste. El clima en las montañas de Córdoba está asociado, en gran medida, con el gradiente de elevación. En los sectores más elevados, la precipitación

media anual alcanza más de 900 mm; mientras que, en sectores más bajos, hay un gradiente regional de lluvia desde el este (700-800 mm) hacia el oeste (500-600 mm), concentradas en los meses más cálidos (Capitanelli, 1979). La región forma parte del Distrito Chaqueño Serrano (Cabrera, 1976) y la formación más extendida es el Arbustal xerófilo caducifolio (Morello et al., 2012). La fisonomía de la vegetación, que varía a lo largo del gradiente de elevación, es el resultado de una compleja retroalimentación entre clima, topografía y perturbación (es decir, incendios y pastoreo) (Giorgis et al., 2013; Giorgis et al., 2017; Argañaraz et al., 2020).

### Bañados del Río Dulce

Los bañados se extienden entre el límite norte provincial y el Mar de Ansenúza, desde los 29° 45' y los 30° 35' de latitud Sur y entre los 63° 25' y los 62° 30' de longitud Oeste. El clima de la región es mesotermal subhúmedo húmedo, con precipitaciones estivo-otoñales que oscilan entre 850 y 950 mm anuales. La vegetación característica son bosques, arbustales y pajonales de suelos pesados (vinalares, jumeales y cachiyuales), interrumpidos por parches de pajonal inundable halohidromorfo (Bucher, 2006; Morello et al., 2012).

### Pampa

Se ubica en las extensas zonas plano-cóncavas del centro-sur y sureste de la provincia de Córdoba, entre los 30° 20' y los 35° 16' de latitud Sur, y entre los 61° 50' y los 65° 7' de longitud Oeste. El clima que comprende la llanura chaco-pampeana es subtropical, con un gradiente decreciente de humedad de Este a Oeste y Sudoeste. Las precipitaciones medias anuales oscilan entre 700 y 1000 mm con una gran variabilidad interanual (Morello et al., 2012). Parte de la región aquí descrita pertenece a la Provincia Fitogeográfica o Ecorregión del Espinal y parte a la Ecorregión Pampa (Cabrera, 1976; Morello et al., 2012). La vegetación característica, tanto del espinal como del pastizal, ha sido reemplazada en gran parte por cultivos y campos ganaderos. En forma de parches aislados pueden encontrarse matorrales o bosques bajos, con especies leñosas del espinal.

### Datos de incendios

Para determinar los incendios durante el período 2001-2020 se utilizaron dos productos satelitales diferentes, ambos derivados del sensor MODIS a bordo de los satélites AQUA y TERRA de la NASA. El producto de área quemada MODIS MCD64A1 emplea un algoritmo híbrido que utiliza tanto los

cambios de reflectancia como las anomalías térmicas asociadas con la quema de biomasa (Giglio et al., 2009). Este producto se procesa desde el año 2000 hasta la actualidad; se trata de un producto mensual, cuadrículado global de 500 metros (m). La versión actual de este algoritmo (colección 6) proporciona una sensibilidad considerablemente mayor que la original e identifica un 26% más de área quemada global que la colección anterior (Giglio et al., 2018). Se utilizaron 480 imágenes correspondientes a los mosaicos H12V12 y H12V11, obtenidas en forma gratuita a partir del portal web del servicio geológico estadounidense (U.S. Geological Survey) (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Para validar las áreas detectadas se utilizó, además, el producto de focos de calor de MODIS (MCD14DL) de 1 km de resolución. Este producto clasifica cada píxel como “quemado” – “sin quemar”, o “sin asignar” en caso de que no haya suficientes datos disponibles para determinar alguno de los estados anteriores (Giglio et al., 2016). Como no todos los focos de calor necesariamente son incendios, se extrajeron aquellos que coincidían espacialmente con las áreas quemadas. La ubicación geográfica de las fuentes de calor y los datos vectoriales en formato .shp son distribuidos por NASA FIRMS (<https://earthdata.nasa.gov/firms>).

A los fines de este trabajo, se definió un evento de incendio como a un polígono o parche de área quemada (AQ) mayor a 14 ha. A partir de las imágenes mensuales MCD64A1, se creó un compuesto anual y se identificó el mes en que cada incendio ocurrió mediante superposición de los polígonos de áreas quemadas de cada año, con los focos de calor de MODIS; a cada polígono se le adjudicó el mes de quema de dicho punto. Se determinó la cantidad de incendios mensuales (OI) y el área quemada mensual (AQ) para el período en estudio 2001-2020 (N=240).

También se analizó la frecuencia de incendios (FI; número de veces que un mismo sitio se quemó durante los 20 años estudiados) y el número de grandes incendios (>10.000 ha) por región. El mapa de frecuencia de incendios se elaboró mediante la superposición de las capas vectoriales de área quemada anual sobre una grilla de 1 km x 1 km, donde a cada celda con alguna parte de su área quemada se le designó “1” y “0” a las celdas con ninguna proporción de área quemada. Todos los procedimientos y acciones ejecutadas con datos espaciales se realizaron utilizando ArcGIS 10.2 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2013).

## Datos climáticos

Los datos de extremos hídricos fueron adquiridos del Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN). El PDSI (Palmer, 1965) se calcula con datos mensuales de la evapotranspiración potencial y la precipitación, junto con información sobre la capacidad de retención del agua de los suelos. Tiene en cuenta la humedad recibida (precipitación), así como la humedad almacenada en el suelo, de manera que representa la posible pérdida de humedad a causa del efecto de la evapotranspiración. Los niveles de humedad y de sequedad proporcionados por el PDSI mensual en todas sus escalas se asocian con las categorías establecidas en el Atlas de Sequía de la República Argentina (Ravelo et al., 2014). Los valores entre -1 y 1 son considerados normales; valores entre 1 y 2 indican humedad moderada; entre 2 y 3, humedad excesiva; y superior a 3, humedad extrema. Los valores negativos denotan períodos secos: -1 a -2, sequía moderada; -2 a -3, sequía severa; y valores menores a -3, sequía extrema.

Para describir la situación climática regional, se trabajó con un valor promedio mensual para la serie de 20 años (N= 240). Para cada una de las regiones, se utilizaron siete variables derivadas del PDSI mensual: índice del mes en curso (condición actual) [PDSI(n)]; índice del mes previo [PDSI(n-1)]; índice de dos meses previos [PDSI(n-2)]; índice de tres meses [PDSI(n-3)]; y el promedio de los últimos tres meses previos (PDSI3) al mes en curso, para caracterizar la sequía a corto plazo; el índice promedio de los últimos seis meses (PDSI6), sequía a mediano plazo; y el índice promedio de los últimos 12 meses (PDSI12), sequía a largo plazo.

## Análisis estadísticos

Se exploraron y analizaron las variables de incendios mensuales (OI y AQ) para caracterizar las regiones y los años de estudio. Se determinó la estacionalidad de incendios, a partir de un análisis de la varianza no paramétrica de Kruskal Wallis. Se llevaron a cabo sucesivas correlaciones entre los índices de sequía y las variables de incendios para las regiones Sierras (Sierras del Sur y Sierras del Norte), Pampa y Bañados del Río Dulce. Se utilizó la correlación de rango de Spearman no paramétrica porque los datos no estaban distribuidos normalmente, mediante la función `rcorr` del paquete `cor.test` del software estadístico R 3.6.1 (R Core Team, 2019). Para estimar la ocurrencia de incendios a partir de distintas escalas temporales

de sequía, se utilizaron modelos lineales generalizados (GLM), se utilizó la función glm del paquete stats, con distribución de errores Poisson (datos no paramétricos) en entorno R. La elección del modelo que mejor explicó el patrón observado en los datos, se realizó siguiendo el principio de parsimonia, eliminándose las variables sin efecto significativo y a partir del valor AIC (Criterio de información de Akaike, 1976). Previamente se eliminaron las variables que no presentaron correlación significativa con la OI ( $p > 0,05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Patrón anual de incendios

Para el período 2001-2020, se identificaron más de 1,6 millones de hectáreas de área quemada (AQ) y 1418 eventos de incendios con más de 14 ha cada uno (ocurrencia de incendios, OI) en toda la provincia de Córdoba. Los años de mayor afectación por incendios fueron los años 2009, 2013 y 2020. Mientras que los años 2014, 2016 y 2018 fueron los de menor superficie afectada anual (Figura 2).

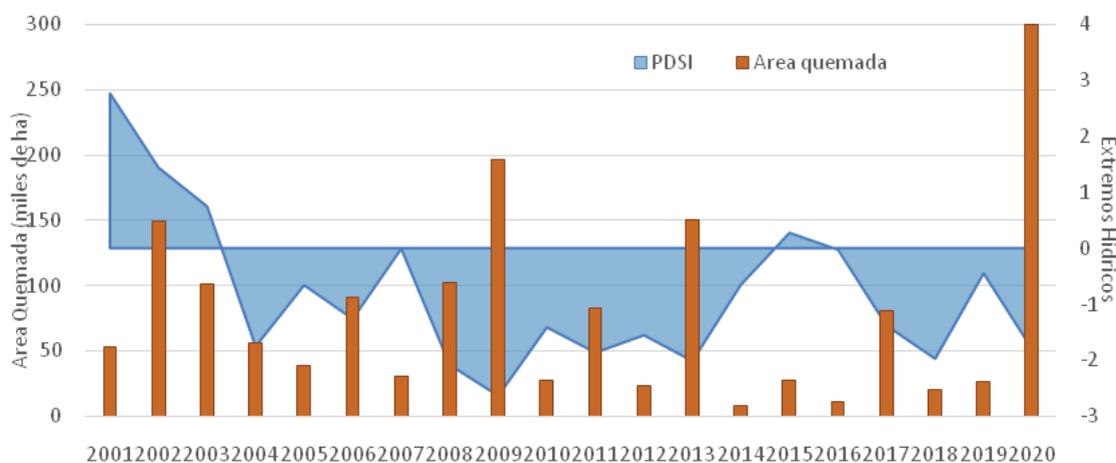
La correlación de Spearman ( $R_s$ ) resultó significativamente alta entre los valores mensuales de área quemada y ocurrencia de incendios ( $R_s=0,80$ ,  $p < 0,0001$ ,  $N=240$ ). Esto quiere decir que los meses con mayor número de incendios se correspondieron a los meses con mayor cantidad de superficie quemada. La variación que existe entre meses, tanto para AQ como para OI, permitió definir una temporada de incendios para toda la provincia, que va desde el mes de julio a noviembre

inclusive. Además, agosto, septiembre y octubre fueron los meses más afectados en cuanto a superficie quemada total y también los meses que mayor dispersión de datos mostraron, indicando la variabilidad que existe entre años (Figura 3). Estudios previos también han indicado una mayor actividad de incendios en Córdoba entre agosto y octubre, época que se caracteriza por presentar déficit hídrico (Miglietta, 1994; Fischer et al., 2012; Argañaraz et al., 2015).

### Frecuencia de incendios

La actividad del fuego, analizada a través de número de ocurrencia de incendios (OI), frecuencia de incendios (FI) y área quemada (AQ), fue diferente en las cuatro regiones naturales estudiadas. Las regiones más afectadas fueron: Bañados del Río Dulce, Sierras del Sur, la región Pampeana y Sierras del Norte. De todas las áreas que ardieron al menos una vez durante el período considerado (aproximadamente el 10% de la superficie provincial), el 26% presentó algún grado de recurrencia, que oscila entre 2 y 11 veces (Tabla 1).

La región Bañados del Río Dulce registró la mayor cantidad de incendios (OI=526) y, en general, cada evento no superó las 1000 ha de extensión (Tabla 1). En esta región predominaron las áreas con FI entre 2 a 5 veces y hubo sitios que se quemaron hasta 11 veces en 20 años (FI = 11). Estudios previos indican que, en estos ambientes, la frecuencia de incendios puede ser anual, debido a las quemas intencionales que promueven el rebrote de los pastos y para controlar leñosas.



**Figura 2.** Superficie total de área quemada anual y valor promedio anual de extremos hídricos para la provincia de Córdoba durante el período 2001-2020

**Tabla 1.** Ocurrencia de incendios (OI), área quemada y porcentaje de la superficie afectada (respecto al total de la superficie provincial) para el período 2001-2020 en las ecorregiones de la provincia de Córdoba

Región	OI	Área Total (ha)	Área quemada total (ha)	Superficie afectada (%)
Pampa	391	10.211.886	260.173	2,54
Sierras del Norte	51	472.760	85.620	18,11
Bolsón Chaqueño	25	1.009.781	16.374	1,62
Llanura Chaqueña	162	1.440.825	67.879	4,71
Bañados del Río Dulce	516	428.657	309.778	72,26
Sierras del Sur	273	2.061.473	817.440	39,65
<i>Total</i>	1418	15.625.384	1,6 millones	9,96

Además, se ha indicado que los pastizales pueden incendiarse fácilmente a causa de los rayos, muy frecuentes al comienzo de la estación lluviosa (Bucher, 2006). La alta FI aquí observada coincide con lo reportado a nivel mundial para sabanas de productividad media (Van Der Werf et al., 2008).

En Sierras del Sur y Sierras del Norte, el área quemada total (sin tener en cuenta la recurrencia) fue equivalente al 40% y 18% de la superficie total, respectivamente (Tabla 1). En Sierras del Norte, la FI no fue mayor a 2 y el incendio de mayor magnitud ocurrió en septiembre de 2006, afectando ~30000 ha. En Sierras del Sur, si bien la mayor parte del área quemada se quemó una sola vez, se registraron sitios con FI de hasta seis veces. La mayoría de los grandes incendios ocurrieron en agosto y septiembre; y a lo largo de los 20 años hubo cuatro eventos de incendios de gran magnitud (>30000 ha). El incendio de mayor extensión sucedió en septiembre de 2013 (70122 ha) en el departamento Calamuchita, al centro-sur de las Sierras del Sur. El segundo evento en magnitud (59000 ha) ocurrió en agosto del 2009 en el extremo sur de Sierras del Sur. Al norte de esta misma región ocurrieron dos grandes eventos: uno en el año 2008 (52273 ha) y otro en 2020 (28000 ha). Si bien se han detectado los mismos grandes eventos reportados por Argañaraz (2016) para los años 2008 y 2009, existen algunas diferencias en cuanto a las magnitudes encontradas y esto podría deberse a las distintas herramientas de teledetección utilizadas. Cabe destacar que, en el año 2020, los incendios en la región se aproximaron a las 300000 ha de AQ, superando todas las estadísticas para el período en cuestión. Otro estudio realizado con Landsat indicó una superficie similar para el año 1988 (Marinelli et al., 2019). Según Argañaraz et al. (2015), la recurrencia del fuego en la región serrana se debe tanto a factores biofísicos como antrópicos, señalando al clima y la geomorfología como los factores más importantes que limitan la ignición y/o propagación del fuego.

En la región Llanura Chaqueña, se registraron

mayoritariamente áreas con FI iguales a uno y un pequeño porcentaje (<1%) de zonas con FI igual a dos. El Bolsón Chaqueño, con 25 incendios detectados, fue la región menos afectada, tanto en AQ como en FI. Tanto para la Llanura como para el Bolsón Chaqueño, no se registraron incendios mayores a 10000 ha. Para las sabanas de la Región Chaqueña se ha indicado que el período de recurrencia de fuego oscila entre los tres y cuatro años, y que la frecuencia de incendios está limitada por la cantidad de combustible (Bravo et al., 2001; 2010). Los incendios suelen comenzar en pastizales y sabanas, y pueden extenderse a los bosques y matorrales circundantes, según la cantidad de combustible fino disponible y la velocidad del viento (Bravo et al., 2001; Tálamo and Caziani, 2003). La baja incidencia de incendios observada durante las dos últimas décadas en las regiones Llanura y Bolsón Chaqueño podría responder a la creciente arbustización del ecosistema, producto del avanzado estado de degradación, falta de manejo y efectos del cambio climático (Karlin 2013; Karlin et al., 2013).

Para la región pampeana, se registraron 256 eventos de incendios, mayoritariamente con FI igual a uno y tamaño medio de 1000 ha. Sin embargo, hubo zonas que alcanzaron FI igual a cuatro; este fue el 1,5% de los casos. El año más afectado fue el 2009 con aproximadamente 50000 ha de AQ. En agosto de ese año ocurrieron dos grandes eventos: sobre la Pampa Loessica Alta, con aproximadamente 10000 ha de AQ cada uno. Respecto a la extensa superficie que alcanza la región, el porcentaje de superficie total afectada por incendios es relativamente pequeña (Tabla 1). Fischer et al. (2012) también han indicado menor actividad de incendios en áreas cultivables de la región central del país. Los regímenes de incendios están controlados por diversos impulsores, como el clima, los patrones de vegetación, la topografía y las actividades humanas a escala de paisaje (Bowman et al., 2011). Las características del paisaje de la Región Pampeana, escasos relictos de bosque pertenecientes al Espinal (Morello

et al., 2012; Oyarzabal et al., 2018), permiten suponer que la mayoría de los incendios ocurren como consecuencia de quemadas controladas sobre campos agrícolas o ganaderos. Igualmente, los grandes eventos podrían haberse iniciado en tierras no cultivables, bajo condiciones meteorológicas y topográficas favorables para su propagación.

Los resultados aquí descriptos pueden presentar ciertos errores de omisión y comisión debido al producto MCD64A1 (resolución gruesa >500 m) (Giglio et al., 2018). Evidentemente, las áreas quemadas pequeñas y espacialmente fragmentadas que son perceptibles a una escala Landsat de 30 m de resolución no están identificadas por MCD64A1 con una resolución de 500 m. Podrían esperarse mayores errores en regiones con predominio de cultivos como en la Región Pampeana; el pobre desempeño del producto MCD64A1 y otros productos de área quemada global sobre tierras de cultivo se han observado en estudios previos (Hall et al., 2016; Zhu et al., 2017). Sin embargo, los sensores de resolución gruesa, como MODIS, tienen la ventaja de imágenes diarias que son esenciales para identificar procesos transitorios, como la quema de barbechos de cultivos previo a la siembra (Hall et al., 2016).

## Incendios y sequías

Para el período de estudio, se identificaron condiciones de deficiencia, normalidad y excesos de humedad de variada duración. Prevalcieron los períodos con déficit hídrico (2004/2006, 2008/2009, 2012/2013, 2017/2018) por sobre los períodos húmedos (2001/2003, 2014/2016) (Figura 2). Ravelo et al. (2014) reportaron extensas áreas con sequías severas y extremas, particularmente en los años 2009 y 2012 en gran parte del territorio provincial. Asimismo, para el año 2018, Zanvettor (2020) indicó sequías moderadas y severas para la zona centro y norte de la provincia. Por otro lado, los ciclos húmedos 2001/2002 y 2014/2016 que ocurrieron en la región, fueron también identificados mediante el uso de índices hídricos, meteorológicos y agroclimáticos por otros autores (García, 2013; Zanvettor et al., 2017; Vicario, 2018; Elcano y Vicario, 2020).

Las Sierras del Sur y Sierras del Norte fueron unificadas para este análisis en la Región Sierras. Si bien la topografía determina una gran variedad de microclimas y, en general hacia el norte las condiciones son más secas y los déficits hídricos son mayores que los que prevalecen hacia el Sur (Cabido et al., 2003), los índices mensuales

**Tabla 2.** Relación entre variables de incendios y sequía meteorológica en las ecorregiones de la provincia de Córdoba

Región y número de casos (N)	Variable	OI		AQ	
		r	p	r	p
<b>Sierras (N=100)</b>	PDSI_ actual	<b>-0,27</b>	0,010	<b>-0,26</b>	0,009
	PDSI-1	<b>-0,26</b>	0,011	<b>-0,23</b>	0,020
	PDSI-2	<b>-0,23</b>	0,027	-0,19	0,063
	PDSI-3	<b>-0,20</b>	0,054	-0,15	0,139
	PDSI_promedio_3meses	<b>-0,27</b>	0,010	<b>-0,23</b>	0,021
	PDSI_promedio_6meses	<b>-0,22</b>	0,033	-0,17	0,082
	PDSI_promedio_12meses	-0,11	0,271	-0,08	0,418
<b>Bañados del Río Dulce (N=100)</b>	PDSI_ actual	<b>-0,23</b>	0,023	-0,07	0,481
	PDSI-1	<b>-0,22</b>	0,031	-0,06	0,557
	PDSI-2	<b>-0,21</b>	0,031	-0,03	0,748
	PDSI-3	<b>-0,22</b>	0,025	-0,03	0,763
	PDSI_promedio_3meses	<b>-0,22</b>	0,031	-0,04	0,689
	PDSI_promedio_6meses	-0,19	0,060	-0,01	0,953
	PDSI_promedio_12meses	-0,10	0,305	0,05	0,620
<b>Pampa (N=100)</b>	PDSI_ actual	<b>-0,27</b>	0,007	<b>-0,26</b>	0,010
	PDSI-1	<b>-0,23</b>	0,020	<b>-0,23</b>	0,019
	PDSI-2	-0,16	0,113	-0,17	0,092
	PDSI-3	-0,15	0,149	-0,16	0,122
	PDSI_promedio_3meses	<b>-0,19</b>	0,054	<b>-0,20</b>	0,049
	PDSI_promedio_6meses	<b>-0,20</b>	0,048	<b>-0,21</b>	0,035
	PDSI_promedio_12meses	-0,12	0,227	-0,13	0,194

r: coeficiente de correlación de Spearman; p: valor de probabilidad (p-valor); área quemada mensual (AQ) y ocurrencia de incendios mensual (OI); índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI). Las relaciones significativas ( $p < 0,05$ ) se resaltan en negrita.

de sequía no mostraron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre ambas regiones.

En la Región Sierras, el número de incendios mensuales (OI) se correlacionó de manera significativa y negativa con todos los indicadores de sequía, excepto para la condición promedio a largo plazo (PDSI12) (Tabla 2). Esto quiere decir que se registró un mayor número de incendios cuando la condición de sequía actual [PDSI(n)] y antecedente en el corto [PDSI(n-1), (n-2), (n-3) y PDSI3] y mediano plazo (PDSI6) fueron mayores (valores de PDSI más negativos). El AQ también resultó mayor cuando la condición de sequía actual y precedentes en el corto plazo fue mayor (Tabla 2). En la Región Pampeana, la OI y el AQ fueron mayores cuando las condiciones de sequía actuales [PDSI(n)], a corto [PDSI(n-1) y PDSI3] y mediano plazo (PDSI6) fueron mayores (Tabla 2). En Bañados del Río Dulce, la OI también aumentó cuando la sequía actual [PDSI(n)] y antecedente a corto plazo fue mayor. El AQ en los Bañados no se relacionó de manera significativa con ninguna variable de PDSI (Tabla 2).

Los resultados indican que la OI fue afectada significativamente por las sequías durante la temporada de incendios en las tres regiones. Es decir, la actividad de incendios aumentó en años con valores de PDSI más negativos. La cantidad de AQ también estuvo regulada por la sequía de la misma temporada en la región Sierras y en la región Pampeana. La mayor actividad de incendios observada durante y después de meses más secos en las Sierras ha sido explicada por la combinación de altas temperaturas máximas, bajas precipitaciones, altas velocidades de viento y por el contenido de humedad de los combustibles (Argañaraz et al., 2015; Argañaraz, 2016). La relación observada en la Región Pampeana respalda lo indicado para la región respecto a los pulsos de los incendios intencionales en la época de mayor déficit hídrico (Cabido et al., 2003; Morello et al., 2012). En Bañados del Río

Dulce, las condiciones de sequía promueven la OI, pero no necesariamente el área afectada. Como se mencionó anteriormente, en la región de los bañados, el fuego es una herramienta de manejo que se usa casi exclusivamente en los pajonales y las zonas quemadas forman manchones pequeños (Bucher, 2006; Morello et al., 2012). Según Bucher (2006), el vapor de agua producido por la presencia de la laguna de Mar Chiquita incrementa la humedad del aire y las lluvias locales. De acuerdo con lo expuesto, inferimos que en Bañados del Río Dulce la extensión de los incendios puede haber sido regulada por las personas, por la presencia de cuerpos de agua entre los pajonales; o bien, por las condiciones de alta humedad ambiental.

En este estudio, el PDSI12 no afectó la actividad de los incendios en ninguna de las regiones evaluadas. Otros estudios hallaron una mayor relación al incluir el PDSI de los dos años anteriores, demostrando que las sequías de varios años pueden aumentar la ocurrencia de incendios (Collins et al., 2006). Asimismo, en este estudio el PDSI ha sido un indicador adecuado de ocurrencia de incendios durante la temporada de fuego como en otras partes del mundo (Westerling et al., 2003; Collins et al., 2006; Preisler y Westerling, 2007; Xiao y Zhuang, 2007; Abatzoglou y Kolden, 2013; Littell et al., 2016).

### Modelo de estimación de incendios

A partir de los resultados obtenidos, se desarrolló un modelo de estimación mensual de ocurrencia de incendios (OI) para las regiones de Sierras, Pampeana y Bañados, en función de la sequía meteorológica caracterizada por el PDSI. Todas las variables incluidas en los modelos fueron significativas y se estimó el intervalo de confianza (95%) para cada modelo (Tabla 3). El modelo ajustado para la Región Sierras indicó que el PDSI (n-1) y PDSI(n-2) tuvieron un efecto negativo;

**Tabla 3.** Parámetros estimados y valores p para el Modelo Lineal Generalizado

Región	Variables seleccionadas	Coficiente	Intervalo de confianza del 95 %		Pr(> z )
Sierras	Intercept	0,5528	0,5899	0,9092	***
	PDSI(n-1)	-0,3811	-0,6416	0,1287	**
	PDSI(n-2)	-0,3290	-0,5952	-0,0638	*
	PDSI12	0,7232	0,5054	0,9467	***
Pampas	Intercept	0,89257	0,7474	1,0294	***
	PDSI(n)	-0,1869	-0,3433	-0,0358	*
	PDSI(n-1)	-0,1478	-0,3025	0,0090	.
Bañados del Río Dulce	Intercept	1,2056	1,0756	1,3290	***
	PDSI(n)	-0,1165	-0,1727	-0,0615	***

Cód. significancia: 0 '\*\*\*'; 0,001 '\*\*'; 0,01 '\*'; 0,05 '.'

y el PDSI12, un efecto positivo. Es decir, que las condiciones de sequía precedentes inmediatas (valores de PDSI más negativos) condicionaron la actividad de los incendios de la misma temporada, favoreciéndolos.

Por otro lado, los incendios también se incrementaron cuando la condición de humedad promedio de los 12 meses previos fue mayor. Estudios previos en las Sierras también han reportado mayor ocurrencia de incendios luego de uno o dos años con condiciones de humedad por encima de lo normal (Argañaraz et al., 2015). Existen evidencias de que, en ecosistemas áridos y semiáridos, la ocurrencia de incendios tiende a ser mayor luego de años en los que las precipitaciones superan los valores normales, como consecuencia de la mayor acumulación de biomasa combustible (Grau y Veblen 2000; Van Der Werf et al. 2008; Bravo et al., 2010; Archibald et al., 2013).

Los modelos ajustados, tanto para la Región Pampeana como para Bañados del Río Dulce, incluyeron la variable PDSI(n), siendo la única variable con efecto significativo para los Bañados. La falta de asociaciones con otros indicadores distintos al PDSI(n) en estas regiones podría sugerir que las variables meteorológicas aquí utilizadas no son las adecuadas o que los incendios están condicionados por otras variables no consideradas en este estudio. Por otro lado, a los fines metodológicos de este trabajo, hemos englobado a la Región Pampeana como un todo uniforme, sin tener en cuenta las características ambientales y antrópicas de menor escala. Las interacciones entre el clima, el pastoreo, la agricultura y el fuego son complejas y pueden variar regionalmente con diferentes patrones de uso de la tierra (Van Der Werf et al., 2008; Bowman et al., 2011).

Con respecto a los Bañados, los resultados sugieren que ninguna condición de sequía a corto plazo [PDSI(n-1), (n-2), (n-3) y PDSI3] jugó un rol clave en los incendios. Como se mencionó anteriormente, es muy probable que los incendios en la región estén influenciados principalmente por la actividad antrópica (Bucher, 2006; Kunst, 2011).

Los modelos sugieren que la respuesta a la sequía no fue para todas las regiones de igual manera. Sin embargo, los índices de sequía podrían ser útiles para sustentar pronósticos de incendio desarrollados en diversas escalas temporales o espaciales (Preisler y Westerling, 2007). Es muy probable que las diferencias regionales aquí observadas estén regidas por variaciones en la dinámica del combustible asociadas con los tipos de vegetación regionales y subregionales dominantes (Collins et al., 2006). Hay evidencia

de que la sequía interactúa con otros controles (productividad, topografía, clima de incendios, actividades de manejo) no tenidos en cuenta aquí, para afectar la intensidad, severidad, extensión y frecuencia de los incendios (Littell et al., 2016). Para ello, es fundamental la existencia y disponibilidad de registros de incendios espacialmente explícitos (Morgan et al., 2001). Estudios en otras escalas, tanto temporales como espaciales, podrían ayudar a mejorar el entendimiento de la relación sequía-incendio. De todos modos, se debe tener en cuenta que los factores antropogénicos pueden desacoplar eficazmente la relación entre el clima y el fuego, debido a las igniciones humanas intencionales, el uso de la tierra, la fragmentación del paisaje y la supresión del fuego (Pausas y Keeley, 2014; Turco et al., 2017).

## CONCLUSIONES

Durante el período 2001-2020 se quemaron en Córdoba 1,6 millones de hectáreas. Esto equivale al 10% de la superficie provincial. Si bien el clima de la región posee características que lo hacen propenso al fuego, no existe una única condición que determine la ocurrencia ni extensión de los incendios. El análisis presentado muestra que la actividad de incendios en las distintas ecorregiones de la provincia está significativamente relacionada con la sequía meteorológica. En este trabajo se demostró que esta relación se puede utilizar para estimar la ocurrencia de incendios con 1, 2 y hasta 12 meses de anticipación, según la región.

La Región Sierras fue la más afectada en cuanto a superficie quemada y los resultados sugieren una respuesta positiva a la ocurrencia de incendios ante condiciones de mayor humedad del año anterior. También podría esperarse una mayor actividad de incendios después de tres meses de mayor déficit hídrico. La Región Bañados del Río Dulce fue la región con mayor cantidad de incendios y estos no pudieron estimarse a partir de las condiciones de sequía precedentes. La extensión de la superficie afectada en esta región parece no estar relacionada a las condiciones de sequía indicadas por el PDSI, sino a factores de fuerte incidencia antrópica.

Los modelos aquí desarrollados aportan al entendimiento temporal del comportamiento de los incendios, sobre la base de las condiciones de sequía anteriores, para cada ecorregión en su totalidad. Es importante señalar que estos resultados solo pueden servir como una prueba de principio y de manera generalizada, pues los modelos ajustan al promedio del PDSI de cada

región. El mapeo de la recurrencia de incendios y la identificación de áreas con frecuencia media y alta podrían ayudar en la construcción de mapas de riesgo de incendios para las distintas regiones. Los resultados aquí expuestos pretenden aportar información aún no revelada y representan una línea de investigación futura indispensable para la comprensión de la relación sequía-incendio.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la fuente de datos del índice de sequía de Palmer (PDSI) y al personal del Centro de Relevamientos de Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN) de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Agradecen también al diseñador gráfico Alejandro Barbeito. Reconocemos el uso de datos y/o imágenes del Sistema de Información sobre Incendios para el Manejo de Recursos (FIRMS) de la NASA (<https://earthdata.nasa.gov/firms>), parte del Sistema de Información y Datos del Sistema de Observación de la Tierra de la NASA (EOSDIS).

## BIBLIOGRAFÍA

- Abatzoglou, J. T. y Kolden, C. A. (2013). Relationships between climate and macroscale area burned in the western United States. *International Journal of Wildly Fire*, 22(7), 1003–1020. <https://doi.org/10.1071/WF13019>
- Abatzoglou, J. T., Kolden, C. A., Williams, A. P., Lutz, J. A. y Smith, A. M. S. (2017). Climatic influences on interannual variability in regional burn severity across western US forests. *International Journal of Wildly Fire*, 26(4), 269–275. <https://doi.org/10.1071/WF16165>
- Abatzoglou, J. T., Williams, A. P., Boschetti, L., Zubkova, M. y Kolden, C. A. (2018). Global patterns of interannual climate–fire relationships. *Global Change Biology*, 24(11), 5164–5175. <https://doi.org/10.1111/gcb.14405>
- Akaike, H. (1976). Canonical correlation analysis of time series and the use of an information criterion. In R.K. Mehra y D.G. Lainiotis (Eds.), *Mathematics in Science and Engineering*, 126, 27–96. Elsevier.
- Aldersley, A., Murray, S. J. y Cornell, S. E. (2011). Global y regional analysis of climate and human drivers of wildfire. *Science of The Total Environment*, 409(18), 3472–3481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.032>
- Archibald, S., Lehmann, C. E. R., Gómez-Dans, J. L. y Bradstock, R. A. (2013). Defining pyromes and global syndromes of fire regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(16), 6442–6447. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211466110>
- Archibald, S., Nickless, A., Govender, N., Scholes, R. J. y Lehsten, V. (2010). Climate and the inter-annual variability of fire in southern Africa: a meta-analysis using long-term field data y satellite-derived burnt area data. *Global Ecology y Biogeography*, 19(6), 794–809. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00568.x>
- Argañaraz, J. P. (2016). *Dinámica espacial del fuego en las Sierras de Córdoba*. Tesis de doctorado publicada (Repositorio Digital UNC). Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Argañaraz, J. P., Cingolani, A. M., Bellis, L. M. y Giorgis, M. A. (2020). Fire incidence along an elevation gradient in the mountains of central Argentina. *Ecología Austral*, 30(2), 268–281. <https://doi.org/10.25260/ea.20.30.2.0.1054>
- Argañaraz, J. P., Landi, M. A., Bravo, S. J., Gavier-Pizarro, G. I., Scavuzzo, C. M. y Bellis, L. M. (2016). Estimation of Live Fuel Moisture Content From MODIS Images for Fire Danger Assessment in Southern Gran Chaco. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(12), 5339–5349. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2575366>
- Argañaraz, J. P., Gavier-Pizarro, G., Zak, M. y Bellis, L. M. (2015). Fire Regime, Climate, and Vegetation in the Sierras de Córdoba, Argentina. *Fire Ecology*, 11(1), 55–73. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1101055>
- Bond, W. J. y Keeley, J. E. (2005). Fire as a global ‘herbivore’: the ecology y evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 20(7), 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W. J., Cochrane, M. A., D’Antonio, C. M., Defries, R., Johnston, F. H., Keeley, J. E., Krawchuk, M., Kull, C. A., Mack, M., Moritz, M. A., Pyne, S., Roos, C. I., Scott, A. C., Sodhi, N. S. y Swetnam, T. W. (2011). The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography*, 38(12), 2223–2236. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x>
- Bravo, S., Kunst, C., Gimenez, A. y Moglia, G. (2001). Fire regime of a *Elionorus muticus* Spreng. savanna, western Chaco region, Argentina. *International Journal of Wildly Fire*, 10(1), 65–72. <https://doi.org/10.1071/WF01014>
- Bravo, S., Kunst, C., Grau, R. y Aráoz, E. (2010). Fire-rainfall relationships in Argentine Chaco savannas. *Journal of Arid Environments*, 74(10), 1319–1323. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.04.010>
- Bucher, E. H., Gavier Pizarro, G. y Curto, E. E. (2006). Cap. 1: Síntesis geográfica. En E. H. Bucher. (Ed.), *Bañados del Río Dulce y Laguna Mar Chiquita (Córdoba, Argentina)* (15–27). Academia Nacional de Ciencias.
- Cabido, D., Cabido, M., Garré, S. M., Gorgas, J. A., Miatello, R., Ravelo, A., Rambaldi, S., Tassile, J. L., Abril, E., Acuña, H., Arguello, L., Báez, S., Bárbaro, N. O., Burkat, R., Cantero, J. J., Cantú, M., Cisneros, J. M., Coirini, R. O., Herrero, M., ...Zanor, G. (2003). *Regiones naturales de la Provincia de Córdoba*. Publicaciones Técnicas: Agencia Córdoba D. A. C. y T.
- Cabrera, A. L. (1976). Regiones fitogeográficas argentinas. En W. F. Kugler (Ed.), *Enciclopedia*

- Argentina de Agricultura y Jardinería (1-85). Acme.
- Capitanelli, J. (1979). Clima. En J. Vázquez, R. Miatello y M. Roqué (Eds.), *Geografía Física de la Provincia de Córdoba* (213-296). Boldt.
- Collins, B. M., Omi, P. N. y Chapman, P. L. (2006). Regional relationships between climate and wildfire-burned area in the Interior West, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(3), 699–709. <https://doi.org/10.1139/x05-264>
- Dracup, J. A., Lee, K. S. y Paulson, E. G. (1980). On the definition of droughts. *Water Resources Research* Washington, 16(2), 297–302. <https://doi.org/10.1029/WR016i002p00297>
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2013). ArcGIS (versión 10.2) [Software]. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Elcano, G. y Vicario, L. (2020). *Evaluación de sequías hidrológicas en los tributarios de la cuenca alta del río Suquia, provincia de Córdoba*. Informe interno. Instituto Nacional del Agua, Centro de la Región Semiárida (INA-CIRSA). [https://www.ina.gov.ar/cirsa/pdf/Actualizacion\\_Evaluacion\\_sequias\\_hidrologicas\\_tributarios\\_dique\\_San\\_Roque.pdf](https://www.ina.gov.ar/cirsa/pdf/Actualizacion_Evaluacion_sequias_hidrologicas_tributarios_dique_San_Roque.pdf)
- Fischer, M. A., Di Bella, C. M. y Jobbágy, E. G. (2012). Fire patterns in central semiarid Argentina. *Journal of Arid Environments*, 78, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.11.009>
- García, C. L. (2013). *Utilización de información satelital y terrestre para el manejo integrado del recurso hídrico de una cuenca serrana en la Provincia de Córdoba, Argentina*. Tesis de Doctorado publicada (Repositorio Digital UNC). Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1659/Garc%EDa%20-%20UTILIZACI%20DE%20INFORMACI%20SATELITAL.%20.pdf?sequence=1>
- Giglio, L., Loboda, T., Roy, D. P., Quayle, B. y Justice, C. O. (2009). An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sensing of Environment*, 113(2), 408–420. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.006>
- Giglio, L., Schroeder, W. y Justice, C. O. (2016). The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 178, 31–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054>
- Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D. P., Humber, M. L. y Justice, C. O. (2018). The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of Environment*, 217, 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>
- Giorgis, M. A., Cingolani, A. M. y Cabido, M. (2013). El efecto del fuego y las características topográficas sobre la vegetación y las propiedades del suelo en la zona de transición entre bosques y pastizales de las sierras de Córdoba, Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 48(3-4), 493–513. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v48.n3-4.7555>
- Giorgis, M. A., Lopez, M., Rivero, D. y Cingolani, A. M. (2015). Cambios climáticos en las sierras de Córdoba (Argentina) durante el holoceno. Aportes a las reconstrucciones climáticas a través del análisis de silicofitolitos del sitio arqueológico El Alto 3. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 50(3), 361-375. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v50.n3.12526>
- Giorgis, M. A., Cingolani, A., Gurchich, D., Tecco, P., Chiapella, J., Chiarini, F. y Cabido, M. (2017). Changes in floristic composition and physiognomy are decoupled along elevation gradients in central Argentina. *Applied Vegetation Science*, 20(4), 558–571. <https://doi.org/10.1111/avsc.12324>
- Grau, H. y Veblen, T. (2000). Rainfall variability, fire and vegetation dynamics in neotropical montane ecosystems in north-western Argentina. *Journal of Biogeography*, 27(5), 1107–1121. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2000.00488.x>
- Hall, J. V., Loboda, T. V., Giglio, L. y McCarty, G. W. (2016). A MODIS-based burned area assessment for Russian croplands: Mapping requirements and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 184, 506–521. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.022>
- Holden, Z. A., Swanson, A., Luce, C. H., Jolly, W. M., Maneta, M., Oyler, J. W., Warren, D. A., Parsons, R. y Affleck, D. (2018). Decreasing fire season precipitation increased recent western US forest wildfire activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(36), E8349–E8357. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1802316115>
- Karlin, M. S. (2013). *Cambio climático en zonas semiáridas: El caso Chaco Árido*. Editorial Académica Española.
- Karlin, M. S., Karlin, U. O., Coirini, R. O., Reati, G. J. y Zapata, R. M. (2013). *El Chaco Árido*. Encuentro Grupo Editor.
- Keeley, J. E. (2004). Impact of antecedent climate on fire regimes in coastal California. *International Journal of Wildland Fire*, 13(2), 173-182. <https://doi.org/10.1071/WF03037>
- Keyantash, J. y Dracup, J. A. (2002). The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1167–1180. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1167>
- Krawchuk, M. A. and Moritz, M. A. (2011). Constraints on global fire activity vary across a resource gradient. *Ecology*, 92(1), 121–132. <https://doi.org/10.1890/09-1843.1>
- Kunst, C. (2011). Ecología y uso del fuego en la región chaqueña Argentina. *Boletín del CIDEU*, 10, 81-105. <http://rabida.uhu.es/dspace/handle/10272/5521>
- Kunst, C., Bravo, S., Moscovich, F., Herrera, J., Godoy, J. y Vélez, S. (2003). Fecha de aplicación de fuego y diversidad de herbáceas en una sabana de *Elionorus muticus* (Spreng) O. Kuntze. *Revista Chilena de Historia Natural*, 76(1), 105–115. <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2003000100010>
- Littell, J. S., Peterson, D. L., Riley, K. L., Liu, Y. y Luce, C. H. (2016). A review of the relationships between drought and forest fire in the United States. *Global Change Biology*, 22(7), 2353–2369. <https://doi.org/10.1111/gcb.13275>
- Luti, R., Bertrán de Solís, M. A., Galera, M. F., Müller de Ferreira, N., Alday, A., Nores, M., Herrera, M. A. y

- Barrera, J. C. (1979). Vegetación. En J. B. Vázquez, R. A. Miatello y M. E. Roqué (Eds.), *Geografía física de la provincia de Córdoba* (297–368). Boldt.
- Marinelli, M. V., Bustos Revol, S., Viotto, S., Clemente, J. P., Benítez, J., Mari, N., Scavuzzo, C. M. y Argañaraz, J. P. (2019). *Elaboración de la base de datos de incendios 1987-2018 para las Sierras de Córdoba mediante imágenes Landsat*. Documento presentado en IV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Ambiental. Florencio Varela, Buenos Aires, Argentina.
- Mayr, M. J., Vanselow, K. A. y Samimi, C. (2018). Fire regimes at the arid fringe: A 16-year remote sensing perspective (2000–2016) on the controls of fire activity in Namibia from spatial predictive models. *Ecological Indicators*, 91, 324–337. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.022>
- Miglietta, S. (1994). *Patrón de ocurrencia de incendios y su efecto sobre la vegetación en el Bosque Serrano de Córdoba*. Tesis de Maestría no publicada. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Morello, J. H., Protomastro, J., Sancholuz, L. y Blanco, C. (1985). Estudio macroecológico de los Llanos de La Rioja. *Serie del Cincuentenario de la Administración de Parques Nacionales*, 5, 1-53.
- Morello, J. H., Matteucci, S., Rodríguez, A. y Silva, M. (2012). *Ecorregiones y Complejos Ecosistémicos Argentinos*. Orientación Gráfica Editora.
- Oyarzabal, M., Clavijo, J., Oakley, L., Biganzoli, F., Tognetti, P., Barberis, I., Maturo, H. M., Aragón, R., Campanello, P. I., Prado, D., Oesterheld, M. y León, R. J. C. (2018). Unidades de vegetación de la Argentina. *Ecología Austral*, 28(1), 040–063. <https://doi.org/10.25260/ea.18.28.1.0.399>
- Palmer, W. (1965). *Meteorological drought*, Research Paper n° 45. U.S. Department of Commerce, Weather Bureau.
- Pausas, J. y Keeley, J. (2009). A Burning Story: The Role of Fire in the History of Life. *BioScience*, 59(7), 593–601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>
- Pausas, J. y Keeley, J. (2014). Abrupt Climate-Independent Fire Regime Changes. *Ecosystems*, 17(6), 1109–1120. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9773-5>
- Pausas, J. y Keeley, J. (2019). Wildfires as an ecosystem service. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(5), 289–295. <https://doi.org/10.1002/fee.2044>
- Preisler, H. K. y Westerling, A. L. (2007). Statistical Model for Forecasting Monthly Large Wildfire Events in Western United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(7), 1020–1030. <https://doi.org/10.1175/JAM2513.1>
- R Core Team. (2019). R: A Language and Environment for Statistical Computing (versión 3.6.1) [Software]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>
- Ravelo, A. C., Zanvetor, R. E. y Boletta, P. E. (2014). *Atlas de Sequías de la República Argentina*. Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN). <https://www.crean.unc.edu.ar/atlas-de-sequias-2/>
- Ravelo, A. C., Planchuelo, A., Zanvetor, R. E. y Boletta, P. E. (2016). Sistema de monitoreo y evaluación de las sequías en Argentina. *Agrometeoros*, 24(1). <https://doi.org/10.31062/agrom.v24i1.24886>
- Sayago, M. (1969). Estudio fitogeográfico del norte de Córdoba. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias*, 46, 123-247.
- Tálamo, A. y Caziani, S. (2003). Variation in woody vegetation among sites with different disturbance histories in the Argentine Chaco. *Forest Ecology and Management*, 184(1–3), 79–92.
- Turco, M., Von Hardenberg, J., AghaKouchak, A., Llasat, M. C., Provenzale, A. y Trigo, R. M. (2017). On the key role of droughts in the dynamics of summer fires in Mediterranean Europe. *Scientific Reports*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00116-9>
- van der Werf, G., Ryerson, J., Giglio, L., Gobron, N. y Dolman, A. (2008). Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(3), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2007GB003122>
- Vicario, L. (2018). Evaluación de sequías hidrometeorológicas en la estación San Roque, perteneciente a una cuenca serrana de la provincia de Córdoba. Informe interno. Instituto Nacional del Agua, Centro de la Región Semiárida (INA-CIRSA). <https://www.ina.gov.ar/cirsa/index.php?seccion=4>
- Westerling, A., Gershunov, A., Brown, T., Cayan, D. y Dettinger, M. (2003). Climate and wildfire in the western United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(5), 595-604. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-5-595>
- Westerling, A., Hidalgo, H., Cayan, D. y Swetnam, T. (2006). Warming and earlier spring increase Western U.S. forest wildfire activity. *Science*, 313(5789), 940–943. <https://doi.org/10.1126/science.1128834>
- Xiao, J. y Zhuang, Q. (2007). Drought effects on large fire activity in Canadian and Alaskan forests. *Environmental Research Letters*, 2(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/044003>
- Zanvetor, R.E. (2020). *Detección, evaluación y pronóstico de sequías y excesos hídricos en Argentina*. Tesis de Doctorado no publicada. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Zanvetor, R. E., Ravelo, A. C., Thomasz, E. O. y Sánchez, S. S. (2017). Evaluación agroclimática y económica de los efectos adversos de excesos hídricos en la región pampeana argentina. *Revista Argentina de Agrometeorología*, 8, 1–13. [https://www.siteaada.org/\\_files/ugd/cf1a17\\_733bf1638c604c148ef874dff8ddb00f.pdf](https://www.siteaada.org/_files/ugd/cf1a17_733bf1638c604c148ef874dff8ddb00f.pdf)
- Zhu, C., Kobayashi, H., Kanaya, Y. y Saito, M. (2017). Size-dependent validation of MODIS MCD64A1 burned area over six vegetation types in boreal Eurasia: Large underestimation in croplands. *Scientific Reports*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03739-0>