

EVALUACIÓN DE INCENDIOS EN ÁREAS PERIURBANAS DE LA CIUDAD DE CORRIENTES (ARGENTINA) DURANTE LA SEQUÍA EXTREMA DEL AÑO 2020

*Humberto Smichowski¹, María del Rosario Montiel², Verónica Romero³, Martín Kowalewsk³,
Félix Ignacio Contreras^{1,2}*
CECOAL – CONICET

RESUMEN

La prevención y alerta temprana de los riesgos vinculados a la variabilidad climática, son fundamentales para reducir al máximo la manifestación de un determinado riesgo. No obstante, ante la imposibilidad de impedir que este ocurra, es de igual importancia realizar un seguimiento, tanto espacial como temporal de la amenaza. En este sentido, los eventos extremos de sequía en la región del noreste argentino durante el año 2020, sumado a prácticas culturales y el mal manejo del fuego, han generado significativos focos de incendios, afectando vastas superficies de la región. Ante lo expuesto, el objetivo del trabajo es medir y analizar las zonas afectadas por la manifestación de incendios en el área periurbana de la ciudad de Corrientes (Argentina), aplicando herramientas de evaluación de incendios con Google Earth Engine. Se pudo corroborar la veracidad de los resultados, a la vez de proponer una metodología de análisis complementario que permita la obtención de información con mayor precisión.

Palabras clave: Incendios; Teledetección; Imágenes Satelitales; Eventos extremos de sequía; Google Earth Engine; Corrientes;

EVALUATION OF FIRES IN PERI-URBAN AREAS OF THE CITY OF CORRIENTES (ARGENTINA) DURING THE EXTREME DROUGHT OF THE YEAR 2020

ABSTRACT

Prevention and early warning of risks related to climate variability are essential to minimize the manifestation of a certain risk. However, given the impossibility of preventing this from occurring, it is equally important to monitor the threat, both spatially and temporally. In this sense, extreme drought events in the northeastern region of Argentina during 2020, added to cultural practices and poor fire management, have generated significant sources of fires, affecting vast areas of the region. Given the above, the objective of the work is to measure and analyze the areas affected by the manifestation of fires in the periurban area of the city of Corrientes (Argentina), applying fire assessment tools with Google Earth Engine. It was possible to corroborate the veracity of the results while proposing a complimentary analysis methodology that allows obtaining information with greater precision.

Keywords: Fires; Remote Sensing; Extreme droughts events; Google Earth Engine; Corrientes.

¹ Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CONICET – UNNE) (Argentina). Ruta provincial N° 5 km 2,5 CP: 3400, Corrientes – Argentina.

² Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura – Universidad Nacional del Nordeste (Argentina). Avenida Libertad 5460, Corrientes – Argentina.

³ Estación Biológica Corrientes (CONICET) (Argentina). Ruta Provincial 8 km 7, San Cayetano – Corrientes – Argentina.

E-mail: cepismichowski@gmail.com , mdrmoncielg@gmail.com , lorenvromer@gmail.com , martinkow@gmail.com , figcontreras@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Conocer la repercusión ambiental asociada a la manifestación de eventos extremos, debe constituir uno de los principales objetivos de la ciencia geográfica, a fin de considerar futuros escenarios de cambio global. El riesgo de eventos extremos, involucra múltiples variables de contexto, entre las que se encuentran los efectos del cambio climático que genera vulnerabilidad del paisaje, el crecimiento demográfico, los nuevos polos de desarrollo industrial, y factores políticos que influyen en la gestión integral de riesgo como la internalización e implementación de una política pública (ALCÁNTARA DÍAZ *et al.*, 2019). En este sentido, los incendios son disturbios de origen natural o antrópico que produce cambios en los ecosistemas y su impacto puede verse reflejado tanto a nivel global, regional y local. Es por ello que disponer de una cartografía de perímetros de áreas quemadas es importante para comprender las tendencias a lo largo del tiempo en cuanto al grado de afección de los incendios en un determinado territorio, así como facilitar su prevención (BOTELLA-MARTÍNEZ *et al.*, 2017).

Los incendios, sobre todo los de gran magnitud, afectan la sucesión natural de los ecosistemas de manera directa, y los ciclos biogeoquímicos, el clima local y otras variables de manera indirecta (CRUTZEN *et al.*, 1990; HOFFMANN *et al.*, 2003). Pueden llegar a eliminar gran parte, o incluso la totalidad de la cubierta protectora vegetal, con la consiguiente pérdida de los agregados del suelo, aumentando en gran medida su erodabilidad (NEARY *et al.*, 2005). A su vez producen una recuperación más lenta de la vegetación, generando mayores acumulaciones de combustibles gruesos, incrementando la severidad de futuros incendios (LENTILE *et al.*, 2006; BOTELLA-MARTÍNEZ *et al.*, 2017). Tras un incendio se producen efectos directos en el ecosistema que incluyen la pérdida de la materia orgánica y los cambios en la materia inorgánica, así como en el potencial de supervivencia de la vegetación a corto y medio plazo (GUILLEN-COGOLLOS *et al.*, 2017). Este daño ligado a la alta severidad de quemado puede incluso afectar a los flujos energéticos instantáneos (SÁNCHEZ *et al.*, 2009) y a su resiliencia (PAULA *et al.*, 2009; TESSLER *et al.*, 2014), llevando al ecosistema a estadios irreversibles, provocando una pérdida de servicios ambientales (GOMEZ- SANCHEZ *et al.*, 2017). En las zonas donde la severidad haya sido baja e incluso moderada, quedarán árboles vivos, pero debilitados, quedando muy expuestos ante organismos invasores, originando foco de plagas e ingreso de especies invasoras (BOTELLA-MARTÍNEZ *et al.*, 2017; GIBSON *et al.*, 2009). Por otra parte, también inciden sobre las concentraciones de gases de efecto invernadero, pérdida de biodiversidad animal, como también el desencadenamiento de daños hacia las personas, infraestructuras y económicos (OMI, 2005; CHUVIECO, 2009; BOTELLA-MARTÍNEZ *et al.*, 2017).

Los incendios se han manifestado de forma de recurrente en diferentes territorios en todo el planeta. En Argentina durante el 2020 se registraron incendios en 22 de las 23 provincias que componen el territorio nacional, con consecuencias catastróficas (MAYDS, 2020). En la región Chaqueña (N de Argentina y S de Paraguay), el fuego es utilizado como herramienta de manejo y limpieza de la vegetación (KUNST *et al.*, 2003; BOLETTA *et al.*, 2006; IRIGOIN, 2018), y constituye una de las regiones más afectadas por incendios de la Argentina (DI BELLA *et al.*, 2011), siendo la provincia de Corrientes la que presenta mayor incidencia de incendios. Según Informes del Grupo de Recursos Naturales del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Corrientes, hasta fines del mes septiembre el área quemada fue de unas 484.748 ha, un 5% de la superficie provincial (KURTZ *et al.*, 2020), y muchos focos de incendios continuaron activos los meses siguientes, potenciados por la influencia de las condiciones climáticas de la región, las cuales son importantes tener en cuenta, en relación con la manifestación de incendios.

Para facilitar la prevención de este disturbio, así como comprender en el tiempo las tendencias del mismo sobre el territorio, surge la cartografía de perímetros de áreas quemadas (BOTELLA-MARTÍNEZ *et al.*, 2017). El entendimiento de un incendio por medio del estudio de su extensión y su severidad es fundamental para extrapolar a otras zonas las actuaciones preventivas y de determinar las mejores intervenciones de extinción llegada el caso (GUILLEN-COGOLLOS *et al.*, 2017). En este sentido, la teledetección, y más concretamente el uso de imágenes satelitales, tiene cada vez más

relevancia en la gestión integral de los incendios (BOTELLA-MARTÍNEZ *et al.*, 2017). Las diversas tecnologías desarrolladas en materia de sensores remotos espaciales en la actualidad permiten una rápida detección y cuantificación de las superficies afectadas por el fuego (MATTAR *et al.*, 2012). La gran capacidad de cobertura espacial y alta frecuencia de observación que proveen los sensores satelitales junto a la rapidez con que se pueden obtener los datos, hacen de ellos un valioso recurso para la detección y cartografía de incendios (CHUVIECO, 2008). Existen diversos índices espectrales para la identificación de áreas quemadas a partir de la reflectividad sobre imágenes de satélite (BASTARRIKA *et al.*, 2011). El *Normalized Burn Ratio* (NBR) combina las bandas del infrarrojo cercano y el de onda corta para distinguir entre las zonas quemadas y las no quemadas, e incluso ofrecer información sobre la variación en la severidad del fuego dentro de la zona quemada (KEY *et al.*, 2006).

El mapeo de áreas quemadas en periodos de tiempo además requiere trabajo con series de imágenes satelitales de distintos momentos. *Google Earth Engine*, (GEE, <https://earthengine.google.com>) surge como una alternativa para eliminar la limitante computacional que significa la incapacidad de los usuarios para analizar la gran cantidad de datos producidos durante todos los años de sensoramiento remoto (PERILLA *et al.*, 2020). La plataforma de procesamiento y desarrollo GEE posibilita el acceso a petabytes de imágenes satelitales y conjuntos de datos espaciales en la nube para su análisis a escala planetaria (ANAYA *et al.*, 2018). Está ligado directamente a varios programas satelitales (Landsat, Sentinel, MODIS, etc) que permiten integrar en las bases de datos las imágenes que acaban de ser tomadas, transformándose en una solución innovadora para afrontar problemas globales, dando resultados velozmente (GORELICK *et al.*, 2017). Los productos obtenidos pueden ser posteriormente descargados en equipos de cómputo locales, lo cual abre nuevas vías para la investigación e implementación de procesos sobre grandes volúmenes de datos (LISS *et al.*, 2017; ANAYA *et al.*, 2018).

Teniendo en cuenta lo expresado, se plantea como objetivo medir y analizar las superficies quemadas en el año 2020 en el área periurbana de la ciudad de Corrientes utilizando imágenes Sentinel 2A y GEE. A su vez, se calcularán las anomalías de precipitaciones para relacionar la manifestación de incendios y su magnitud, con las condiciones climáticas de la región en el periodo de análisis.

Aplicando una metodología para la construcción de un mosaico anual, junto con el desarrollo de un índice de densidad de incendios (IDI), se intentará proporcionar una herramienta ágil y eficaz que permita cuantificar la superficie quemada en un periodo determinado con técnicas de teledetección.

2. METODOLOGÍA

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

El presente trabajo se enmarca en el área periurbana de la localidad de Corrientes ubicada sobre el extremo noroccidental, más precisamente los municipios Corrientes, Riachuelo, Paso de la Patria y Santa Ana de los Guácaras y abarca una superficie de 83.598 ha (Figura 1). Al estar limitada por el río Paraná al norte y al oeste, el crecimiento de la infraestructura urbana se ve forzada a orientarse hacia el E, SE y S respectivamente (CONTRERAS *et al.*, 2015). No obstante, y pese a ser un área relativamente reducida, es posible visualizar una gran variedad de ambientes pertenecientes al Chaco Húmedo con bosques y cañadas (OYARZABAL *et al.*, 2018), compuesto por un mosaico complejo de comunidades cuya distribución depende de la topografía y régimen hídrico. Presenta una asociación de pastizales de *Andropogon lateralis* y una gran diversidad de humedales conocidos localmente como cañadas, esteros y lagunas. A diferencia del río Paraná, sus aguas dependen exclusivamente de precipitaciones locales, con lo cual, sus respuestas hidrológicas responden inmediatamente a los eventos extremos, lo que conlleva a que en periodos reduzcan sus niveles de agua (MARTÍNEZ *et al.*, 2021) o como en el caso de las lagunas someras, se sequen por completo, disminuyendo hasta un 25% el número de cubetas con agua (CONTRERAS *et al.*, 2016).

Anualmente se registran 1.400 mm, los cuales pueden variar normalmente entre 1.200 y 1.500, en ciclos que duran alrededor de dos años y está muy afectada por el fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENSO). A partir del año 2015 y de manera consecutiva por tres años se ha manifestado fenómeno de El Niño. Desde el año 2016 al 2018 se han registrado precipitaciones que han superado los 2.000 mm anuales, 600 mm más de lo normal (CONTRERAS *et al.*, 2020:7).

El área de estudio se caracteriza por un uso principalmente residencial de la tierra. Las actividades agrícolas se reducen a pequeños viveros de hortalizas, la actividad ganadera es más bien de subsistencia y no existen parques industriales, por lo que es posible visualizar un dominio de paisajes naturales en el área periurbana de la ciudad.

FIGURA 1

Área periurbana de la ciudad de Corrientes. 1) Incendio Aeropuerto. 2) Incendios Santa Ana. 3) Incendios Parque Provincial San Cayetano.

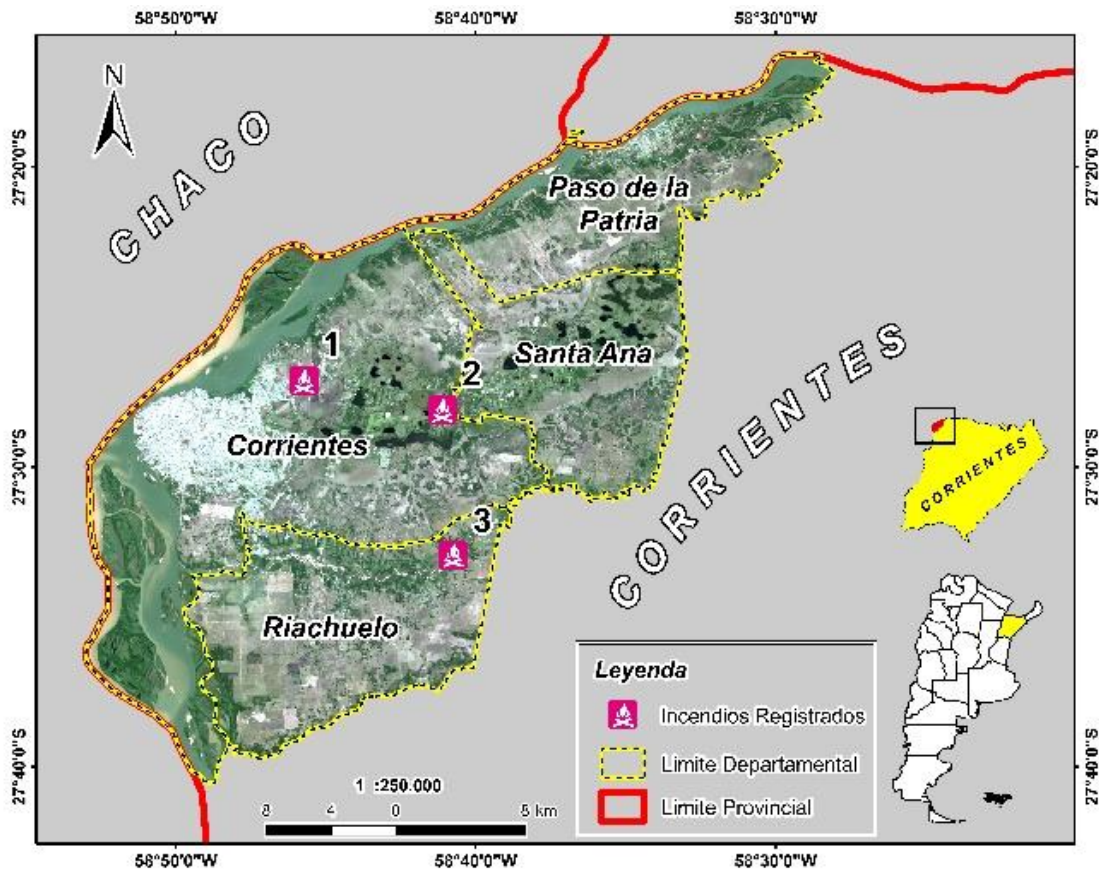


FIGURA 2
Incendio Aeropuerto 2020.



Fuente: Telam, 2020.

FIGURA 3
Incendios Santa Ana 2020.



Fuente: Corrientes Hoy, 2020.

FIGURA 4
Incendios en Parque Provincial San Cayetano.



Fuente: (@ParqueProvincialSanCayetano).

2.2 ANÁLISIS DE LAS PRECIPITACIONES

El cálculo de las anomalías se realizó con datos de precipitaciones entre el período 1962 al 2015 pertenecen a la estación Corrientes Aero del Servicio Meteorológico Nacional, mientras que desde el 2016 al 2020 corresponden a la estación meteorológica del Instituto Correntino del Agua y el Ambiente (ICAA). Posteriormente las anomalías fueron discriminadas teniendo en cuenta su severidad según la clasificación de IDEAM (2003)

TABLA 1
Clasificación de Anomalías de Precipitación.

Anomalía de precipitación	Clasificación
0 – 29	Muy por debajo de lo normal
30 – 59	Moderadamente por debajo de lo normal
60 – 89	Ligeramente por debajo de lo normal
90 – 109	Normal
110 – 139	Ligeramente por encima de lo normal
140 – 169	Moderadamente por encima de lo normal
>170	Muy por encima de lo normal

Fuente: IDEAM, 2003.

2.3 DATOS DE ENTRADA

GEE cuenta con una amplia base de datos de información espacial que incluye los catálogos completos de Landsat, Sentinel, MODIS, entre otros, ofreciendo a los usuarios la capacidad de trabajar con serie de imágenes en simultáneo a través de modelos de Python y JavaScript, lo que facilita el procesamiento de grandes volúmenes de datos (GORELICK, 2017; LISS *et al.*, 2017; ANAYA *et al.*, 2018). Para este trabajo en particular, en primer lugar fueron seleccionadas el total de imágenes Sentinel 2A del año 2020, las cuales se encuentran ortorectificadas y con corrección de reflectancia a nivel de superficie. A esta primera selección se aplicó un filtro para minimizar la presencia de nubosidad, uno de los principales problemas que se presentan a la hora de detectar áreas quemadas (ANAYA *et al.*, 2018). Finalmente se trabajaron 21 imágenes libres de cobertura nubosa, sobre las cuales se calculó el índice NBR (*Normalized Burn Ratio*).

2.4 CALCULO NBR (NORMALIZED BURN RATIO)

Es un índice de diferencia normalizada que permite estimar el grado de severidad de incendios realizando una operación entre las bandas que responden mejor y de manera más contrastada a los efectos del fuego (DELEGIDO, 2018). Maximiza los cambios de reflectancia en plantas y suelo debido a cambios producidos por los incendios (BOTELLA-MARTÍNEZ *et al.*, 2017).

Se calcula operando con las bandas correspondientes al NIR (Infrarrojo Cercano) cuya reflectividad desciende debido a la desaparición de la vegetación activa y el SWIR (Infrarrojo de onda corta), en el que aumenta la reflectividad por la pérdida de humedad, mayor exposición del suelo y menores sombras proyectadas por la vegetación (CHUVIECO, 2002; ESCUIN *et al.*, 2008; GUILLEN-COGOLLOS *et al.*; 2017; GOMEZ- SANCHEZ *et al.*, 2017).

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR+SWIR) \quad (1)$$

La operación arroja resultados entre -1 y 1, y toma valores bajos para las áreas afectadas por incendios, mientras que para áreas no afectadas adquiere valores altos (KEY *et al.*, 2006; ANAYA *et al.*, 2018). El índice fue calculado en GEE para cada imagen de la serie a través de un script y luego incorporado como una banda espectral a cada imagen aplicando la función .map().

2.5 MOSAICO

La realización de un mosaico compuesto por los píxeles afectados por incendio es posible gracias a la capacidad de la plataforma de GEE para generar estadísticos de reflectividad como media, mediana, máximos, mínimos, a partir de series de tiempo (CHEN *et al.*, 2017). Los *reductores* son la forma de agregar datos a lo largo del tiempo, el espacio, las bandas, las matrices y otras estructuras de datos en GEE (GEE, 2020). Basado en la metodología de *Greenest pixel* (Pixel más verde) y *Wettest Pixel* (Pixel más mojado) (WANG *et al.*, 2018) se aplicó un reductor de mínimos (.min) sobre las imágenes Sentinel de la serie temporal para elaborar una imagen con el valor más bajo de NBR para el año 2020, permitiendo identificar el pixel “más quemado” del periodo (Figura 3). Los resultados obtenidos fueron exportados como imagen para poder definir umbrales, calcular los errores y realizar correcciones ópticas con el software ENVI 5.1 para tratamiento de imágenes satelitales.

Con el fin de establecer el límite que diferencie de la manera más precisa los píxeles quemados y no quemados se utilizaron técnicas de umbrales (ARELLANO *et al.*, 2017; ANAYA *et al.*, 2018). Para ello realizaron múltiples clasificaciones con valores en incrementos de 0,05 (0,1, 0,15, 0,2..., n). Esto permitió definir los umbrales más groseros, para luego disminuir el valor de incremento a 0,01, con el fin de aumentar la precisión del ajuste. Cada nuevo valor asignado como umbral definió un nuevo mapa de áreas quemadas y no quemadas, los que fueron contrastados con información de referencia.

Como información de referencia se utilizaron clasificaciones supervisadas y no supervisadas sobre el mosaico de áreas quemadas y sobre el NBR, y las clasificaciones propuestas por la USGS para la interpretación del índice NBR (KEY *et al.*, 2000). A esto se sumó el análisis óptico las imágenes que componen el mosaico, donde se perciben áreas afectadas por eventos conocidos (Figura 1).

A partir de este análisis fueron extraídas las áreas de entrenamiento (ROIS) necesarias para la construcción de matrices de confusión. Siguiendo la metodología aplicada por ANAYA *et al.*, (2018), se definió como umbral óptimo el valor mínimo de la suma de errores de omisión y comisión.

Por último, se hicieron correcciones de manera visual en cuerpos de agua y áreas de suelos desnudos que al tener un valor bajo de reflectividad, pueden confundirse con áreas quemadas (ANAYA *et al.*, 2018). Además, se aplicó un filtro mayoritario de 3x3 para suavizar la imagen, eliminando el efecto sal y pimienta.

Con la utilización de un software GIS (ArcGis 10.5), se procedió a calcular la superficie quemada, densidad de áreas quemadas y confeccionar las salidas gráficas.

2.6 ÍNDICE DE DENSIDAD DE INCENDIOS (IDI)

Para el cálculo de la densidad de incendios los autores proponen un índice que relaciona el área total de incendios de una región en un periodo de tiempo, con el área de dicha región, expresada en porcentaje. Este índice permitirá establecer comparaciones entre distintas unidades de paisaje, a fin de reconocer los más afectados luego de la manifestación incendios. Sin embargo, el cálculo debe contemplar la extracción de las áreas que naturalmente no sean capaces de ser incendiadas, como es el caso de cursos o cuerpos de agua permanentes para el periodo estudiado o la superficie del ejido urbano denso, obteniendo así, el área efectiva susceptible a incendios.

3. RESULTADOS

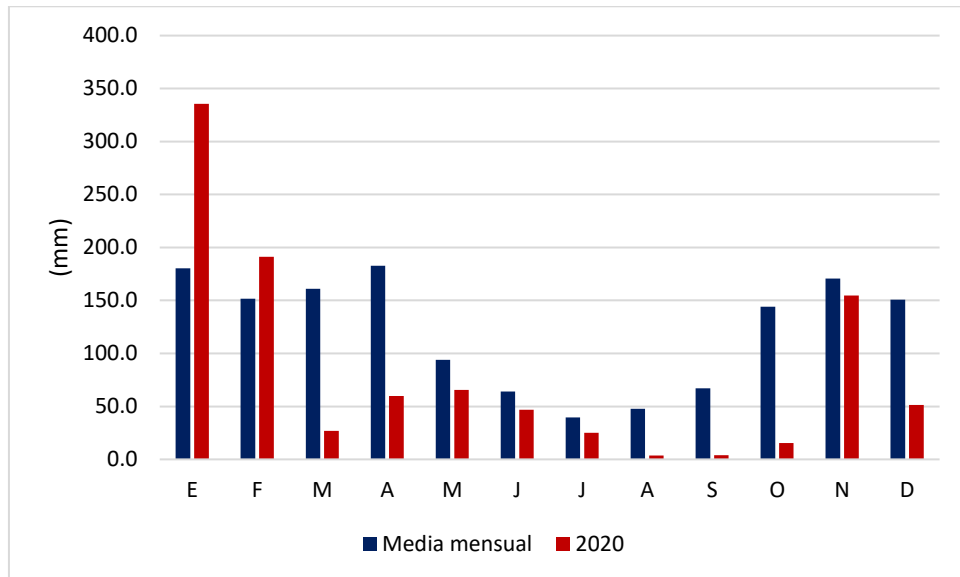
Teniendo en cuenta los datos de precipitaciones anuales, el año 2020, con 980 mm, fue uno de los más secos de todo el período estudiado, junto con los años 1988 (920 mm) y 2008 (890 mm). Sin embargo, se puede observar una concentración de las precipitaciones durante el mes de enero, siendo casi nulas a finales del invierno (Figura 2). En este sentido, la merma en las precipitaciones durante el invierno se encuentra dentro de los parámetros normales, sin embargo, es durante la estación de otoño y comienzos de la primavera donde se observar diferencias significativas.

Este comportamiento de las precipitaciones se ve reflejado en el cálculo de las anomalías (Tabla 2), observándose 4 meses con precipitaciones muy por debajo de lo normal, 2 con precipitaciones moderadamente por debajo de lo normal y 3 con precipitaciones ligeramente por debajo de lo normal. Solamente enero y febrero tuvieron precipitaciones por encima de lo normal, mientras que noviembre fue el único mes que presentó regímenes normales de lluvia.

Todo esto explica de manera clara los escenarios de extrema sequía que se vivieron en la región durante el año 2020, donde durante prácticamente 10 meses consecutivos llovió menos de lo normal, facilitando las condiciones para la aparición de focos de incendios de gran magnitud.

FIGURA 5

Comparación entre las precipitaciones medias mensuales del período 1962 – 2020 y el año 2020.



Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN) e Instituto Correntino del Agua y el Ambiente (ICAA).

TABLA 2

Clasificación de las anomalías según su severidad. MPE: Muy por encima de lo normal; LEN: Ligeramente por encima de lo normal; N: Normal; LDN: Ligeramente por debajo de lo normal; MDN: Moderadamente por debajo de lo normal y MPD: Muy por debajo de lo normal.

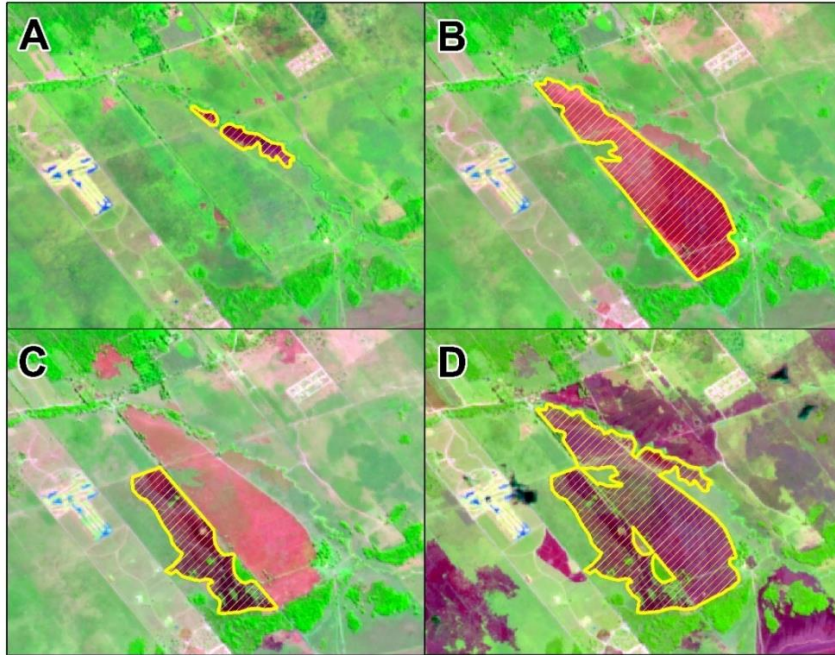
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Anomalia	18	1			7	7	6				9	
	6	26	17	33	0	3	3	8	6	11	1	34
Clasificación	M	M	M	M	L	L	L	M	M	M	M	M
	PE	PE	PD	DN	DN	DN	DN	PD	DP	DP	DP	N DN

Fuente: IDEAM, 2003.

En la figura 3 se observa un seguimiento de focos de incendio a lo largo del año, evidenciando que distintas áreas se incendiaron en meses diferentes. Primero aparece solamente una pequeña superficie quemada en la imagen del mes de febrero. Luego se percibe que durante el mes de marzo se incendió un área mayor, mientras que la superficie quemada de febrero comienza a recuperarse, y lo mismo sucede en marzo. La imagen final es el mosaico compuesto por los pixeles de menor NBR, y se perciben todas las áreas quemadas de diferentes momentos reunidas, lo que permite realizar los cálculos de áreas totales quemadas de forma rápida y sencilla.

FIGURA 6

Seguimiento de áreas incendiadas en el área periurbana de la ciudad de Corrientes. A) Imagen área quemada Febrero 2020. B) Imagen con área quemada Marzo 2020. C) Imagen con área quemada abril 2020. D) Mosaico con total de áreas quemadas.



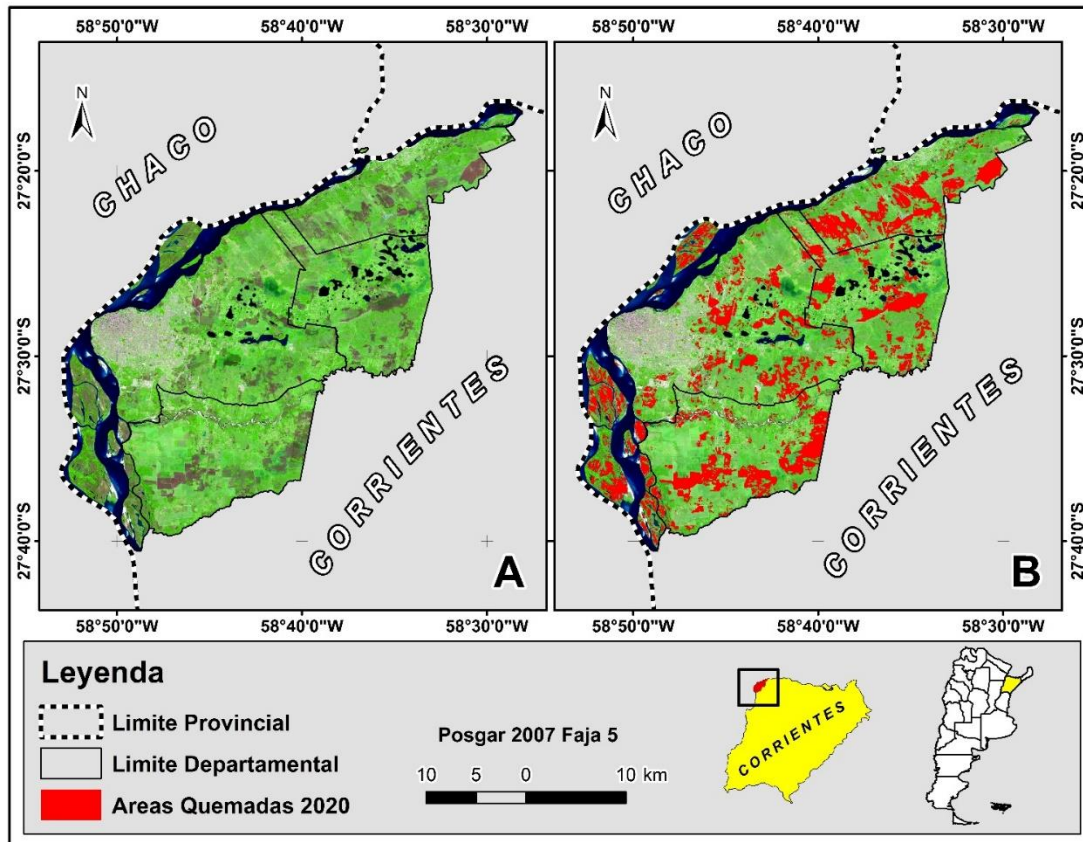
Los resultados del cálculo de áreas incendiadas indicaron que en el año 2020 la superficie quemada fue de 14.505 ha dentro del sector periurbano de la ciudad de Corrientes (Figura 4). Esto es un 17% de un total de 83.598 ha totales de superficie.

Con la aplicación del Índice de Densidad de Incendios se excluyeron las cubiertas de agua y urbanización, y el porcentaje de área quemada ascendió a un 21,6%.

La diferencia observada es significativa, y nos dice que en todo el 2020 se quemaron 1 de cada 5 hectáreas de la superficie susceptible a incendios, en el área periurbana de la ciudad de corrientes.

FIGURA 7

Superficies incendiadas en el área periurbana de la ciudad de Corrientes durante el año 2020.



3.1 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Se construyeron matrices de confusión para las clasificaciones de diferentes umbrales, donde se calcularon errores de comisión y omisión. Los “errores de omisión” indican el número de píxeles que, perteneciendo a una determinada categoría, no fueron incluidos en ella. Por su parte, los “errores de comisión” expresan el número de píxeles que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo realmente a otra (GIL *et al.*, 2003). Los errores de “omisión” y “comisión” expresan dos enfoques del mismo problema. Los primeros se refieren a una definición imperfecta de la categoría y los segundos, a una delimitación excesivamente amplia. Debido a que es una clasificación binaria, se puede observar una tendencia similar a la que muestra ANAYA *et al.* (2018) donde explica que, mientras disminuyen los errores de comisión, aumentan los de omisión, por lo que se establece un umbral óptimo para diferenciar lo quemado de lo no quemado, teniendo en cuenta el valor mínimo de la suma de los errores.

Primero se realizó una clasificación con umbrales amplios (0,05) para entender las tendencias (Tabla 3). Una vez identificado el umbral amplio donde los errores son menores, se pasó a trabajar con umbrales más finos (0,01), para mejorar la precisión (Tabla 4)

TABLA 3
Valores de umbrales de 0,05 de NBR.

Umbrales NBR	Comisión	Omisión	Suma Errores
0,1	34,86	0,09	34,95
0,15	26,08	0,46	26,54
0,2	16,38	1,32	17,7
0,25	12,51	4,4	16,91
0,3	11,32	10,98	22,3

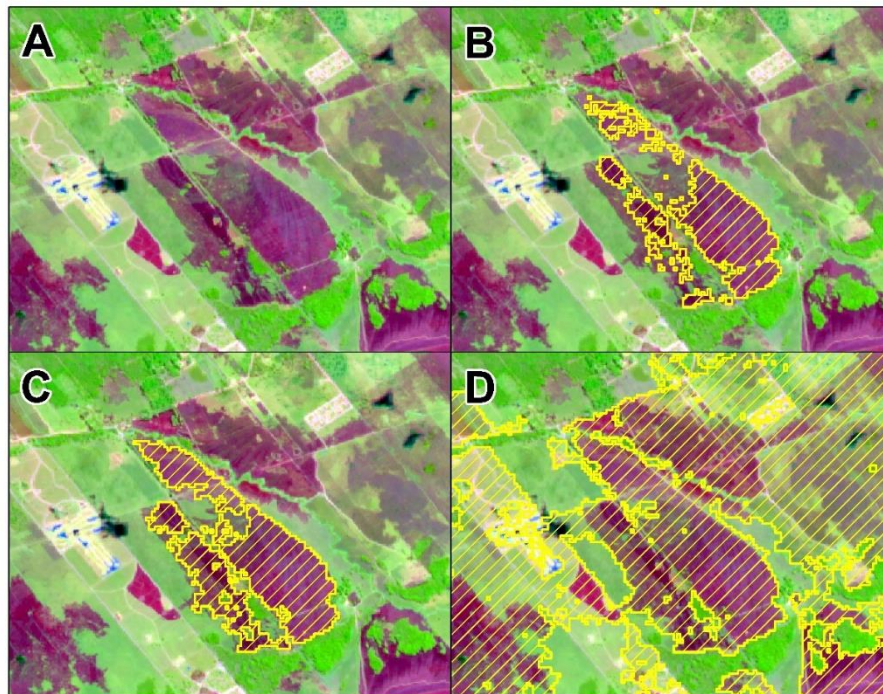
TABLA 4
Valores de umbrales de 0,01 de NBR.

Umbrales	Comisión	Omisión	Suma Errores
0,21	15,59	1,6	17,19
0,22	14,53	2,1	16,63
0,23	13,67	2,9	16,57
0,24	13,11	3,65	16,76

Se estableció un valor de -0,23 como umbral óptimo para distinguir áreas quemadas de áreas no quemadas. Los resultados de la selección de los umbrales se visualizan en la Figura 5, donde se puede observar como una superficie quemada (Figura 5A), es subestimada con -0,3 un umbral de NBR (Figura 5B), sobre estimada con -0,1 (Figura 5D) y se vuelven más precisos con -0,23 (Figura 5C).

FIGURA 8

Detección de áreas quemadas con la aplicación de diferentes umbrales de NBR. A) Mosaico Áreas Quemadas 2020 B) Umbral NBR = -0,3 C) Umbral NBR = -0,23 D) Umbral NBR = -0,1.



4. DISCUSIÓN

El análisis de los incendios es importante porque son disturbios que causan daños sobre el medioambiente y la sociedad en las zonas donde se manifiestan. En el área estudiada, el fuego a menudo es utilizado como herramienta de manejo y limpieza de la vegetación, lo cual es importante porque más del 90% de los incendios son producidos por causas antrópicas.

Tener en cuenta la influencia que tienen los factores climáticos es clave para entender la magnitud los incendios. Periodos extensos de sequía hacen que los ecosistemas sean más susceptibles a incendiarse, mientras que periodos húmedos disminuyen el riesgo de incendios. Con la clasificación de las anomalías, se pudo ver que durante la estación de verano los valores estuvieron muy por encima de lo normal, pudiéndose los asociar con eventos extremos de inundaciones. Sin embargo, pese a este exceso hídrico, las anomalías negativas desde mayo a octubre resultaron ser tan significativas y prolongadas, que el monto anual resultó ser 420 mm inferior a la media anual según (Contreras *et al.*, 2020). Sin dudas estos eventos extremos de sequía prolongada fueron determinantes en la manifestación de los incendios en las áreas periurbanas de la ciudad de Corrientes, al igual que en otras regiones del país.

En términos relativos normales, el total de áreas quemadas calculado correspondería a un 17,3 % del área total de estudio (83.598 ha). Sin embargo, al aplicar el IDI el porcentaje se incrementa a un 21,6 %, ya que 11.900 ha corresponden a recursos hídricos como ser el río Paraná o el sistema lagunar del paisaje de lomadas arenosas, y 4.540 ha a áreas urbanas densas, disminuyendo el área efectiva susceptible a incendios a 67.142 ha. Por lo tanto, la aplicación de las correcciones para el cálculo del IDI, es fundamental para el estudio de la determinación efectiva de la magnitud de manifestación de los incendios.

Estos resultados contrastan de forma notoria con los expuestos por el Servicio Nacional de Manejo del Fuego, quienes estiman que durante el 2020 se quemaron 45.534 ha en toda la provincia de Corrientes (MAYDS, 2020). La subestimación de la superficie incendiada puede deberse a que este organismo registra únicamente incendios reportado por responsables primarios del manejo de los incendios, las provincias y los parques nacionales, pudiendo haber muchos incendios no reportados que quedan fuera del registro.

Por otro lado, el INTA calcula a través de clasificaciones de imágenes satelitales una superficie de quema de alrededor de 484.748 ha para toda la provincia hasta fines de septiembre (KURTZ *et al.*, 2020). Sin embargo, afirman que el porcentaje de área afectada es de un 5%, lo que puede deberse a que contempla en sus cálculos cursos y cuerpos de agua permanente e infraestructura urbana, subestimando el resultado.

Una de las dificultades que surgen para la determinación de áreas afectadas por incendios en un periodo de tiempo con herramientas de teledetección, radica en que los eventos no se presentan todos al mismo tiempo y en el mismo lugar. Diferentes incendios suceden en diferentes zonas y momentos, y son captados por diferentes imágenes. La propuesta metodológica de un mosaico permitió obtener una sola imagen con todas las áreas quemadas para un periodo de tiempo determinado, facilitando en gran medida la medición de superficies afectadas.

Con la confección de un mosaico anual de áreas quemadas basado en el cálculo del NBR y la aplicación de técnicas de umbrales, se pudieron ajustar de forma satisfactoria las mediciones de superficie quemada, mejorando las estimaciones realizadas por diferentes organismos. El valor de 0,23 establecido como umbral óptimo para distinguir áreas quemadas de áreas no quemadas es adecuado, ya que un valor de umbral superior, sobreestima el área incendiada, clasificando píxeles no quemados como quemados, mientras que un valor inferior, subestima el área incendiada, dejando fuera de las áreas quemadas, píxeles que fueron afectados por el fuego.

A su vez, la implementación de un índice de densidad de áreas incendiadas (IDI) resulta importante como solución para cálculo de áreas efectivas incendiadas, ya que excluye las coberturas que no pueden ser afectadas por el fuego.

La gran mayoría de los trabajos sobre incendios se enfocan en eventos determinados, realizando análisis pre y pos fuego para delimitar áreas y severidad del incendio (MATTAR *et al.*, 2012; ARELLANO *et al.*, 2017; GOMEZ- SANCHEZ *et al.*, 2017; BOTELLA-MARTÍNEZ *et al.*, 2017; GUILLEN-COGOLLOS *et al.*, 2017; DELEGIDO, 2018). Sin embargo, pocos autores han puesto el énfasis en desarrollar metodologías que permitan medir las superficies afectadas por incendios a lo largo de periodos de tiempo, por lo que se considera que el trabajo realizado es un aporte muy significativo para el estudio de los incendios que tanto afectan al ambiente y a la sociedad

Es necesario para los gestores disponer de información cartográfica sobre incendios como base para cuantificar y evaluar el daño en el ecosistema y su recuperación. Se debe incentivar el trabajo de los investigadores para encontrar el método más preciso y fiable de cálculo, que en todo caso debe estar adaptado a las limitaciones con que cuentan los primeros, y que se refieren a la exigencia de rapidez en su generación, falta de personal para obtener información de campo y la ausencia de protocolos (GOMEZ- SANCHEZ *et al.*, 2017)

5. CONCLUSIONES

El análisis de anomalías climáticas demostró que el año 2020, pese a presentar un mes de enero con precipitaciones extremas, las sequías no sólo fueron prolongadas, sino que además extremas, muy por debajo de los valores normales. Es decir, que si bien las causas que iniciaron los incendios se vinculan con prácticas culturales y el mal manejo del fuego; las condiciones naturales vinculadas a la variabilidad climática, han potenciado a la manifestación de la amenaza.

Gracias a la utilización de GEE se pudo construir un mosaico anual de áreas quemadas en base al cálculo del NBR para cada imagen de la serie. Esto, sumado al empleo de técnicas de umbrales, posibilitó la obtención del valor que distinga de la mejor manera las áreas quemadas y no quemadas, disminuyendo los errores y aumentando la precisión. A su vez, el índice de densidad de incendios desarrollado por los autores permitió el cálculo de superficies quemadas efectivas, ya que aparta de la operación coberturas que no pueden ser afectadas por el fuego.

Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios, incluso se pudieron mejorar las estimaciones hechas por importantes organismos como el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y el Servicio Nacional de Manejo del Fuego.

Generalmente los estudios sobre incendios apuntan a determinar la severidad de los mismos sobre un evento dado. El trabajo aquí realizado en cambio se enfocó en delimitar las áreas quemadas en un año calendario a través de la construcción de un mosaico de píxeles más quemados, permitiendo englobar en una sola imagen, eventos ocurridos en momentos y lugares diferentes.

Consideramos que es una metodología válida para construir una base de datos de áreas quemadas, realizar comparaciones entre diferentes años, obtener información sobre recurrencia de incendios, servir de base para análisis de severidad y recuperación post incendio, entre otras. En este sentido, se destaca las ventajas que tiene la plataforma *Google Earth Engine*, ya que permite realizar análisis a través del tiempo de forma rápida manejando cuantiosas cantidades de información. Esta tecnología cambia el paradigma de la teledetección, disminuyendo de forma notoria el tiempo de procesamiento de las imágenes y dejando que los usuarios concentren sus energías en los análisis de los resultados.

La utilización de esta herramienta y sus capacidades permitieron realizar una medición de las áreas que fueron afectadas por incendios durante el año 2020 de forma eficaz. La posibilidad de contar con todas las áreas quemadas en una misma imagen también facilita el trabajo de investigadores y funcionarios públicos y privados, proporcionando cartografía precisa para la gestión integral del fuego.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue parcialmente financiada por los proyectos PI 19Q002 de la SGCyT – UNNE y el PICT- 2018 – 00636 – DT.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAYA, JA., SIONE, W. y RODRÍGUEZ-MONTELLANO, A. (2018). Burned area detection based on time-series analysis in a cloud computing environment. *Revista de Teledetección*, 51, 61-73. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8618>
- ALCÁNTARA DÍAZ, T. y S. MENDOZA OLAVARRÍA. (2019). Evaluación de la Gestión Integral de Riesgo de desastres causados por incendios forestales. Un caso de aplicación para la interfaz urbano forestal de Valparaíso, Chile. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Recuperado el 16 de marzo de 2020, DOI: [10.13140/RG.2.2.13871.28321](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13871.28321).
- ARELLANO, S., VEGA, J.A., RODRÍGUEZ Y SILVA, F., FERNÁNDEZ, C., VEGA-NIEVA, D., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G. y RUIZ-GONZÁLEZ, A.D. (2017). Validation of the remote sensing indices dNBR and RdNBR to assess fire severity in the Oia-O Rosal (Pontevedra) wildfire in 2013. *Revista de Teledetección*, 49, 49-61. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7137>
- BASTARRIKA, A., CHUVIECO, E., y MARTÍN, M.P. (2011). Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 1003-1012. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.005>
- BOLETTA P., RAVELO A., PLANCHUELO A., y GRILLI M. (2006) Assessing deforestation in the Argentine Chaco. *Forest Ecology and Management*, 228,114-118.
- BOTELLA-MARTÍNEZ, M.A., y FERNÁNDEZ-MANSO, A. (2017). Study of post-fire severity in the Valencia region comparing the NBR, RdNBR and RBR indexes derived from Landsat 8 images. *Revista de Teledetección*, 49, 33-47. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7095>
- CHEN, B., XIAO, X., LI, X., PAN, L., DOUGHTY, R., MA, J., DONG, J., QIN, Y., ZHAO, B., WU, Z., SUN, R., LAN, G., XIE, G., CLINTON, N., y GIRI, C. (2017). A mangrove forest map of China in 2015: Analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131 (Supplement C), 104-120. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.011>
- CHUVIECO, E. (2002). *Teledetección Ambiental*. Ed. Ariel Ciencia, Barcelona, España.
- CHUVIECO, E. (2008). Satellite observation of biomass burning, en *Earth observation of global change. The role of satellite remote sensing in monitoring the global environment* (Editado por E. Chuvieco). Springer Science: 109-142.
- CHUVIECO, E. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 173-181
- CONTRERAS, F.I., y CONTRERAS, S.A. (2017). La Incidencia de la Pendiente en la Distribución de las Morfologías de las Lagunas sobre Lomadas Arenosas (Corrientes, Argentina). *Anuario do Instituto de Geociencias – UFRJ*. 40(1), 15-25.
- CONTRERAS, F.I., y FANTÍN, M.A. (2015). El riesgo de la población a inundaciones por lluvias como consecuencia de la dinámica de expansión urbana sobre paisajes anegadizos. El caso de la ciudad de Corrientes (Argentina). *Folia Histórica del Nordeste*. 23: 97 – 112.
- CONTRERAS, F.I., y PAIRA, A.R. (2016). Aplicación del “índice de cambio” a las variaciones morfométricas de las lagunas de lomadas arenosas. El caso de Bella Vista (Corrientes, Argentina). *Revista de Geografía*. 21, 31-38.
- CONTRERAS, F.I., FERRELLI, F., y PICCOLO, MC. (2020). Impactos de eventos secos y lluviosos sobre cuerpos de agua periurbanos subtropicales: Aporte al ordenamiento del espacio urbano de Corrientes (Argentina). *Finisterra*. 55 (114), 3 – 22.
- CRUTZEN, P.J., y ANDREA, M.O. (1990) Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*: 250, 1669-1678.
- DE SANTIS, A., y CHUVIECO, E. (2008). Análisis comparativo de sensores espaciales para cartografía de la Severidad en el incendio de Ruba de Saelices (Guadalajara). *Revista Española de Teledetección*, 29, 25-37.

- DELEGIDO, J., PEZZOLA, A., CASELLA, A., WINSCHER, C., URREGO, E.P., JIMENEZ, J.C., y MORENO, J. (2018). Estimación del grado de severidad de incendios en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, usando Sentinel-2 y su comparación con Landsat-8. *Revista de Teledetección*, 51, 47-60.
- Desesperante situación en Santa Ana. “Se está destruyendo todo”. (1 de octubre de 2020). Corrientes Hoy. Recuperado de <https://www.corrienteshoy.com/interior/desesperante-situacion-en-santa-ana-se-esta-destruyendo-todo.htm>
- DI BELLA C.M., FISCHER M.A., y JOBBÁGY E.G. (2011). Fire patterns in north-eastern Argentina: influences of climate and land use/cover. *International Journal of Remote Sensing*: 32 (17), 4961-4971.
- 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.
- KURTZ, D.B., y BARRIOS, R.A. (2020). *Las quemadas y los incendios en la provincia de Corrientes*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- ESCUIN, S., NAVARRO, R., y FERNANDEZ, P. (2008). Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (4), 1053-1073. <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>
- FAO. (2006). *Fire management-Global assessment 2006*. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-a0969e.pdf>
- GIBSON, K., y NEGRÓN, J.F. (2009). Fire and bark beetle interactions. *The Western Bark Beetle Research Group: A Unique Collaboration With Forest Health Protection: Proceedings of a Symposium at the 2007 Society of American Foresters Conference*, 51–70.
- GIBSON, K., y NEGRÓN, J.F. (2009). Fire and bark beetle interactions. *The Western Bark Beetle Research Group: A Unique Collaboration With Forest Health Protection: Proceedings of a Symposium at the 2007 Society of American Foresters Conference*, 51–70.
- GIL, J.L., GARCÍA, E.B., PONVERT-DELISLES, D.R., SÁNCHEZ, R., y VEGA, M. B. (2003). Enfoques para la clasificación digital de imágenes mono y multispectrales y su implementación en el software cubano TN Estudio V2.0. *Revista de Teledetección*, 20, 35-52.
- GÓMEZ-SÁNCHEZ, E., DE LAS HERAS, J., LUCAS-BORJA, M., y MOYA, D. (2017). Assessing fire severity in semi-arid environments: application in Donceles 2012 wildfire (SE Spain). *Revista de Teledetección*, 49, 103-113. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7121>
- GOOGLE EARTH ENGINE. (2020). *Reducer Overview*. Recuperado de: https://developers.google.com/earth-engine/guides/reducers_intro. Último ingreso 10 de marzo de 2020.
- GOOGLE EARTH ENGINE. (2021). Recuperado de: <https://earthengine.google.com/faq/>
- GORELICK, N., HANCHER, M., DIXON, M., ILYUSHCHENKO, S., THAU, D., y MOORE, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- GUILLEM-COGOLLOS, R., VINUÉ-VISÚS, D., CASELLES-MIRALLES, V., y ESPINÓS-MORATÓ, H. (2017). Critical analysis of severity indices and affected surface by the wildland fire on Sierra de Luna (Zaragoza). *Revista de Teledetección*, 49, 63-77. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7117>
- HOFFMANN W.A., ORTHEN B., y NASCIMENTO P.K.V.D. (2003). Comparative fire ecology of tropical savanna and forest trees. *Functional Ecology*: 17 (6), 720-726.
- IDEAM. (2003). *Cálculo de la anomalía de precipitación en Colombia: una propuesta de ajuste a índice actual*. Nota técnica del IDEAM (IDEAM METEO/009- 2003). Bogotá. IDEAM
- Incendios de grandes dimensiones cerca del aeropuerto de Corrientes (20 de septiembre de 2020). Telam. Recuperado de <https://www.telam.com.ar/notas/202009/516426-incendios-de-grandes-dimensiones-cerca-del-aeropuerto-de-corrientes.html>

- IRIGOIN, N. (2018) Estadísticas de incendios forestales año 2017. Secretaría de Agroindustria, BsAs, Argentina. 76p.
- KEY, C.H., BENSON, N.C. (2000). Measuring and remote sensing of burn severity. Joint Fire Science Conference and Workshop Proceedings, 284– 285.
- KEY, C.H., BENSON, N.C. (2006). Landscape Assessment (LA). En: Lutes, D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Sutherland, S., & Gangi, L.J. (Eds.). *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD, 1-55.
- LENTILE, L.B., SMITH, F.W., SHEPPERD, W.D. (2006). Influence of topography and forest structure on patterns of mixed severity fire in ponderosa pine forests of the South Dakota Black Hills, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 15 (October 2015), 557–566. <https://doi.org/10.1071/WF05096>
- LISS, B., HOWLAND, M.D., LEVY, T.E. (2017). Testing Google Earth Engine for the automatic identification and vectorization of archaeological features: A case study from Faynan, Jordan. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 15, 299-304. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.08.013>
- MARTÍNEZ, S.E., BARUZZO, M.N., SMICHOWSKI, H., FORASTIER, M.E., CONTRERAS, F.I. (2021). El efecto de las precipitaciones en las características limnológicas en lagunas periurbanas (Bella Vista, Corrientes, año 2019). *Revista Senderos*, (Pre-print).
- MATTAR, C., SANTAMARÍA, A., DURÁN C. (2012). Estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine utilizando datos de teledetección. *Revista de Teledetección*, 38, 36-50. Último acceso: 16 de noviembre, 2017, de http://www.aet.org.es/revistas/revista38/Numero38_04.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Servicio Nacional de Manejo del Fuego (2020) Manejo del Fuego. Reporte de Incendios, Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/31-dic-reporte_incendios_.pdf
- NEARY, D.G., RYAN, K.C., DEBANO, L.F. (2005). Wildland Fire in Ecosystems. *Rocky Mountain Research Station General Technical Report*, 4 (RMRS-GTR-42).
- OMI, P. N. (2005). *Forest Fires: A Reference Handbook*. ABC-CLIO.
- OYARZABAL, M., CLAVIJO, J.R., OAKLEY, L.J., BIGANZOLI, F., TOGNETTI, P.M., BARBERIS, I.M., MATURO H.M., ARAGÓN, M.R., CAMPANELLO, P.I., PRADO, D.E., OESTERHELD, M. LEON, R.J.C. (2018). Unidades de vegetación de la Argentina. *Ecología Austral*: 28 (1) 40-63
- PAULA, S., ARIANOUTSOU, M., KAZANIS, D., TAVSANOGLU, Ç., LLORET, F., BUHK, C., OJEDA, F., LUNA, B., MORENO, J. M., RODRIGO, A., ESPELTA, J. M., PALACIO, S., FERNÁNDEZ-SANTOS, B., FERNANDES, P. M. & PAUSAS, J. G. (2009). Fire-related traits for plant species of the Mediterranean Basin. *Ecology*, 90, 1420. <https://doi.org/10.1890/08-1309.1>
- PERILLA, G.A., MAS, J.F. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones Geográficas (101)*. <https://doi.org/10.14350/ig.59929>.
- SÁNCHEZ, J.M., RUBIO, E., LÓPEZ-SERRANO, F.R., ARTIGAO, M.M., CASELLES, V., MOYA, D.N., ODI, M.M. (2009). Estudio a través de imágenes Landsat 5-TM del efecto de un incendio sobre el balance de energía en superficie en una zona de bosque mediterráneo. *Revista de Teledetección*, 32, 72-85.
- TESSLER, N., WITTENBERG, L., PROVIZOR, E., GREENBAUM, N. (2014). The influence of short interval recurrent forest fires on the abundance of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) on Mount Carmel, Israel. *Forest Ecology Management*, 324, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.02.014>
- WANG, C., JIA, M., CHEN, N., WANG, W. (2018). Long-term surface water dynamics analysis based on Landsat imagery and the Google Earth Engine platform: A case study in the middle Yangtze River Basin. *Remote Sensing*, 10 (10), 1635.