



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

TESINA PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE INGENIERO EN RECURSOS NATURALES Y
MEDIO AMBIENTE

RECONSTRUCCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA
OCURRENCIA DE INCENDIOS EN LA REGIÓN DEL
CALDENAL

Peinetti, Lihuel

SANTA ROSA (LA PAMPA)

ARGENTINA

2019

PREFACIO

Esta Tesina es presentada como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente, de la Universidad Nacional de La Pampa, y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad ni en otra Institución académica. Se llevó a cabo en gabinete dependiente del Departamento de Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UNLPam, durante el período comprendido entre el 20 de abril de 2018 y el 10 de Septiembre de 2019, bajo la dirección de Castro Mónica Graciela y bajo la codirección de Tittarelli Fabián.

Peinetti, Lihuel

27/11/2019

“DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES”

“FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES”

“UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA”.

Agradecimientos

Gracias a la Universidad de La Pampa por brindar a los ciudadanos la posibilidad de formarse en una carrera universitaria, garantizando la educación pública, gratuita y de calidad.

- A la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- A mi directora Cart. Mónica Graciela Castro por la ayuda y acompañamiento en el armado del trabajo.
- A mi codirector Lic. Fabián Tittarelli.
- A los jurados de la tesina, Dr. Jaime Bernardos y Lic. Gustavo Romero.
- A Claudia Chirino por la ayuda en el armado y corrección del trabajo.
- A Cart. Daniel Cardín por aportar el conocimiento necesario para desenvolverme en el ámbito de GIS y brindarme las posibilidades para poder desarrollarme en esta disciplina.
- A mis padres Graciela Mage y Raul Peinetti por darme la posibilidad de seguir esta carrera, junto a mis hermanas y hermano por apoyarme constantemente para poder lograr mis metas.
- A todos mis amigos y amigas que me acompañaron en esta etapa de la vida.
- A mis compañeros de cursada con los cuales comparto pensamientos e ideales que permitieron que se genere un lazo de amistad y apoyo mutuo imprescindible para lograr este objetivo.

INDICE

RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
Área de estudio.....	5
Reconstrucción del régimen de fuegos.....	6
Análisis de los datos.....	9
RESULTADOS.....	10
DISCUSIÓN.....	15
CONCLUSIONES.....	18
BIBLIOGRAFÍA.....	19
ANEXO A. Verificación de la digitalización.....	21

RESUMEN

El fuego es uno de los principales factores modeladores de la vegetación en el distrito del Caldenal de la región del Espinal. El uso de los recursos naturales probablemente modificó el régimen histórico de fuegos en el Caldenal. En la actualidad los incendios producen degradación de ecosistemas, pérdidas económicas y riesgos para la vida humana. Por esta razón el manejo del fuego es prioritario para la sociedad en su conjunto. En este estudio se determinó el patrón espacio-temporal de incendios del Caldenal en la provincia de La Pampa en base a la interpretación de imágenes satelitales Landsat correspondientes al periodo 2006-2018. Se excluyó la temporada 2012/2013 debido a fallas en las imágenes Landsat de ese período. El área de trabajo incluye una superficie de 4.944.402 hectáreas, de las cuales se quemaron 1.446.409 ha (29,3%) en el lapso de 11 temporadas analizadas. El régimen de fuegos se caracterizó por una marcada variabilidad en superficie quemada. En la mayoría de las temporadas (6 de 11) las superficies totales de incendios fueron inferiores a 50.000 ha. Se destacan dos eventos extremos > 500.000 ha en las temporadas 2016/17 y 2017/18. Los incendios de mayor superficie (>13.000 ha) explican más del 65% de la superficie quemada pero comprendieron solamente el 7% del total de eventos de fuego. La mayor parte de los eventos (92%) ocurrieron en la temporada primavera-estival (noviembre, diciembre, enero y febrero). La recurrencia de eventos dentro de la extensión temporal analizada fue baja (< 3% del área quemada). Por otra parte, aproximadamente un 30% de la superficie de los principales tipos fisonómicos de la vegetación: bosque abierto, arbustal, pastizal intermedio y bajo, se quemó en el lapso analizado. Esta información pone en evidencia la importancia de elaborar estrategias para controlar grandes incendios y la de extremar esfuerzos de prevención en el periodo primavera-estival. Se destaca también la necesidad de extender la serie temporal de régimen de fuegos utilizando registros existentes en imágenes satelitales de periodos anteriores.

Palabras claves. Imágenes satelitales, recurrencia y estacionalidad de incendios , superficie quemada, bosque de caldén, *Prosopis caldenia*

SUMMARY

Fire is one of the main control factors of vegetation dynamics in the Caldenal region. The historical fire regime of this region was modified by anthropogenic activities. Wildfires produce ecosystem degradation, economic losses and threaten human life and welfare. For this reason, fire management is a socio-economic priority. In this study, the spatiotemporal pattern of fires in the Caldenal region in the province of La Pampa was reconstructed through interpretation of Landsat satellite images. The fire regime comprises 11 fire periods (July to June) from 2006 to 2018. The season 2012/2013 was not considered in this study due to the poor quality of available Landsat images during this time period. The study area included 4,944,402 ha, of which 1,446,409 ha (30%) were burned during the course of 11 fire periods. In most periods (6 of 11) total burned areas were > 50,000 ha. Two extreme events > 500,000 ha were registered in 2016/17 and 2017/18 fire periods. Large fire events (> 13,000 ha) that comprise only 7% of the total fire events, accounted for more than 65% of the total burned area. Most fires (92%) occurred in the spring-summer season (November, December, January and February). The recurrence of fires was low (<3% of the burned area). Approximately 30% of the surface of each main vegetation type of the region was burned during the span of 11 years; including forest, shrubland and grassland. This data shows the importance of developing strategies to control large fires and the need to maximize prevention efforts in the spring-summer period. The temporal series of fire regime should be expanded by making use of existing old satellite images.

Keywords. Satellite images, fire recurrence and seasonality, burned area, bosque de caldén, *Prosopis caldenia*

INTRODUCCIÓN

El fuego es un disturbio natural en ecosistemas de bosques y praderas en el mundo (Bond & Keeley 2005). La caracterización del patrón espacio temporal o “régimen de fuego” se realiza considerando principalmente, la extensión, intensidad (temperaturas alcanzadas por el fuego), frecuencia y estacionalidad de los fuegos (Gill 1975). Si bien la extensión e intensidad dependen en mayor medida de la interacción entre las características meteorológicas y la vegetación, la frecuencia está más relacionada con la tasa de recuperación de la vegetación y la estacionalidad con la fenología (Díaz-Delgado Hernández 2000). El conocimiento del régimen de fuegos es de vital importancia para la gestión del territorio (Castellnou et al. 2007).

El fuego constituye uno de los principales disturbios naturales en el distrito Caldenal la provincia fitogeográfica del Espinal (Cabrera 1976, Cano et al. 1985, Lell 1990). El Caldenal comprende un mosaico complejo de ecosistemas donde se alternan bosques de caldén (*Prosopis caldenia*), arbustales y pastizales bajos e intermedios. En la actualidad, la vegetación natural mantiene un alto porcentaje de cobertura, pero altamente modificada por la acción del hombre (SAYDS 2006, González-Roglich et al. 2015).

Las reconstrucciones del régimen de fuego realizadas en bosques de caldén utilizando técnicas dendrocronológicas, permiten inferir un aumento en las frecuencias de fuego a partir de principios de siglo pasado (Medina et al. 2000, Medina 2007). Estos cambios han sido asociados principalmente al impacto antropogénico (Medina et al. 2000, Medina 2007, Bogino et al. 2015 Dussart et al. 2011). En particular, la actividad humana ha generado transiciones a estados ecológicos de la vegetación con mayor propensión a producir fuegos de alta intensidad, los cuales comprometen la perdurabilidad de los servicios eco-sistémicos (Peinetti et al. 2018). A su vez, las anomalías meteorológicas registradas en esta región (Aliaga et al. 2016) podrían haber incrementado la ocurrencia de grandes incendios forestales. Estudios actuales sobre cambio climático predicen que este tenderá a exacerbar la ocurrencia de incendios (Abatzoglou & Williams 2016). Por lo cual, es importante que las estrategias de prevención y lucha contra el fuego se adecuen al nuevo escenario climático (Alamgro 2009).

Una alta cantidad de recursos se invierten cada año en programas de prevención y lucha contra el fuego en la provincia de La Pampa. A pesar de estos esfuerzos, una extensión considerable de la región del Caldenal es afectada todos los años por fuegos de alta intensidad (). Es importante considerar que a diferencia de otras catástrofes naturales, el riesgo de ocurrencia de fuegos puede ser estimado con alto grado de confiabilidad

(Taylor et al. 2013). Esto no sólo permite optimizar los esfuerzos de lucha contra incendios sino también, elaborar estrategias de manejo tendientes a reducir la cobertura y conectividad espacial de los estados de la vegetación más favorables a propagar el fuego.

Para priorizar los esfuerzos en el control del fuego es necesario conocer las características del régimen de fuego, tales como frecuencias, intensidad, momento de ocurrencia, superficie y ubicación espacial (Bravo 2014, Díaz-Delgado Hernández 2000). El régimen de fuegos puede ser reconstruido utilizando las marcas de incendios observables en imágenes de sensores remotos de las series históricas de la misión Landsat. Mediante la interpretación de imágenes satelitales es posible no sólo determinar la fecha aproximada de ocurrencia, sino también el patrón espacial de los incendios (Viedma & Chuvieco 2019).

Objetivo general

Reconstruir la dinámica espacio temporal del régimen de incendios de la región del Caldenal en la provincia de La Pampa de los últimos 12 años utilizando imágenes satelitales.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos incluyen:

- 1) Determinar el momento de ocurrencia, extensión y estacionalidad de los incendios,
- 2) Establecer la proporción de áreas quemadas para distintas coberturas de terreno,
- 3) Cuantificar la recurrencia de eventos de fuegos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en la región del Caldenal comprendida en la parte central de la provincia de La Pampa (Fig. 1), abarcando una superficie de 4.944.402 ha. El paisaje está representado por médanos, cordones arenosos, planicies arenosas y mesetas residuales, mientras que la vegetación comprende bosques caducifolios abiertos y cerrados con *Prosopis caldenia* y *P. flexuosa*, arbustales perennifolios, pastizales bajos e intermedios y matorrales halófilos (Fig. 2) (INTA et al. 1980). Una proporción menor del área de estudio ha sido transformada a agricultura y otra parte incluyó lagunas y salinas.

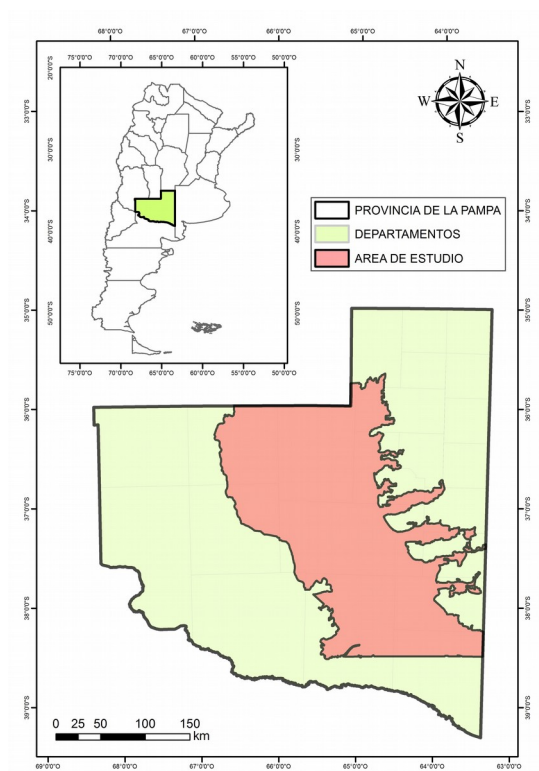


Figura 1. Área de estudio en la región del Caldenal de la provincia de La Pampa

Reconstrucción del régimen de fuegos

La reconstrucción del régimen de fuegos se realizó mediante la interpretación de imágenes satelitales *Landsat* obtenidas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). El área de interés está comprendida en la cobertura de los paths-rows 228-085; 228-086; 229-085 y 229-086 de la misión espacial *Landsat*. Se creó una base de datos con las imágenes disponibles correspondientes a los años 2006 al 2018. Estas incluyen las series *Landsat 4-5 TM*, *Landsat 7 ETM* y *Landsat 8 OLI*. Posteriormente, se descartaron las imágenes con cobertura de nubes > 50%. Se utilizaron las imágenes *LandsatLook*. Estas imágenes se encuentran en formato “*jpeg*” geométricamente referenciadas y en color natural (compuesto de 3 bandas). Las imágenes cuentan con suficiente detalle para identificar las superficies quemadas y presentan como ventaja una mayor facilidad de manejo y procesamiento de datos comparados con las imágenes equivalentes de mayor tamaño de archivo, disponibles en formato “*Geotif*”. Se utilizaron en total más de 1.000 imágenes, que corresponden a un tamaño aproximado de 25 GB. Este estudio sería difícil y poco práctico de realizar con imágenes de resolución completa, tanto por la capacidad de almacenamiento requerido como por el tiempo de descarga. Solamente se analizaron imágenes de resolución espacial y espectral cuando fue necesario confirmar eventos de fuegos que no se pudieron observar de manera nítida en las imágenes de menor definición. Todas las imágenes utilizadas se inspeccionaron para garantizar la correspondencia espacial y se realizaron correcciones de geoposicionamiento en las que presentaban errores de desplazamiento. El sistema de referencia con el que se realizaron los ajustes espaciales fue el de coordenadas geográficas WGS 84. Las imágenes fueron procesadas con el programa de sistema de información geográfica *ArcGis 10*.

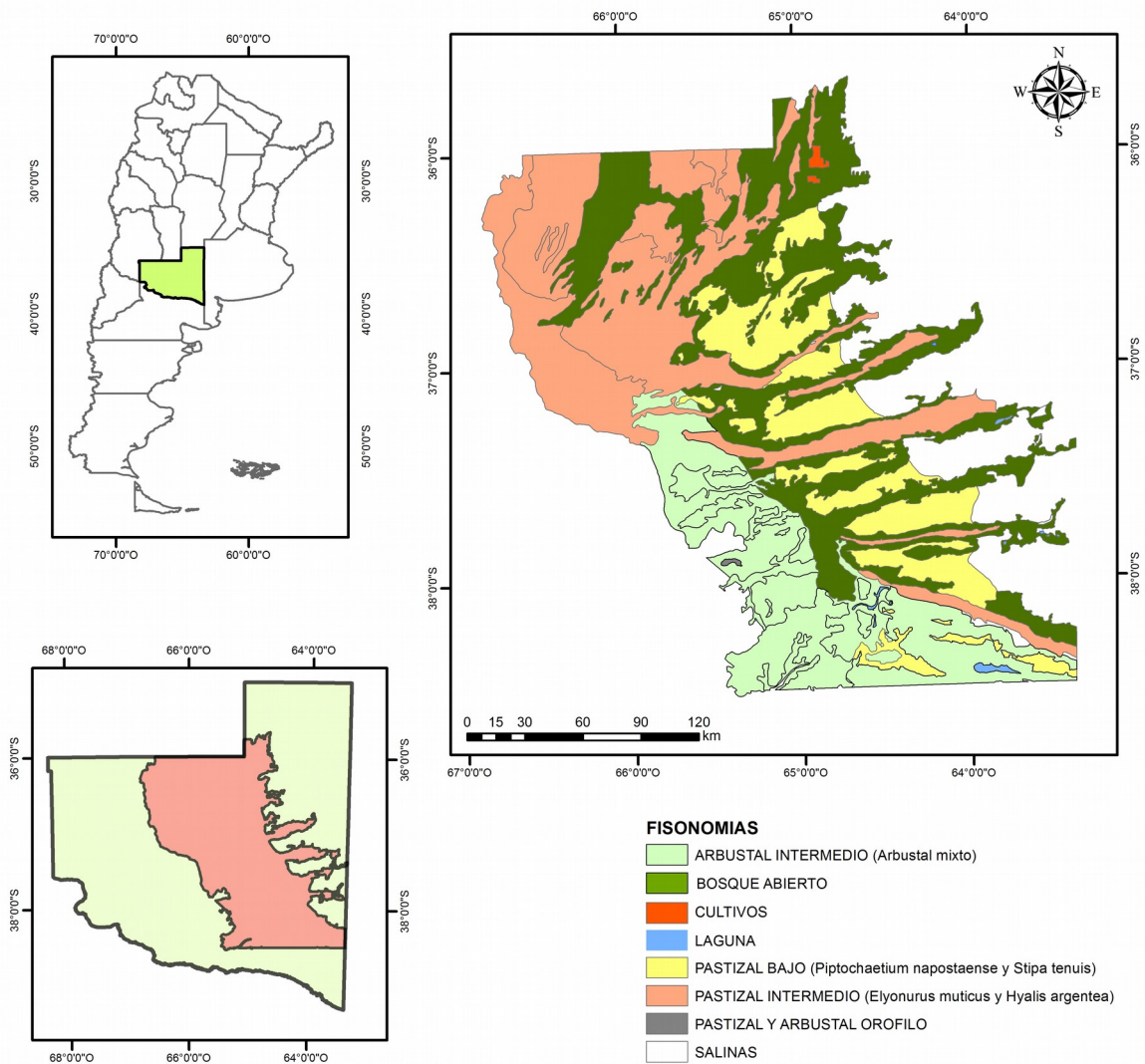


Figura 2. Principales tipos fisonómicos de la vegetación del área de estudio (tomado del INTA et al. 1980)

La detección de superficies quemadas se realizó a través de la observación visual de las imágenes. Se consideraron únicamente las superficies quemadas con una extensión superior a los límites de potrero. Se asume que los fuegos restringidos al potrero corresponden a quemadas controladas o focos de incendios que no prosperaron por diferentes razones como buenas picadas o cambio de cobertura, porque no hubo viento o por falta de continuidad en el material fino o de copas. Esta regla permitió establecer el umbral o la superficie mínima de área quemada, la cual se corresponde a su vez con la utilizada en otros estudios (Díaz-Delgado Hernández 2000). El área mínima constituye una superficie

suficientemente mayor al umbral detectable con las imágenes utilizadas.

La digitalización se realizó manualmente mediante la creación de archivos de polígonos que fueron almacenados en formatos tipo *Shapefile* en *ARCGIS 10* (ESRI 2011). Se digitalizaron imágenes en las cuales se podía reconocer la mayor extensión de superficie quemada. De esta manera se evitaron las representaciones parciales y la duplicación de registros en el caso de incendios que fueron detectados por varias imágenes.

La superposición espacial de los path-row del sistema espacial de *Landsat* determinó que algunas áreas quemadas quedaban representadas en imágenes satelitales contiguas del mismo mes del año. Esto produjo registros repetidos del mismo incendio. Para corregir este error se utilizaron herramientas de geoprocetamiento con el fin de identificar los polígonos solapados. Este proceso consistió primeramente en la digitalización de un polígono que comprendió las áreas de superposición de las imágenes. Mediante la herramienta “selección por localización” y utilizando este polígono como área de selección se detectaron fácilmente las superficies repetidas, las cuales fueron comparadas en cada caso con sus respectivas imágenes satelitales de fondo. Las superficies más representativas del área quemada se conservaron, mientras que las restantes fueron eliminadas. Este método debió ser aplicado para cada año por separado para no confundir polígonos que representaban el mismo incendio con eventos de recurrencia de incendios (sitios que fueron afectados por más de un incendio durante el periodo de estudio).

La serie de fuegos fue luego comparada con registros de incendios de Defensa Civil de la provincia de La Pampa (ver Anexo A). En base a esta comparación se incorporaron 6 polígonos que fueron omitidos y 17 que no fueron digitalizados por haber sido considerados dudosos. Estos últimos no mostraban en las imágenes signos claros de fuego porque la fecha de las imágenes disponibles difería en varios meses de la ocurrencia de los eventos. Otro ajuste que se le realizó a la serie de fuegos fue la eliminación de la temporada 2012/2013 porque las imágenes *Landast* para ese periodo son de mala calidad. El error global de la digitalización considerando como referencia los registros de Defensa Civil fue del 10%. Lo cual constituye un grado de confiabilidad aceptable del régimen de incendios (Speranza & Zerda 2019)

Los atributos asociados a los polígonos de la serie de fuegos fueron: “superficie quemada” y “fecha aproximada de ocurrencia de incendio”. Para el cálculo de superficie quemada se proyectaron las capas a coordenadas planas Gauss Krugger POSGAR 2007 faja 3 y faja 4. Posteriormente se adjudicó a cada polígono el valor de superficie correspondiente a su ubicación respecto a la línea divisoria de fajas que corresponde al

meridiano de 64,5° (punto medio entre los meridianos centrales de las fajas 3 y 4). La fecha aproximada de incendio quedó determinada por la fecha de la imagen satelital sobre la cual se generaron los polígonos.

Análisis de los datos

Las áreas quemadas fueron calculadas por temporada, estacionalidad, extensión y recurrencia de eventos:

- Las temporadas correspondieron períodos interanuales de Julio a Junio de año siguiente. Se computaron un total de 11 temporadas.
- La estacionalidad de los incendios se determinó considerando cuatro periodos definidos como: primavera temprana, primavera estival, otoño e invierno (Tabla 1).
- Para caracterizar los incendios de acuerdo a su extensión se clasificaron los eventos de fuego de acuerdo a tres categorías de tamaños: pequeños, medianos a grandes y muy grandes (Tabla 2). Para determinar si la distribución de tamaños de incendios fue similar entre temporadas se utilizó una prueba de Chi-cuadrado.
- La recurrencia de incendios se calculó mediante la superposición de capas de polígonos de incendios por temporadas, discriminando el territorio de acuerdo a la frecuencia de eventos de incendios.
- Finalmente, se determinaron las superficies quemadas y recurrencias de incendios por tipos fisonómicos de la vegetación (Fig. 2).

Tabla 1. Clasificación de los incendios de acuerdo a estacionalidad

Estación	Meses
Primavera temprana	agosto, septiembre, octubre
Primavera estival	noviembre, diciembre, enero y febrero
Otoño	marzo, abril, mayo
Invierno	junio, julio

Tabla 2. Clasificación de los incendios de acuerdo a su extensión

Categoría de tamaño	Superficie en hectáreas
Pequeños	≤ 1.500
Medianos a Grandes	< 1.500 : ≤13.000
Muy Grandes	> 13.000

RESULTADOS

La superficie del área de estudio afectada por incendios en las 11 temporadas analizadas fue de 1.446.409 ha lo que corresponde a un porcentaje de 29,3 %. Sin embargo, la sumatoria de áreas quemadas da un total de 1.617.248 ha (32,7 % del área de estudio), debido a la recurrencia espacial de incendios. La superficie quemada en el lapso analizado fue altamente variable entre temporadas (Fig. 3), con un mínimo de 1.720 ha y un máximo de 621.269 ha para las temporadas 2009/2010 y 2016/2017, respectivamente.

Aproximadamente el 92% de la superficie quemada corresponde a eventos de fuego ocurridos en el periodo primavero-estival (Fig. 4). La superficie restante se encontró distribuida de manera equitativa entre la primavera temprana y el otoño con un porcentaje cercano a 4%, mientras que los incendios en la época invernal fueron muy escasos. Asimismo, la mayor parte de los incendios correspondieron a eventos pequeños (58%) y medianos a grandes (35%) (Tabla 3). Sin embargo, la superficie quemada se explica mayormente por la ocurrencia de incendios muy grandes (65%).

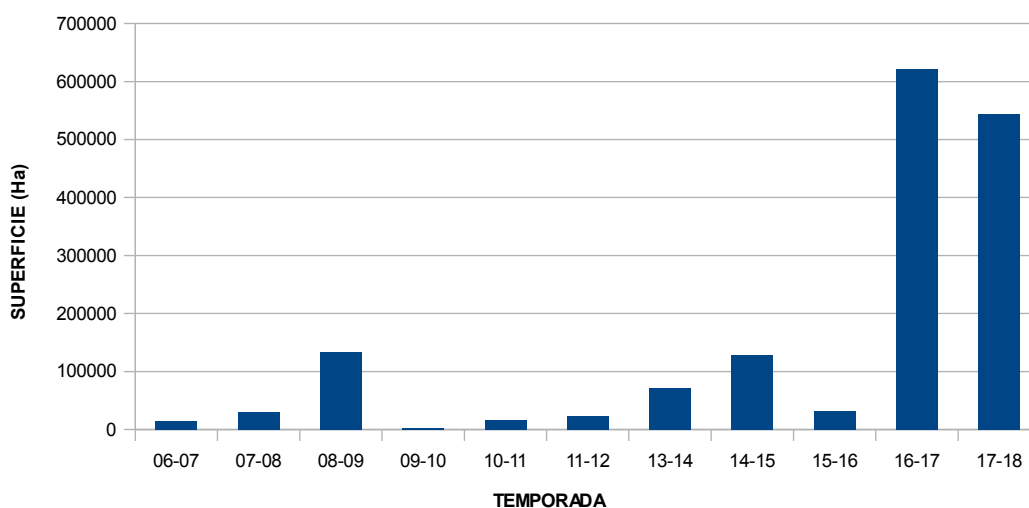


Figura 3. Superficie quemada por temporadas en el periodo 2006 a 2018

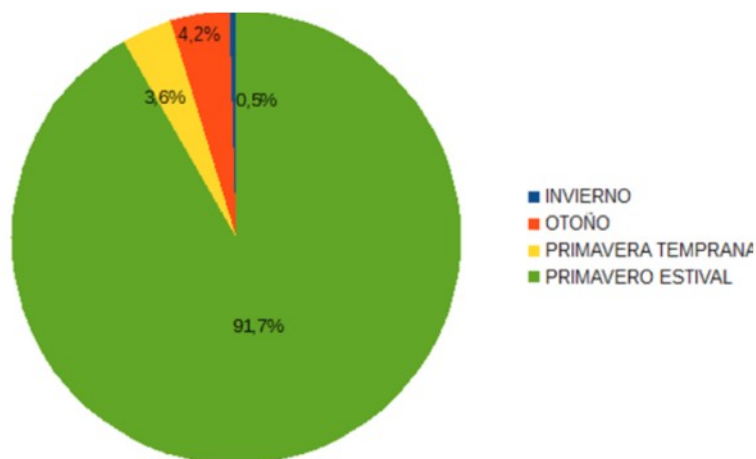


Figura 4. Estacionalidad de los incendios de acuerdo al porcentaje de superficie quemada sobre un total de 1.617.000 ha

Tabla 3. Clasificación del área quemada según la extensión de los eventos

Categoría de tamaños	Numero de eventos	Superficie (ha)
Pequeños	191	97.390
Medianos a Grandes	118	467.652
Muy Grandes	23	1.052.206
TOTALES	332	1.617.248

La distribución de las categorías de tamaño de incendios no fue homogénea en las distintas temporadas ($P < 0.01$). Los incendios muy grandes ocurrieron solamente en 6 de las 11 temporadas y fueron muy numerosos (en términos relativos) en las temporadas 2016/17 y 2017/18 (Tabla 4). Mientras que los de extensiones reducidas fueron frecuentes en todos los años, pero principalmente en las dos temporadas mencionadas anteriormente. Los incendios de tamaños intermedios (medianos a grandes) alcanzaron frecuencias similares y aún mayores que los pequeños en algunas temporadas. Por otro lado, la mayor parte de la superficie se quemó solamente una vez durante el periodo de estudio (Tabla 5 y Fig. 5). Sin embargo, se registraron áreas que se quemaron hasta 3 veces en un lapso de 11 años.

Tabla 4. Número de eventos de incendio por temporada y extensión

Temporada	Tamaños de incendios						Total
	Pequeños		Medianos		Muy Grandes		
	Eventos	Valor relativo ^(*)	Eventos	Valor relativo ^(*)	Eventos	Valor relativo ^(*)	
2006/07	18	9,4	2	1,7	0	0	20
2007/08	17	8,9	2	1,7	1	4,3	20
2008/09	14	7,3	14	11,9	1	4,3	29
2009/10	4	2,1	0	0	0	0	4
2010/11	10	5,2	2	1,7	0	0	12
2011/12	9	4,7	4	3,4	0	0	13
2013/14	18	9,4	12	10,2	1	4,3	31
2014/15	10	5,2	14	11,9	2	8,7	26
2015/16	7	3,7	8	6,8	0	0	15
2016/17	52	27,2	29	24,6	12	52,2	93
2017/18	32	16,8	31	26,3	6	26,1	69
Total	191	100	118	100	23	100	332

Tabla 5. Clasificación del área quemada según la frecuencia de incendios y porcentaje en relación al total del área de estudio durante el periodo 2006 - 2018

Frecuencia de incendios	Superficie (ha) ^(*)	Porcentaje
0	3.497.994	70,75
1	1.284.887	26
2	152.199	3
3	9.321	0,2

^(*) Superficie total del área de estudio: 4.944.402 ha.

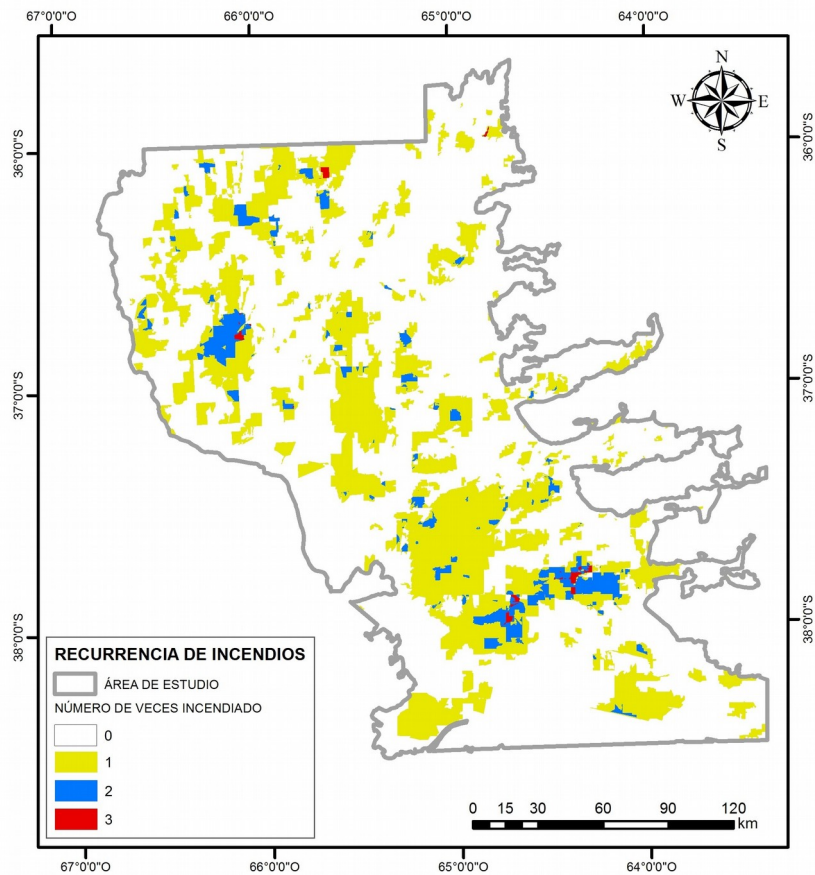


Figura 5. Recurrencia de incendios en las 11 temporadas analizadas

La distribución de los incendios de acuerdo a los tipos fisonómicos de vegetación fue similar entre áreas dominadas por leñosas (879.276 ha) y pastizales (735.298 ha) (Tabla 6). Aproximadamente un 30% de la superficie de los principales tipos fisonómicos, bosque abierto, arbustal, pastizal intermedio y bajo, fue afectada por incendio en el período de estudio. La frecuencia de eventos de fuegos tendió a ser mayor en el bosque abierto y el pastizal intermedio (Fig. 6).

Tabla 6. Superficie quemada por tipo fisonómico y porcentaje respecto al área total de cada tipo fisonómico

Tipos fisonómicos	Superficie total (ha.)	Superficie quemada (ha.)	Porcentaje
BOSQUE ABIERTO	1.561.196	580.159	37
ARBUSTAL INTERMEDIO	1.050.027	299.117	28
PASTIZAL INTERMEDIO	1.536.074	478.522	31
PASTIZAL BAJO	755.110	256.777	34
CULTIVOS	9.022	858	10
SALINAS	17.733	1.633	9
LAGUNAS	12.672	183	1
TOTAL	4.944.403	1.617.248	

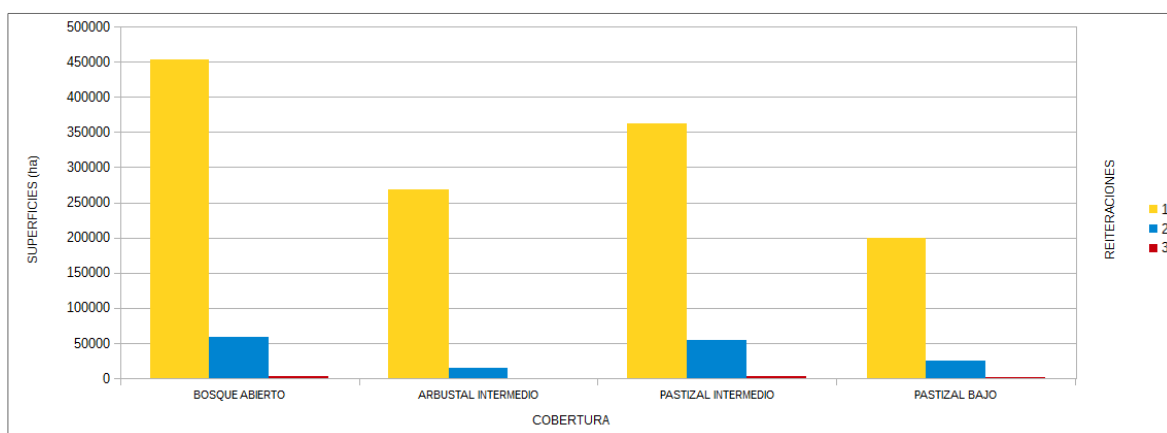


Figura 6. Superficies quemadas por reiteración para los principales tipos fisonómicos de la región de estudio

DISCUSIÓN

El régimen de fuegos se caracterizó por una alta variabilidad en la superficie quemada por temporada, alta frecuencia de eventos, baja recurrencia y marcada estacionalidad. Asimismo, se determinaron anomalías importantes en las temporadas 2016/2017 y 2017/2018, donde la extensión de los incendios superó las 500.000 ha. Esto contrasta con la baja extensión (< 50.000 ha) de los incendios registrados en 6 de las 11 temporadas analizadas. Se destaca también la abundancia de eventos pequeños y la importancia de los grandes incendios como determinantes de la superficie quemada total. Si bien estos últimos comprendieron solo el 7 % de los eventos permiten explicar el 65% de la superficie quemada. Por otra parte, se registró un número atípico de incendios grandes en las temporadas 2016/2017 y 2017/2018. Otra característica importante del régimen de incendio fue la baja recurrencia de eventos. Por ejemplo, considerando el intervalo medio de retorno de fuegos (IMRF), un índice muy utilizado para describir cronologías de fuegos (Bravo 2014), prácticamente la totalidad del área quemada mostró un IMRF mayor a 10 años. Estos valores se condicen con las estimaciones de IMRF basadas en dendrocronologías realizadas para bosques de caldén del sur de San Luis y centro de La Pampa, donde los registros fueron, respectivamente; 7.3+/-6 años para el periodo 1911-1993 (Medina et al 2000) y 8.4 +/- 5 años para el periodo 1930-1989 (Medina 2007). Por otra parte, más del 90% de los incendios ocurrieron en la estación primavera-estival (noviembre a febrero). La alta probabilidad de incendios en la época estival es un fenómeno general asociado a la mayor acumulación de biomasa, temperaturas altas y sequía (Vélez Muñoz 1995).

Se determinó, que tanto las áreas dominadas por leñosas como las dominadas por gramíneas se quemaron en una proporción similar, cercana al 30%. Sin embargo, es importante considerar que el mapa de cobertura de vegetación utilizado está desactualizado y que la metodología implementada para su elaboración corresponde con una escala espacial de baja resolución. Por lo cual, es esperable que los resultados cambien si se compara el patrón espacial de incendios con mapas actualizados y de mayor detalle. No obstante, es esperable que las características de las comunidades vegetales condicionen el régimen de fuegos y viceversa, generándose ciclos de retroalimentación (DeBano et al. 1998, Kunst et al. 2003). El uso del Caldénal con fines ganaderos aumentó la abundancia de gramíneas intermedias no palatables, lo cual favorece la acumulación de biomasa muerta en el estrato herbáceo del bosque (Llorens 2013). Estas modificaciones inducidas

por el hombre en la vegetación habrían incrementado la probabilidad de ocurrencia de incendios. Asimismo, el manejo productivo de los sistemas naturales en el Caldenal produjo cambios en los ecosistemas tales como arbustización del bosque de caldén y la invasión de leñosas en pastizales (Dussart et al. 1998, Peinetti et al. 2018). Estos nuevos ambientes, a su vez probablemente generaron cambios en el régimen de fuego. Otros factores explicativos de la variabilidad en las superficies quemadas además de la vegetación, incluyen una combinación de efectos meteorológicos y de manejo (Bond & Keeley 2005). Las fluctuaciones en precipitaciones pueden favorecer los incendios al producir acumulaciones de cantidades significativas de biomasa en años húmedos. La probabilidad de incendios se incrementa cuando estos años son seguidos de años secos y cálidos. Este tipo de anomalías se registraron recurrentemente en la región de estudio, y fueron coincidentes con grandes incendios como en la temporada 2000/2001. Por otra parte, un alto número de fuegos registrados en la región pueden haber sido iniciados por el hombre. Existen registros del uso del fuego por los pueblos originales antes de la colonización (Alfageme 2000), del incremento de fuegos producto de la colonización (Medina et al 2000, Medina 2007) y de la proporción de incendios generados por el hombre en la actualidad (Alfageme 2000). Seguramente la mayor parte de la heterogeneidad entre temporadas observada en el régimen de fuegos puede explicarse a través de la combinación de la acción del hombre, tanto directa (manejo del fuego) como indirecta (impactos ecológicos en la vegetación), en interacción con años favorables para la ocurrencia del incendios (alternancia de altas precipitaciones y sequía).

Todos los años se implementan en la región del Caldenal acciones para la lucha contra incendios, tales como picadas, desmalezados de caminos y combate de focos activos. Estas no siempre resultado suficientes, como se observó en las temporadas 2016-2017 y 2017-2018. Los datos de este estudio muestran la importancia de elaborar estrategias para controlar grandes incendios, los cuales explican la mayor parte de la superficie quemada. Además, los resultados confirman la existencia de una marcada estacionalidad, que justifica la decisión de intensificar los esfuerzos de monitoreo para la detección y respuesta temprana y la asignación de recursos durante las estaciones de primavera-verano. Un cambio importante en el manejo del fuego podría producirse a través de la incorporación de herramientas modernas para el apoyo de decisiones, lo cual permitiría mejorar las acciones de prevención y control de fuegos (Jurdao et al. 2012). Estas incluyen entre otras, el desarrollo de mapas en tiempo real de probabilidad de incendios y de conectividad espacial de la cobertura de vegetación. Contar con mapas de

cobertura de la vegetación actualizados también resulta de valor para conocer la disponibilidad de combustible sobre todo en las épocas de mayor susceptibilidad a fuegos. Otro factor de decisión importante es la identificación espacio-temporal de áreas de priorización de esfuerzos, las cuales deberían incluir ecosistemas de mayor vulnerabilidad ecológica, donde el fuego puede desencadenar transiciones a estado degradados. Para tal fin es importante la caracterización espacial de la vegetación utilizando criterios de sucesión vegetal (Bestelmeyer et al. 2017). La elaboración de esta información de base para la toma de decisiones requiere implementar esfuerzos de evaluación y monitoreo en combinación con el uso de datos actualizados de sensores remotos.

CONCLUSIONES

Aproximadamente el 30% del área de estudio (4.944.402 ha) se quemó al menos en una ocasión durante el lapso de 11 años. Se observó una alta heterogeneidad del patrón espacio-temporal de fuego en todas las variables analizadas. El grado de confiabilidad del régimen de incendios generado para la región del Caldenal se considera aceptable considerando las dificultades generadas por la falta de regularidad en la serie temporal de imágenes satelitales.

Esta caracterización del régimen de fuegos aporta al conocimiento de este factor de disturbio en el contexto de la dinámica de los ecosistemas de la región del Caldenal y también, en decisiones de manejo tendientes reducir la probabilidad de ocurrencia de incendios. Es de destacar la importancia de mejorar la confiabilidad de esta información incorporando fuentes de datos independientes y la necesidad de extender la temporalidad del régimen de fuegos con registros imágenes satelitales más antiguas.

BIBLIOGRAFÍA

- Abatzoglou JT, Williams AP. 2016. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113:11770-11775.
- Alfageme HA. 2000. Los incendios forestales en La Pampa. Anuario No2 1999-2000 Facultad de Ciencias Humanas. Universidad nacional de la Pampa.
- Aliaga V, Ferrelli F, Alberdi-Algarañaz E, Bohn V, Piccolo M. 2016. Distribución y variabilidad de la precipitación en la Región Pampeana, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 42. 10.18172/cig.2867.
- Bestelmeyer BT, Ash AJ, Brown JR, Densambuu B, Fernandez-Gimenez ME, Johanson J, Levi MR, Lopez DR, Rumpff L, Peinetti HR, Shaver PL. 2017. State and transition models: theory, applications, and challenges. In: Briske DD (Ed.), *Springer series on environmental management*. Springer, Cham, Switzerland, pp. 303–346.
- Bogino S, Roa-Gimenez SC, Velasco-Sastre AT, Cangiano ML, Risio-Allione L, Rozas V. 2015. Synergetic effects of fire, climate, and management history on recruitment in the Argentinean pampas. *J. Arid Environ.* 117:59-66.
- Bond WJ, Keeley JE. 2005. Fire as a global ‘herbivore’: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution* 20: 387–394.
- Bravo SJ. 2014. Estudios sobre ecología de fuego en la región chaqueña occidental de argentina. En: educación e investigación forestal para el equilibrio vital, Cooperación binacional Argentina-Brasil. (Editoras) Giménez AM & Bolzón GI. Programa de Internacionalización de la Educación Superior y Cooperación Internacional CAPES-SPU. Cap. 4, 111-132. fcf.unse.edu.ar/archivos/publicaciones/cap4_bravo.pdf
- Cabrera AL. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. Acme, Buenos Aires. 85 pp. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería . Tomo 2, fasc. 1.
- Cano E, Estelrich HD, Holgado H. 1985. Acción del fuego en los estratos gramíneos y arbustivos de un bosque de caldén. *Revista de la Facultad de Agronomía* 1: 81-96.
- Castellnou M, Nebot E, Miralles M. 2007. El papel del fuego en la gestión del paisaje. En: IV International Wildfire Fire. Conference 2007, Sevilla, Spain. Thematic Session N°1.
- Díaz-Delgado Hernández R. 2000. Caracterización mediante teledetección del régimen de incendios forestales en Cataluña (periodo 1975-98) y su influencia en los procesos de regeneración. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Barcelona
- DeBano L, Neary D, Folliott P. 1998. *Fire’s Effects on Ecosystems*. Wiley & Sons, Inc. 333 pp.
- Dussart E, Lerner P, Peinetti R. 1998. Long term dynamics of 2 populations of *Prosopis caldenia* Burkart. *J. Range Manage.* 51:685-691.
- Dussart EG, Chirino CC, Morici EA, Peinetti RH. 2011. Reconstrucción del paisaje del Caldén pampeano en los últimos 250 años. *Quebracho*, 19, 54-65.
- ESRI 2011. *Arc-Gis Desktop: Release 10*, California USA: Environmental System Research Institute.
- González-Roglich M, Swenson JJ, Villarreal D, Jobbágy EG, Jackson RB. 2015. Woody plant-cover dynamics in Argentine savannas from the 1880s to 2000s: The interplay of encroachment and agriculture conversion at varying scales. *Ecosystems* 18:481-492.
- Gill AM. 1975. Fire and the Australian flora: a review. *Australian Forestry*, 38:4-25
- INTA, Provincia de La Pampa, Facultad de Agronomía. 1980. Inventario integrado de los recursos naturales de La Pampa. Clima, geomorfología, suelo y vegetación. UNLPam, Santa Rosa, La Pampa.
- Jurdao S, Chuvieco E, Arevalillo JM. 2012. Modelling fire ignition probability from satellite estimates of live fuel moisture content. *Fire Ecology* 8:77-97
- Kunst C, Bravo S, Panigatti J. 2003. *Fuego en los Ecosistemas Argentinos*. Ediciones

- INTA, Argentina. 332 pp.
- Lell JD. 1990. Incendios de bosques en la pampa. *Revista de la Facultad de Agronomía* 5: 29-33.
- Llorens EM. 2013. In: Ministerio de la Producción, Gobierno de La Pampa (Eds.). *Caracterización y manejo de los pastizales del centro de La Pampa*.
- Medina AA, Dussart EG, Estelrich, HD, Morici EA. 2000. Reconstrucción de la historia del fuego en un bosque de *Prosopis caldenia* (Burk.) de Arizona, sur de la provincia de San Luis. *Multequina* 9: 91-98.
- Medina AA. 2007. Reconstrucción de los regímenes de fuego en un bosque de *Prosopis caldenia*, provincia de La Pampa, Argentina. *Bosque (Valdivia)* 28:234-240.
- Peinetti HR, Bestelmeyer BT, Chirino CC, Kin AG, Frank Buss ME. 2018. Generalized and specific State-and-Transition Models to guide management and restoration of Caldenal forests. *Rangeland Ecology & Management*. En prensa.
- SAyDS. 2006. Informe Regional Espinal. 2^{da} Etapa. Anexo I: Estado de conservación del Distrito Caldén. 1^{er} Inventario Nacional de Bosques Nativos. Inventario de campo de la Región del Espinal. Distritos Caldén y Ñandubay. 86 p.
- Speranza FC, Zerda HR. 2019. Clasificación digital de coberturas vegetales a partir de datos satelitales multiespectrales. https://www.academia.edu/13450421/clasificaci%C3%93n_digital_de_coberturas_vegetales_a_partir_de_datos_satelitales_multiespectral
- Taylor SW, Woolford DG, Dean CB, Mart DL. 2013. Wildfire prediction to inform fire management: Statistical science challenges. *Stat. Sci.* 28:586-615.
- Vélez Muñoz R. 1995. El peligro de incendios forestales derivado de la sequía. *Cuadernos de la S.E.C.F.* 2: 99-109
- Viedma O, Chuvieco E. 2019. Cartografía y evaluación de daños causados por incendios forestales mediante técnicas de teledetección. https://www.researchgate.net/publication/237800434_cartografia_y_evaluacion_de_danos_causados_por_incendios_forestales_mediante_tecnicas_de_teledeccion.

ANEXO A. Verificación de la digitalización

La serie temporal del régimen de incendios fue corroborada con registros provistos por la Dirección Provincial de Defensa Civil de La Pampa (Tabla A1). Estos registros incluyen fecha y lote catastral de ocurrencia de eventos los incendios. Estos datos fueron transferidos al formato *Shapefile* para luego superponerlos con los polígonos de superficies quemadas derivados de las imágenes satelitales. Para cada temporada, se determinó el número de coincidencias (Tabla A1) y las causas de no coincidencia entre incendios registrados por Defensa Civil (RDC) y los registrados en imágenes satelitales (RIS). Se consideraron como coincidentes los incendios RIS que ocurrieron en el lote catastral reportado por DC siempre que mantuvieran correspondencia temporal. Los eventos no coincidentes fueron discriminados de acuerdo a las siguientes causas (Tabla A2):

- a) *LP*. Estos corresponden a incendios RDC identificados claramente en las imágenes satelitales como áreas quemadas que no superan los límites del potrero.
- b) *FAC*. Fuera del área de cobertura. Incendios RDC que se encuentran fuera del área de cobertura de RIS
- c) *ND*. No digitalizados. Incendios RDC que pueden observarse en las imágenes y que no se incluyen en el RIS.
- d) *ID*. Imágenes defectuosas. Incendios RDC que no se incluyen en el RIS por la falta de imágenes de calidad para su identificación.
- e) *D*. Dudosos. Incendios RDC que no se incluyen en el RIS dado que se confunden con áreas no quemadas o aradas.
- f) *SEI*. Sin evidencia de incendios. Incendios RDC que no se corresponden con lo observado en las imágenes para esa fecha y lugar.

Tabla A1. Registros de incendios por temporada de acuerdo a datos de Defensa Civil (RDC) e interpretación de imágenes satelitales (RIS) y número de eventos coincidentes.

Temporada	RDC	RIS	Coincidentes
07-08	41	20	6
08-09	26	27	6
09-10	1	4	0
10-11	22	12	7
11-12	27	13	5
12-13	21	3	0
13-14	35	30	10
14-15	47	25	25
15-16	33	13	9
16-17	95	91	51
17-18	92	67	55

Tabla A2. Causas de falta de coincidencia entre registros de Defensa civil (RDF) e imágenes satelitales (RIS).

Temporada	No Coincidentes	Causas de falta de coincidencia ⁽¹⁾					
		LP	FAC	ND	ID	D	SEI
07-08	35	20	1	1	6	0	7
08-09	20	11	3	1	0	1	4
09-10	1	1	0	0	0	0	0
10-11	15	4	2	0	3	1	5
11-12	22	2	4	1	8	0	7
12-13	21	3	0	0	17	1	0
13-14	25	7	3	3	0	5	7
14-15	22	14	3	0	0	1	4
15-16	24	13	1	0	4	4	2
16-17	44	31	5	0	1	0	7
17-18	37	20	5	0	2	4	6

⁽¹⁾ LP. No superan los límites del potrero. FAC. Fuera del área de cobertura. ND. No digitalizados. ID. Imágenes defectuosas. D. Dudosos. SEI. Sin evidencia de incendios.

Cálculo de errores. Los errores de la digitalización se determinaron en base al número de incendios del RDC que correspondieron con los criterios del RIS (Tabla A3). El número de incendios considerados (IC) fue calculado como:

$$IC_i = RDC_i - (LP_i + FAC_i + SEI_i) \quad (Ec. 1)$$

donde i representa las temporadas de incendios

Los errores de la digitalización Err-RSI fueron calculados como:

$$Err-RIS_i = ((ND_i + ID_i + D_i) / IC_i) * 100 \quad (Ec. 2)$$

Posteriormente, el Err-RIS fue discriminado en errores por omisión (Err-RIS-O) y por falta de imágenes (Err-RIS-FI):

$$Err-RIS-O_i = ((ND_i + D_i) / IC_i) * 100 \quad (Ec. 3)$$

$$Err-RIS-FI_i = ID_i / IC_i * 100 \quad (Ec. 4)$$

Finalmente el error del RDC (Tabla A4) fue calculado como:

$$Err-RDC_i = SEI_i / (RDC_i - FAC_i) * 100 \quad (Ec. 5)$$

Tabla A3. Errores del RIS tomando como referencia los registros de Defensa civil (RDC)

Temporadas	IC ⁽¹⁾	ND+ID+D ⁽²⁾	ND+D	ID	Err-RIS (%) ⁽³⁾	Err-RIS-O (%) ⁽³⁾	Err-RIS-F (%) ⁽⁵⁾
07-08	13	7	1	6	54	8	46
08-09	8	2	2	0	25	25	0
09-10	0	0	0	0	SD	SD	SD
10-11	11	4	1	3	36	9	27
11-12	14	9	1	8	64	7	57
12-13	18	18	1	17	100	6	94
13-14	18	8	8	0	44	44	0
14-15	26	1	1	0	4	4	0
15-16	17	8	4	4	47	23	24
16-17	52	1	0	1	2	0	2
17-18	61	6	4	2	10	7	3
Totales 07-18	238	64	23	41	30	10	17

(1) IC. Incendios considerados.

(2) ND. No digitalizados. ID. Imágenes defectuosas. D. Dudosos. SEI. Sin evidencia de incendios

(3) Err-RSI. Error de la digitalización

(4) Err-RSI-O. Error por omisión

(5) Err-RSI-F. Error por falta de imágenes

Tabla A4. Errores del RDC tomando como referencia las imágenes satelitales (RIS).

Temporadas	RDC-FAC	SEI	Err-RDC
07-08	40	7	18
08-09	23	4	17
09-10	1	0	0
10-11	20	5	25
11-12	23	7	30
12-13	21	0	0
13-14	32	7	21
14-15	44	4	9
15-16	32	2	6
16-17	90	7	8
17-18	87	6	7
Totales 07-18	413	49	12

- (1) RDC. Registro de Defensa civil. SEI. Sin evidencia de incendios
- (2) Err-RDC. Error en los Registros de fuego de Defensa Civil.

Correcciones de la serie de fuego en base a los registros de Defensa Civil.

Los errores por omisión fueron corregidos incorporando al régimen de fuegos los polígonos correspondientes. Asimismo, la temporada 12-13 fue eliminada de la serie dada la poca disponibilidad de imágenes para ese periodo. Las únicas imágenes Landsat disponibles en ese periodo corresponden a la misión L7, las cuales presentan un bajo nivel de calidad dada la presencia de numerosas franjas sin datos en la imagen. Estas falencias podrían ser subsanadas en un futuro mediante el uso de imágenes del satélite CBERS o MODIS. Las correcciones realizadas redujeron el error total de la digitalización de 30 a 10%.