

Efecto de los incendios sobre el funcionamiento de pastizales y forestaciones en las Sierras de Córdoba durante el período 2002-2015

Trabajo final presentado para optar al título de Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio de los recursos naturales y la producción agropecuaria

Luisa Fernanda Cabezas García

Ingeniera Forestal - Universidad del Tolima - 2009

Especialista en Sistemas de Información Geográfica Universidad Distrital Francisco José de Caldas - 2011



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires

TUTOR

Tutor

Marcelo Daniel Nosetto

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional de Entre Ríos
PhD. Ciencias Agropecuarias - Universidad de Buenos Aires

JURADO DE TRABAJO FINAL

Jurado

Maria Eugenia Beget

Ingeniera Agrónoma - Universidad de Buenos Aires
Magister en Recursos Naturales – Universidad de Buenos Aires

Jurado

Gervasio Piñeiro Guerra

Ingeniero Agrónomo – Universidad de la República del Uruguay
Doctor en Ciencias Agropecuarias – Universidad de Buenos Aires

Fecha de defensa del Trabajo Final: 15 de agosto de 2019

Agradecimientos

A Dios, porque Él con su increíble poder hace posible que todo acontezca.
A mis padres por su amor y apoyo incondicional, en todo momento y lugar.
A mi ahora esposo, quien fue el primer motivo para vivir en la bella Argentina.

A Marcelo Nosetto, mi tutor, por estar siempre atento a mis constantes dudas con su cordialidad y aportes de excelencia.

A Julieta Straschnoy por su excelente labor y gestión administrativa para poder lograr este objetivo.

"Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución."

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	8
Abstract	9
1. Introducción	10
2. Materiales y Métodos.....	14
2.1 Área de estudio.....	14
2.2 Metodología y productos utilizados.....	16
2.2.1 Identificación de coberturas.....	16
2.2.2 Selección de sitios de estudio.....	17
2.2.3 Caracterización funcional de áreas quemadas y control.....	19
3. Resultados y discusión.....	20
3.1 Efecto de los incendios sobre NDVI y EVI en forestaciones y pastizales.....	20
3.2 Valores medios y tendencias de índices de vegetación en sitios control.....	24
3.3 Efectos de los incendios sobre el albedo en forestaciones y pastizales.....	26
4. Conclusiones.....	29
5. Referencias bibliográficas.....	31
6. Bibliografía.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aplicaciones de la teledetección para el estudio y seguimiento de los incendios. Tomado del curso Detección, cuantificación y seguimiento de los fuegos a través de percepción remota, EPG-FAUBA. 2014. (A: Etapa Pre fuego, B-D: Etapa Post Fuego, E: condiciones meteorológicas para la ocurrencia de fuegos).	13
Figura 2. Área de estudio. Imágenes Landsat (229/82 y 229/83), RGB 543, En verde oscuro se observan las forestaciones, en magenta los pastizales y las áreas negras son cuerpos de agua. Autor.....	16
Figura 3. Coberturas encontradas en la zona de estudio a partir de interpretación visual de imágenes Landsat.	17
Figura 4. Ubicación de áreas quemadas, puntos elegidos para el estudio y puntos de control (Forestaciones y Pastizales).....	18
Figura 5. Dinámica anual del NDVI en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino.....	20
Figura 6. Dinámica de NDVI en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino cada 16 días. La flecha indica el momento del incendio.	21
Figura 7. Dinámica anual del EVI en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino.....	22
Figura 8. Dinámica de EVI en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino cada 16 días. La flecha indica el momento del incendio.	23
Figura 9. Tendencias temporales del NDVI en forestaciones control (marcadores azules) y pastizales control (marcadores rojos). La línea llena muestra el ajuste considerando todos los años del período, mientras que la línea punteada muestra el ajuste correspondiente al período 2009-2015.....	24
Figura 10. Tendencias temporales del EVI en forestaciones control (marcadores azules) y pastizales control (marcadores rojos). La línea llena muestra el ajuste considerando todos los años del período, mientras que la línea punteada muestra el ajuste correspondiente al período 2009-2015.....	25
Figura 11. Precipitación anual en Yacanto (Calamuchita, Córdoba). La línea llena muestra el ajuste considerando todos los años del período, mientras que la línea punteada muestra el ajuste correspondiente al período 2009-2015.	26
Figura 12. Dinámica anual del albedo de onda corta en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino.	27

Figura 13. Dinámica anual del albedo visible en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino..... 28

Figura 14. Dinámica anual del albedo del infrarrojo cercano en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino..... 29

Título:

Efecto de los incendios sobre el funcionamiento de pastizales y forestaciones en las Sierras de Córdoba durante el período 2002-2015

Resumen

El fuego es un disturbio natural en los ecosistemas y cumple un rol fundamental como modelador del paisaje, afectando la estructura, composición y algunos procesos ambientales, sin embargo, las actividades humanas pueden aumentar su frecuencia y severidad. Los incendios constituyen uno de los principales disturbios en las Sierras de Córdoba, Argentina, afectando aproximadamente 2.152.000 hectáreas quemadas entre 1993 y 2012. En este trabajo se analizaron los efectos de los incendios sobre el funcionamiento post-fuego de ecosistemas de pastizal y forestaciones de pino en las Sierras de Córdoba. Para esto, se identificaron áreas, tanto de pastizal como de forestaciones, que habían sido quemadas solo en una instancia durante el período 2002-2012 a partir de información Landsat y de Google Earth. A partir de la información MODIS se pudo evidenciar el fuerte impacto de los incendios sobre el NDVI de forestaciones que tan solo después del quinto año posterior al incendio registró valores similares a los pastizales (a escala anual), mientras que para los pastizales su impacto no fue tan notable; de igual manera el EVI de las forestaciones tuvo una caída abrupta posterior al incendio alcanzando valores incluso menores a los de los pastizales en el año posterior al incendio. También se pudo observar a partir de datos MODIS que el efecto del incendio sobre el albedo de las forestaciones fue mucho más gradual, mientras que en los pastizales no se observaron diferencias significativas durante todo el período de estudio, resaltando que solo a partir del séptimo año posterior al incendio se observan diferencias significativas entre la forestación quemada y la forestación control.

Palabras clave: Albedo, temperatura superficial, NDVI, EVI, disturbio natural.

Title:

Fire effects in the performance of pastures and afforestation in the Sierras de Córdoba during the period 2002-2015

Summary

Fire is a natural disturbance in the ecosystems and has a fundamental role as a landscape modeler, affecting the structure, composition and some environmental processes, however human activities can increase its frequency and severity. Fires are considered the most important disturbances in the Sierras de Córdoba, Argentina, affecting approximately 2,152,000 hectares of forest between 1993 and 2012. This study analyzed the effects and behavior of pasture and pine forestation ecosystems, post-fire in the Sierras de Córdoba. For this purpose, were identified areas of pasture and afforestation that had been burned only once during the period 2002-2012, using the Landsat and Google Earth information. Using MODIS information, with its NDVI and EVI indices, was detected the strong impact of the fires in afforestations NDVI index, was evidenced that only after the fifth year that the fire was happened, the NDVI obtained values similar to grasslands (annual scale), while for pastures their impact was not so remarkable; in the same way the afforestations EVI index had an abrupt fall after the fire, achieving lower values than the grasslands values in the year after the fire. It was also observed with MODIS data that the effect of the fire on the albedo of forestations was much more gradual, while in grasslands were not observed significant differences during all the study period, noting that only from the seventh year after fire, there are significant differences between burned forestation and control forestation.

Keywords: Albedo, Surface Temperature, NDVI, EVI, natural disturbance.

1. Introducción

El fuego produce alteraciones importantes en el ecosistema tales como cambios en la vegetación, el suelo o el paisaje, modificaciones en el balance de energía y agua, en los ciclos biogeoquímicos, perturbaciones físico-químicas en la atmósfera, pérdidas económicas o daños en la salud y la vida de las personas (Di Bella y Posse 2014, p. 337). Por otro lado, el fuego también desempeña una función importante y esencial para mantener la salud de ciertos ecosistemas, pero a causa de los cambios climáticos y del uso (y abuso) humano del fuego, los incendios son ahora una amenaza para muchos bosques y su biodiversidad (Nasi et al. 2001). Además, existen cada vez más evidencias que sugieren aumentos en la frecuencia e intensidad de los incendios a causa del cambio climático (Kasischke y Turetsky 2006, Westerling et al. 2006).

Los incendios se pueden originar por distintas causas entre las cuales los accidentales y los intencionalmente iniciados por productores agrícolas y ganaderos son los de mayor relevancia. Los propósitos para los que se utiliza el fuego son varios e incluyen la limpieza de los terrenos recién desmontados para la agricultura, la eliminación de residuos agrícolas, la eliminación de la vegetación con fines de destrucción de malezas, plagas y animales peligrosos; y la quema de los pastizales para favorecer un rebrote de mayor calidad para el ganado y para la cacería (Vázquez y Orozco, 1989). Por otro lado, existe también una importante proporción de incendios cuyas causas son desconocidas (PNMF 2003-2006).

Los incendios de las coberturas vegetales, y en particular de las forestales, afectan diversos procesos biogeoquímicos, tanto a escala local como global. A escala mundial, son una fuente importante de emisión de dióxido de carbono, contribuyendo al calentamiento global (Nasi et al. 2001). En los planos regional y local, modifican el volumen de biomasa y la cobertura del suelo, alteran el ciclo hidrológico (Dore et al. 2010) y el del carbono (O'Halloran et al. 2011), e influyen en el comportamiento de las especies vegetales y animales (Nasi et al. 2001). El humo procedente de los incendios puede reducir notablemente la actividad fotosintética y perjudicar la salud de los seres humanos y de los animales (Nasi et al. 2001).

Los efectos de los incendios en el suelo van a depender de la topografía del lugar, intensidad del proceso de erosión, tasa de regeneración de la cubierta vegetal post-incendio, recurrencia, intensidad y duración del fuego. Los principales impactos de los incendios forestales son a nivel de las propiedades (físico, químico y biológica) y productividad del suelo. Estos impactos se traducen en: generación de erosión, pérdida de nutrientes, disminución de la materia orgánica, alteración de la vegetación. (González, 2017).

En el suelo descubierto tras el incendio, y frecuentemente ennegrecido por las partículas de carbón, con un albedo, generalmente, muy inferior al de una superficie cubierta de vegetación, aumentan la temperatura y la evaporación, al tiempo que disminuyen la absorción y retención de agua, la porosidad, la aireación y la capacidad de infiltración superficial. El balance suele ser una reducción de la disponibilidad de agua y un aumento de la escorrentía y del peligro de erosión (Ramos, 2010).

Un aspecto importante y que ha cobrado relevancia más recientemente son los efectos de los incendios sobre el balance de radiación y el clima regional (Randerson et al. 2006). Más allá del efecto de los incendios sobre el ciclo del carbono (efecto biogeoquímico), a través de los cambios de albedo y temperatura superficial, también puede producir efectos biofísicos sobre el clima (O'Halloran et al. 2011). Si bien en el corto plazo los incendios pueden provocar una disminución del albedo, y por lo tanto una mayor absorción de radiación onda corta; en el mediano/largo plazo y a medida que la vegetación se va recuperando sería esperable que aumente el albedo con respecto a los valores pre fuego, principalmente en el caso de los bosques (O'Halloran et al. 2011). En este caso, el efecto biofísico del incendio podría llegar a ser de enfriamiento (mayor albedo y por lo tanto menor radiación onda corta absorbida), el cual se contrapone al efecto biogeoquímico de calentamiento. Por otro lado, los incendios podrían provocar cambios en la temperatura superficial lo cual podría afectar el balance de radiación de onda larga (Rotenberg y Yakir 2010). La respuesta de estos procesos sería posiblemente afectada por la cobertura vegetal que se incendia (forestaciones vs pastizales), lo cual ha sido muy poco explorado hasta el momento.

Otro aspecto relevante relacionado a los incendios y que ha sido poco analizado, particularmente en Argentina, está relacionado a las tasas de recuperación de la vegetación post-incendio. Estudios realizados por el grupo de fuegos del Instituto de Clima y Agua (INTA, Argentina), mediante el uso de índices espectrales indican que los mayores potenciales de recuperación del NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) corresponden a coberturas herbáceas y arbustivas (Di Bella et al. 2008). En áreas de bosques nativos, sin embargo, los niveles de recuperación observados han sido significativamente menores, como consecuencia de los niveles de severidad que estos eventos alcanzan en dichas coberturas (Di Bella et al. 2008). En las Sierras de Córdoba (Argentina), donde los incendios representan uno de los principales disturbios (Argañaraz et al. 2015), no se han estudiado todavía los efectos de los mismos sobre pastizales nativos y forestaciones, siendo esto lo que se pretende estudiar en este trabajo con el análisis de los índices NDVI y EVI (Enhanced Vegetation Index), los cuales según Huete 1987; Paruelo 1998; De Santis y Chuvieco 2007 en Di Bella et al. 2008. han demostrado tener distintos niveles de correlación con parámetros biofísicos de la vegetación, como la cantidad de biomasa, la actividad fotosintética, la productividad y el contenido hídrico.

Si bien el inicio de un incendio es generalmente impredecible, el desarrollo del mismo es influenciado por condiciones abióticas (Bravo et al. 2010, Fischer et al. 2012) y bióticas (cantidad, tipo y contenido de humedad del combustible) (Di Bella et al. 2011, Fischer et al. 2015), donde la cobertura vegetal juega un rol fundamental. En Argentina, los incendios afectan grandes superficies cada año. Según el Plan Nacional de Estadística Forestal, se detectaron alrededor de 12.000 incendios por año en la última década, afectando aproximadamente 1,3 millones de hectáreas (PNEF 2000-2012). En la provincia de Córdoba los fuegos afectan grandes superficies, y es en la zona serrana en particular donde, debido a las altas temperaturas, la sequía y los vientos fuertes, los fuegos se propagan a grandes extensiones y se presentan con marcada recurrencia (Argañaraz et al. 2015). En dicha región, los incendios han generado profundas transformaciones en los ecosistemas, provocando la retracción de bosques nativos (Renison et al. 2002), erosión de suelos (Cingolani et al. 2013), cambios en la calidad de

agua almacenada en represas (Bonansea y Fernández 2012), además de destruir la infraestructura local.

La teledetección, práctica de obtener información sin estar en contacto con la cobertura, es una herramienta importante de apoyo para el estudio de diversos fenómenos naturales y antrópicos que se dan sobre la cubierta terrestre, así como de sus efectos ecológicos, climáticos y atmosféricos. Los sensores de diferentes satélites nos proporcionan gran cantidad de datos y una visión sinóptica de la distribución espacial de los incendios (focos activos) y de las zonas quemadas, así como del estado de la vegetación y los efectos producidos por los incendios (Díaz-Delgado, 2000). Desde inicios de la teledetección se han venido creando algoritmos, índices y una gran cantidad de estudios y aplicaciones para detectar los fuegos, caracterizarlos, cuantificarlos y estudiar las condiciones de la vegetación previas al fuego y/o de su regeneración. La gran ventaja de los datos provistos por los sensores remotos es la excelente resolución temporal y espacial para hacer un seguimiento continuo, en tiempo real y económicamente viable. Las distintas herramientas de la teledetección nos permiten estudiar los fuegos en sus diferentes etapas, desde las condiciones previas (Fig. 1 A) hasta las características del propio fuego y la recuperación de la vegetación post-fuego (Fig. 1 B-D). También la teledetección se puede utilizar para analizar las condiciones meteorológicas necesarias para que ocurran los incendios como así también las consecuencias de los mismos sobre el clima (Fig. 1 E).

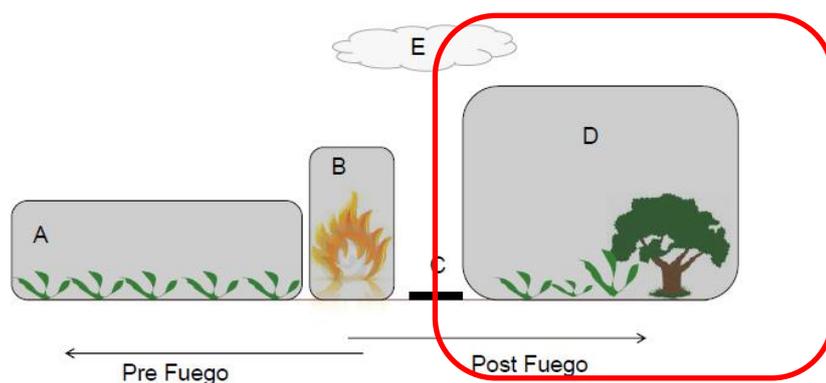


Figura 1. Aplicaciones de la teledetección para el estudio y seguimiento de los incendios. Tomado del curso Detección, cuantificación y seguimiento de los fuegos a través de percepción remota, EPG-FAUBA. 2014. (A: Etapa Pre fuego, B-D: Etapa Post Fuego, E: condiciones meteorológicas para la ocurrencia de fuegos).

Estudios previos sobre fuegos en la región se han enfocado en analizar y caracterizar los fuegos, su distribución espacial y su asociación con distintas variables (latitud, cobertura vegetal, uso del suelo, condiciones meteorológicas) (Di Bella et al. 2011, Fischer et al. 2012). Otros trabajos se han enfocado en estudiar las condiciones del combustible y su relación con la ocurrencia, tamaño y duración de los fuegos (Fischer et al. 2015). Específicamente en las Sierras de Córdoba, se ha evaluado las condiciones biofísicas que favorecen los fuegos y los tipos de vegetación que más comúnmente se queman (Argañaraz et al. 2015). En este trabajo busco evaluar en la región de las Sierras de Córdoba distintos aspectos de los fuegos y su relación con el tipo de cobertura vegetal, comparando forestaciones de pino y pastizales nativos.

El objetivo general del trabajo fue analizar el efecto de los incendios sobre el funcionamiento de ecosistemas de pastizal y forestaciones de pino en las Sierras de Córdoba (Argentina). Los objetivos específicos fueron:

- Identificar las áreas que se quemaron una única vez durante el período 2002 – 2012.
- Caracterizar los cambios en las variables NDVI, EVI y albedo, generados por los incendios en pastizales y forestaciones, y compararlos con el comportamiento de estas variables los años previos al incendio.

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

El trabajo se enfocó en la zona de las Sierras de la Provincia de Córdoba (Argentina), en los departamentos de Calamuchita, Santa María y Río Cuarto (Figura 2). La época de incendios en Córdoba coincide con su estación seca, que va desde comienzos del invierno hasta fines de la primavera. Este periodo se caracteriza por la presencia abundante de material vegetal, fruto de la temporada de crecimiento estival, el cual se seca por la falta de agua y por la presencia de heladas que matan a las plantas herbáceas. A las condiciones de falta de humedad y de disponibilidad de combustible seco hay que agregar los frecuentes vientos de agosto y septiembre que agravan los incendios (Colombatti, 2007).

En la zona de estudio, en la provincia de Córdoba se concentra el área forestada con pinos más importante del centro del país, siendo *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* las especies forestales más utilizadas en la región por su valor forestal y su adaptabilidad a distintas condiciones de sitio, según Izurieta et al 1993; Verzino et al., 1993; Dorado et al., 1997, en Serafini et. al 2014. Estas plantaciones se establecieron principalmente en la década del 70 a partir de distintos tipos de incentivos fiscales, por lo que al momento del inicio de este estudio las mismas presentaban entre 42 y 47 años de edad. Las mismas fueron muy raramente sometidas a tareas de poda y/o raleo, y actualmente están siendo explotadas de manera parcial. En la última década se observa un proceso de invasión espontánea de pinos hacia los pastizales nativos circundantes, lo cual también ha sido observado en pastizales y arbustales forestados con pino en otras regiones del mundo (Richardson 1998).

La precipitación media anual en la zona de Calamuchita es de 850 mm, concentrada principalmente entre los meses de octubre y abril, y la evapotranspiración potencial alcanza los 1200 mm/año. Según Cabido et al. 1997, la temperatura media anual decrece desde los 13,1 a 9,7 ° C al ascender desde 1000 a 1800 m de elevación en Jobbágy et al. 2013. La litología está dominada por rocas metamórficas (gneis y anatexitas ultrametamórficas, basamento pre-devónico) que suelen presentar relieves homogéneos y abundantes afloramientos (Bonalumi et al. 1999 en Jobbágy et al. 2013). Una fracción minoritaria de las laderas, en sus sectores más planos o pampas, está ocupado por sedimentos cuaternarios (Acosta et al. 1992 en Jobbágy et al. 2013). Los suelos son predominantemente someros con 10 a 60 cm de desarrollo hasta la roca y estratos de carbonato de calcio cuando son más profundos. La cobertura vegetal natural dominante en la actualidad es la de pastizales, que se encuentran sujetos a pastoreo extensivo por ganado bovino y en menor medida caprino (Jobbágy et al. 2013).

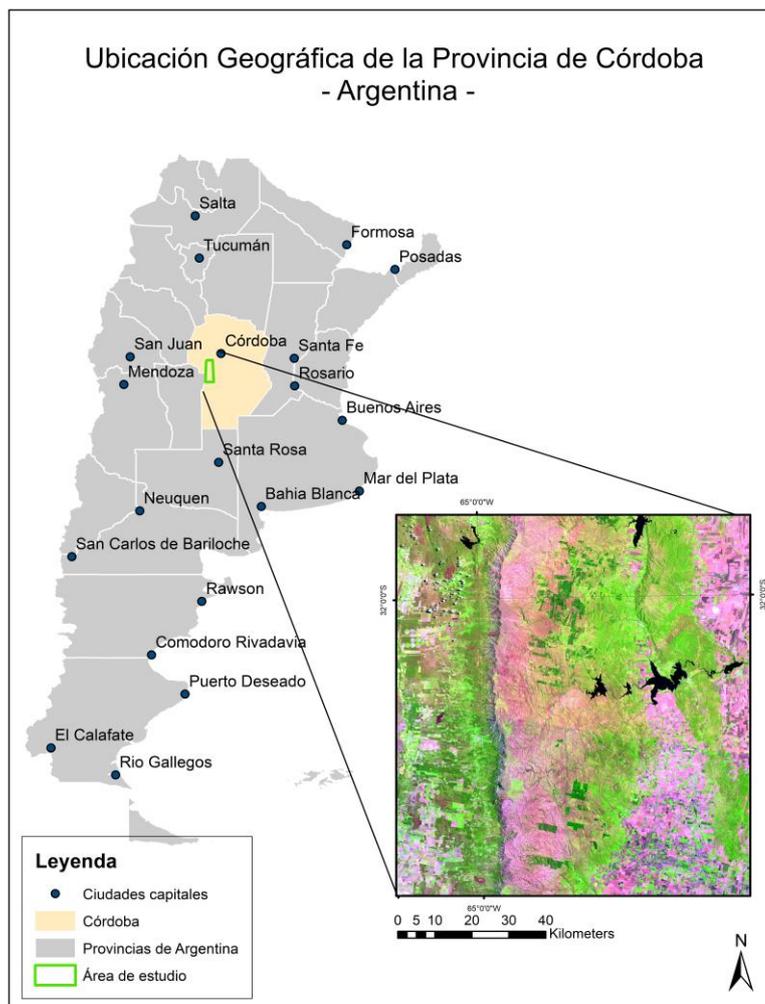


Figura 2. Área de estudio. Imágenes Landsat (229/82 y 229/83), RGB 543, En verde oscuro se observan las forestaciones, en magenta los pastizales y las áreas negras son cuerpos de agua. Autor.

2.2 Metodología y productos utilizados

2.2.1 Identificación de coberturas

En primer lugar para conocer la distribución de las coberturas presentes en el área de estudio se realizó interpretación visual de imágenes Landsat (descargadas del sitio web: <http://earthexplorer.usgs.gov/>). Las escenas correspondientes al área de estudio son 229/82 y 229/83 y la interpretación visual se llevó a cabo con apoyo de Google Earth. A partir de esta interpretación visual se pudo cuantificar, al año 2001, la superficie de forestaciones, pastizales y tierras agrícolas (Figura 3). La cobertura de pastizales

naturales fue la más abundante abarcando el 88,3 % del área de estudio, mientras que las plantaciones forestales representaron 5,5 %.

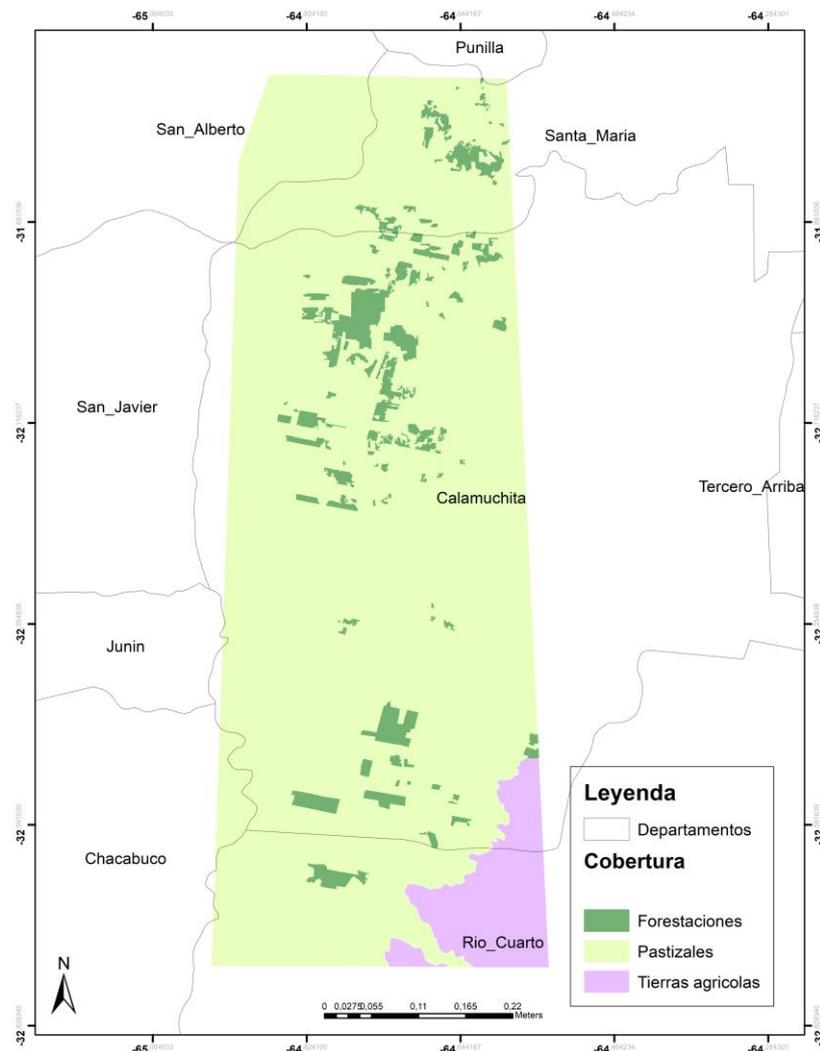


Figura 3. Coberturas encontradas en la zona de estudio a partir de interpretación visual de imágenes Landsat.

2.2.2 Selección de sitios de estudio

Para la identificación de las áreas quemadas para el estudio, se utilizó el producto de áreas quemadas de MODIS (MCD45A1), el cual tiene una resolución temporal mensual y espacial de 500 m. La descarga de dicho producto se realizó del sitio web <https://search.earthdata.nasa.gov/search>, y se analizó el período 2002-2012. A partir de este producto se digitalizaron las áreas quemadas en un único archivo vectorial con la fecha de ocurrencia del evento, para posteriormente elegir los 30 puntos para el estudio (15 forestaciones y 15 pastizales). La condición que se tuvo en cuenta para la selección

de dichos puntos fue que las áreas hubieran sido quemadas en una única vez durante el periodo de estudio. Por otro lado, se seleccionaron 30 puntos de control (15 pastizales y 15 forestaciones) que nunca se hubieran quemado en el período de estudio ni en los 3 años previos. Los mismos se utilizaron a fin de comparar el efecto de los fuegos sobre el funcionamiento de los ecosistemas.

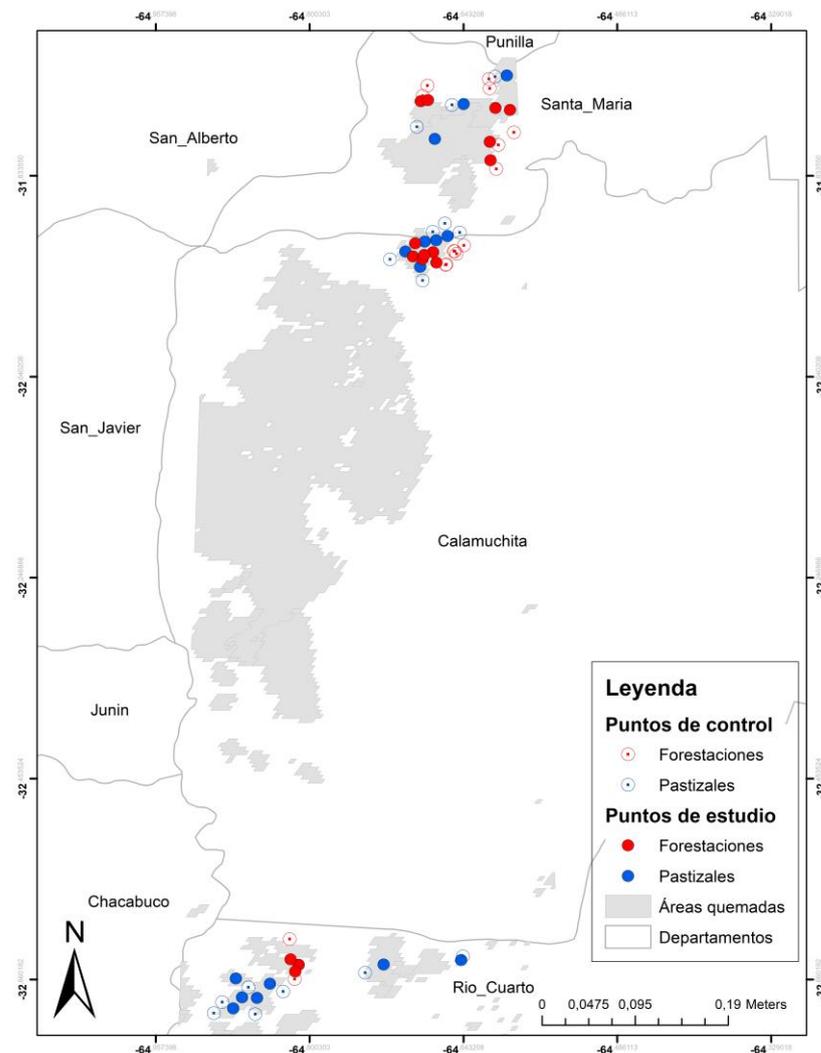


Figura 4. Ubicación de áreas quemadas, puntos elegidos para el estudio y puntos de control (Forestaciones y Pastizales).

Adicionalmente, se descargó de la página <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map>, el producto de focos de calor que tiene una resolución espacial de 1 kilómetro, y con este producto se comparó si la detección de los focos de calor fueron los mismos que los presentes en el producto MCD45A1 de áreas quemadas. En este análisis se pudo

observar que de los 30 puntos elegidos (forestaciones y pastizales), 26 fueron detectados por las dos fuentes, es decir el 86,66 %.

2.2.3 Caracterización funcional de áreas quemadas y control

Para analizar el funcionamiento de los ecosistemas y describir el impacto de los fuegos sobre el mismo, se utilizaron series temporales de NDVI, EVI y albedo para el período 2000 – 2015. Las mismas fueron descargadas del sitio web: <http://daacmodis.ornl.gov>.

Los productos NDVI y EVI (MOD13Q1) utilizados tienen una resolución espacial de 250 metros y temporal de 16 días. Los productos de albedo (MCD43A) también tienen una resolución temporal de 16 días y espacial de 500 m.

Para la generación de los productos de 16 días de MODIS (MOD13Q1 y MCD43A1), el algoritmo selecciona, teniendo en cuenta variables como ángulo solar y presencia de nubes, al mejor representante de píxeles de un grupo que incluye todas las adquisiciones del satélite Terra del periodo. El producto MODIS -MOD13Q1- de NDVI y EVI se calcula a partir de la reflectancia bi-direccional de la superficie corregida atmosféricamente, enmascarando el agua, los aerosoles pesados y las sombras de nubes.

El efecto de los incendios sobre el NDVI y el EVI se evaluó a la escala anual y cada 16 días. Para el análisis a la escala anual, se homogeneizó la fecha de ocurrencia del incendio para los distintos sitios. Para esto, se localizó la fecha de ocurrencia del incendio y se promediaron las variables satelitales partiendo de dicho punto hacia adelante (post-fuego) y hacia atrás (pre-fuego) con un paso temporal de 365 días. Para el análisis cada 16 días, solo se seleccionaron aquellos sitios quemados en la misma fecha, de manera de independizarnos del efecto de la estacionalidad de la vegetación.

3. Resultados y discusión

3.1 Efecto de los incendios sobre NDVI y EVI en forestaciones y pastizales

Los incendios tuvieron un fuerte impacto en la magnitud y en la dinámica del NDVI solo en las forestaciones, mientras que en los pastizales no se detectaron cambios a la escala anual (Figura 5). El año inmediato posterior al incendio, se observó una caída del NDVI promedio en las forestaciones de 17 %, respecto a los sitios control ($p < 0,05$). En cambio, no se observaron diferencias significativas en el caso de los pastizales.

En las forestaciones, el cambio en la dinámica del NDVI fue rotundo y nunca regresó a los valores observados pre-fuego. Hasta 5 años luego de producido el incendio, las forestaciones quemadas mantuvieron valores de NDVI menores a las forestaciones control, pero algo mayores a los sitios de pastizal. A partir del sexto año, el NDVI de las forestaciones quemadas ya no se diferenció estadísticamente de los valores del pastizal ($p > 0,05$).

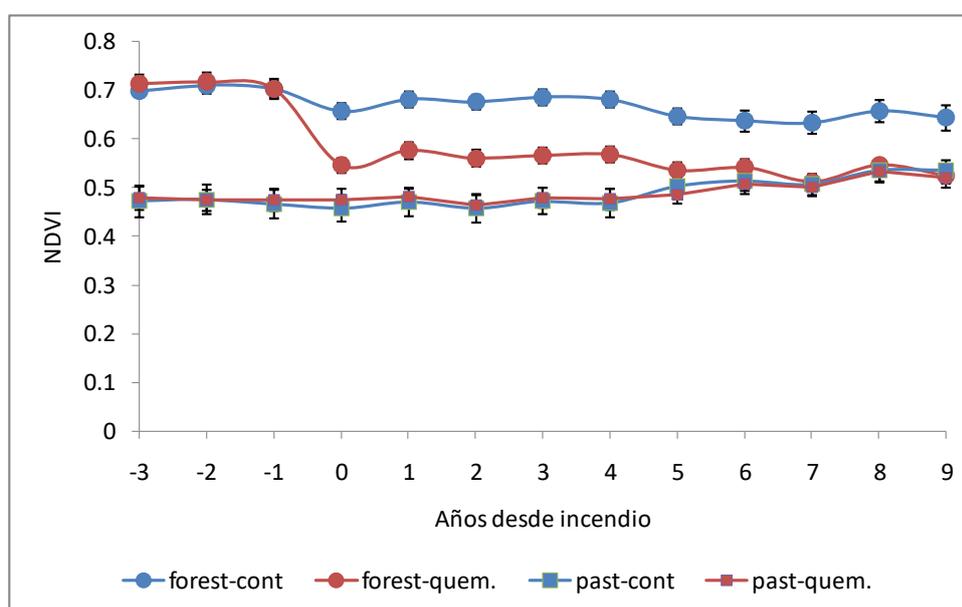


Figura 5. Dinámica anual del NDVI en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino.

A una mayor resolución temporal se evidencia más claramente la caída del NDVI producida por el incendio en las forestaciones, no así en los pastizales. A fin de analizar

el efecto del incendio sobre el NDVI cada 16 días se seleccionaron solo aquellos sitios, tanto de pastizal como de forestación, que se quemaron en la misma fecha. En este caso fueron 5 sitios de forestación y 7 de pastizal que se quemaron el 1° de Noviembre de 2003. Esta fecha es cercana al período en que se observan los valores mínimos de NDVI tanto en forestaciones como en pastizales. Mientras que en los pastizales no se observa una caída significativa en el NDVI a esta escala temporal (-8 %; $p=0,22$), en las forestaciones se observa una caída del 45 % respecto a la fecha pre-fuego ($p<0,05$). A esta escala de análisis también es interesante notar como el patrón estacional del NDVI de las forestaciones quemadas no se diferencia del de los pastizales quemados y control, después de transcurridos 7 años del incendio.

Por otro lado, en los pastizales se observó que el pico de NDVI posterior al incendio fue ligeramente superior en los sitios quemados respecto a los sitios control (+12 %); si bien la diferencia no fue significativa ($p=0,12$) es interesante notar que esto no ocurrió en los tres años anteriores, previos al incendio. Quizás la liberación de nutrientes que se produce luego del incendio (Scasta et al. 2015, Reinhart et al. 2016), favorezca el aumento en la productividad del pastizal. De todos modos, esta hipótesis requiere futuro análisis para su comprobación.

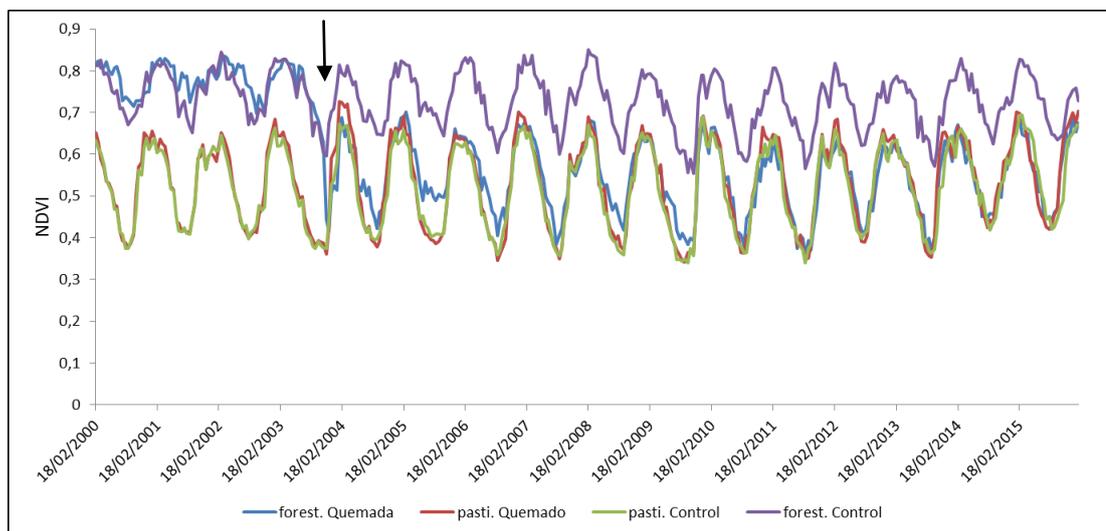


Figura 6. Dinámica de NDVI en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino cada 16 días. La flecha indica el momento del incendio.

De manera similar a lo observado con el NDVI a escala anual, los incendios afectaron el EVI solo en las forestaciones, mientras que en los pastizales no se detectaron cambios a esta escala (Figura 7). El año inmediatamente posterior al incendio se observó una caída del EVI promedio en las forestaciones del 30 %, respecto a los sitios control ($p < 0,05$), observándose incluso un valor menor que el de los pastizales, aunque la diferencia no fue significativa. En cambio, no se observaron diferencias significativas en el caso de los pastizales asociadas al incendio. Los años posteriores al incendio no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los pastizales (quemados y control), y las forestaciones quemadas.

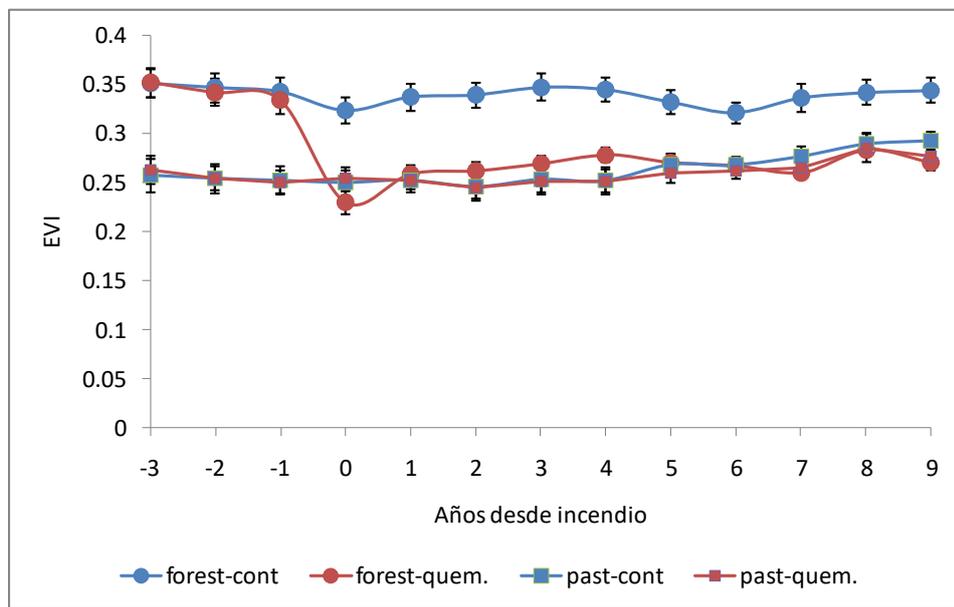


Figura 7. Dinámica anual del EVI en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino.

A mayor escala temporal (cada 16 días) se observa claramente la abrupta caída del EVI en las forestaciones luego del incendio y una caída mucho más sutil en los pastizales (Figura 8). Comparando con la fecha pre-fuego, la caída del EVI en las forestaciones alcanzó el 44 % ($p < 0,05$), mientras que en los pastizales esta caída fue de solo el 18 % ($p = 0,05$). El EVI de las forestaciones quemadas toma una dinámica muy similar a la de los pastizales tan solo tres años luego del incendio. También se observa que el pico de EVI de la estación siguiente al incendio es ligeramente superior en los pastizales

quemados que en los control (+18 %, $p=0,12$), aunque la diferencia no es estadísticamente significativa.

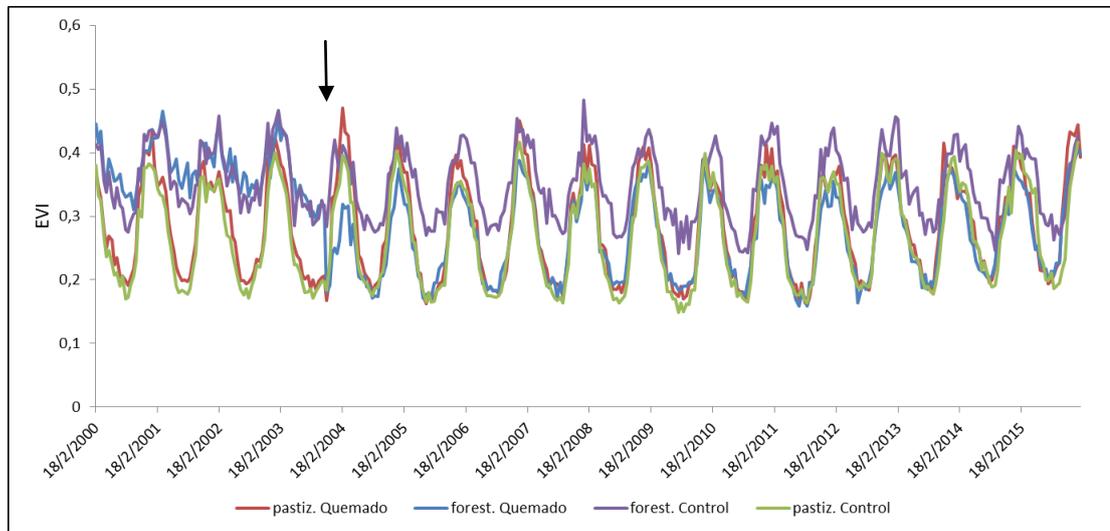


Figura 8. Dinámica de EVI en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino cada 16 días. La flecha indica el momento del incendio.

Se observaron claras diferencias entre las respuestas del NDVI y EVI a los incendios en las forestaciones a las dos escalas temporales analizadas (Figuras 5 a 8). A la escala anual, mientras que en el EVI la caída posterior al incendio es abrupta alcanzando el valor de los pastizales (o incluso menos) el año inmediato posterior al incendio, en el caso del NDVI la caída fue más gradual igualando a los pastizales recién a partir del sexto año luego del incendio. A la escala de 16 días, se observa que en la forestación quemada los valores máximos de NDVI se equiparan rápidamente a los de los pastizales, mientras que los valores mínimos tardan hasta 7 años en equiparar a los pastizales. En el EVI se observa un patrón opuesto, es decir, los valores mínimos de EVI se equiparan inmediatamente con el de los pastizales, mientras que los valores máximos tardan hasta 4 años en alcanzar los valores máximos de los pastizales. Estas diferencias de funcionamiento que sugieren ambos índices (cambian los máximos o los mínimos) son relevantes desde el punto de vista de comprender la respuesta de la vegetación ante un incendio y merece un análisis más detallado en el futuro.

3.2 Valores medios y tendencias de índices de vegetación en sitios control

En concordancia con trabajos previos (Nosetto et al. 2005, Vasallo et al. 2012), el NDVI de las forestaciones fue superior al de los pastizales, sugiriendo una mayor productividad primaria en los primeros (Figura 9). En promedio para todo el período analizado las forestaciones control presentaron un NDVI 51 % superior al de los pastizales. Es interesante notar que esta diferencia se achicó con el transcurrir de los años analizados, siendo de 58 % en los primeros tres años y reduciéndose a 44 % en los últimos tres. Esto resulta explicado por una tendencia temporal decreciente en el NDVI de las forestaciones ($r^2=0,29$, $p<0,1$) y creciente en los pastizales ($r^2=0,25$, $p<0,1$) (Figura 9). Es interesante notar también, que si se analizan separadamente los últimos siete años (2009-2015), se observa en ambas coberturas una tendencia creciente del NDVI, de ligera mayor magnitud en los pastizales que en las forestaciones, si bien las pendientes no fueron estadísticamente diferentes. Esta tendencia creciente no logra revertir la tendencia decreciente de más largo plazo observada en las forestaciones.

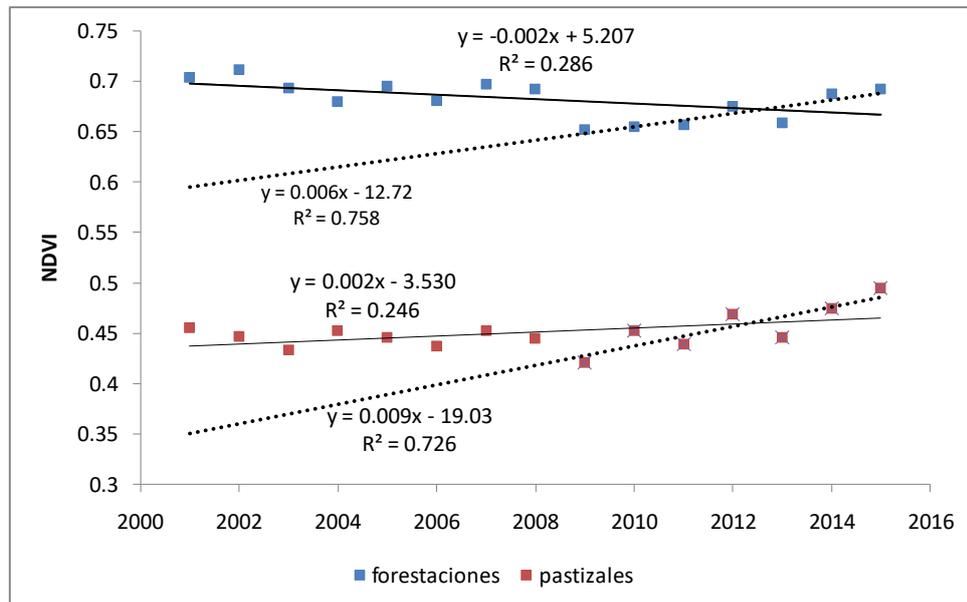


Figura 9. Tendencias temporales del NDVI en forestaciones control (marcadores azules) y pastizales control (marcadores rojos). La línea llena muestra el ajuste considerando todos los años del período, mientras que la línea punteada muestra el ajuste correspondiente al período 2009-2015.

Con el EVI (Figura 10) se observó un patrón similar al anteriormente nombrado. En promedio para todo el período analizado, el EVI de las forestaciones control fue 37 % superior al de los pastizales. Esta diferencia fue mayor en los primeros años del estudio (45 % para los primeros 3 años) y decayó con el transcurrir del tiempo (30 % para los últimos 3 años). Las tendencias, decreciente en forestaciones y creciente en pastizales, se mantienen y son de similar magnitud. También se observa en forestaciones y pastizales una tendencia marcadamente creciente del EVI para el período 2009-2015.

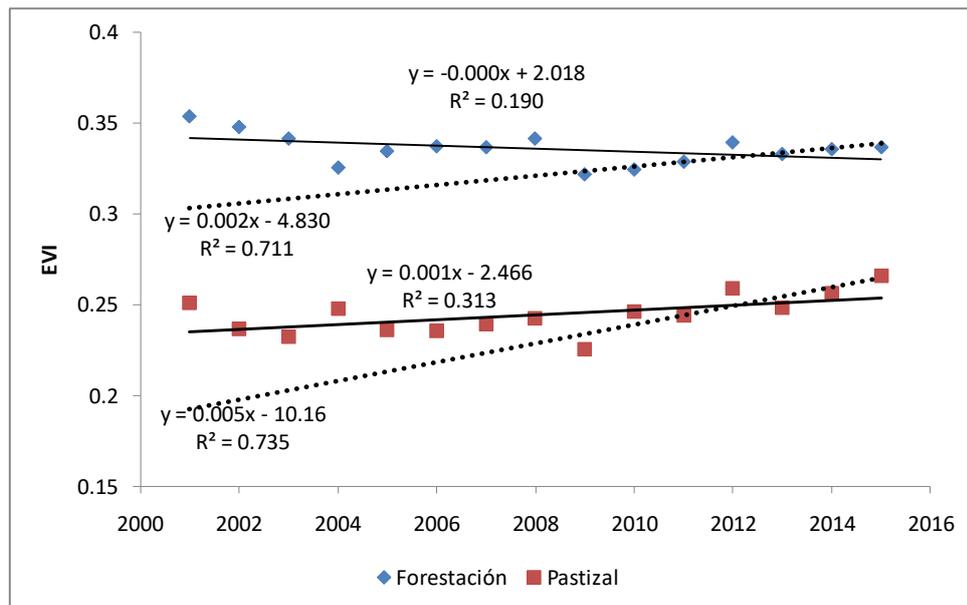


Figura 10. Tendencias temporales del EVI en forestaciones control (marcadores azules) y pastizales control (marcadores rojos). La línea llena muestra el ajuste considerando todos los años del período, mientras que la línea punteada muestra el ajuste correspondiente al período 2009-2015.

Las tendencias en el NDVI y EVI son interesantes y merecen un análisis detallado que escapa de los alcances de este trabajo. De todos modos, podría especularse que la caída en el NDVI (y EVI) de las forestaciones podría deberse a que las mismas se encuentran en un estado de adultez avanzando (+ de 25 años), lo cual se ha asociado a caídas en la productividad primaria de las mismas (Binkley et al. 2002). Por otro lado, el aumento en el NDVI (y EVI) de los pastizales estaría explicado por la fuerte tendencia ascendente que se da en los últimos años, la cual respondería al patrón de precipitaciones (Figura 11). En este sentido, se encontraron relaciones estadísticamente significativas entre la precipitación anual y los índices de vegetación, las cuales fueron ligeramente más

estrechas en el caso de las forestaciones ($r^2= 0,33$ y $r^2= 0,35$ para NDVI y EVI de forestaciones, y $r^2= 0,28$ y $r^2= 0,18$ para NDVI y EVI de pastizales).

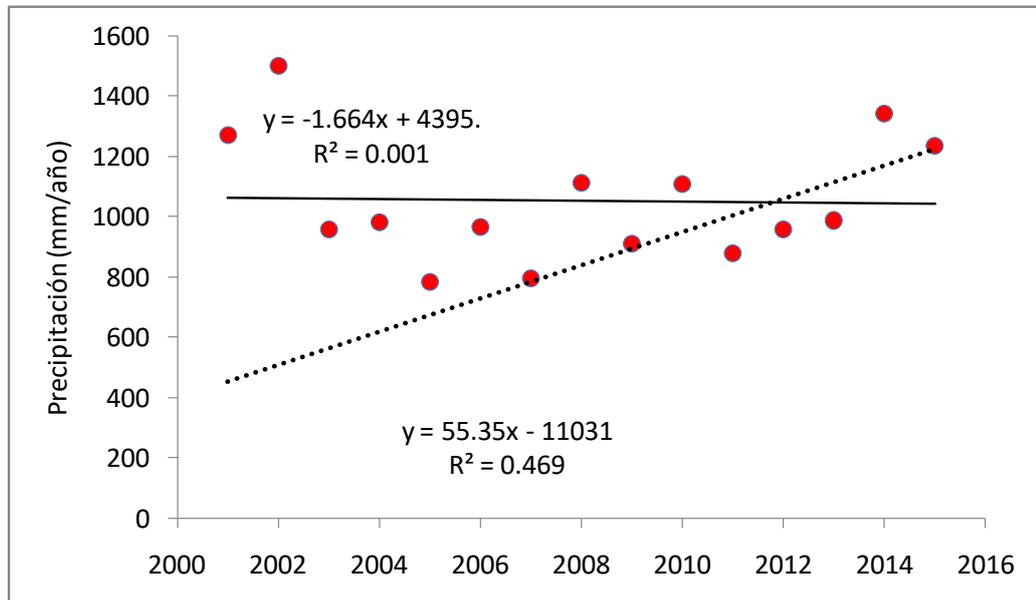


Figura 11. Precipitación anual en Yacanto (Calamuchita, Córdoba). La línea llena muestra el ajuste considerando todos los años del período, mientras que la línea punteada muestra el ajuste correspondiente al período 2009-2015.

3.3 Efectos de los incendios sobre el albedo en forestaciones y pastizales

A diferencia del NDVI y EVI, el efecto del incendio sobre el albedo de las forestaciones fue mucho más gradual, mientras que en los pastizales no se observaron diferencias. En el caso del albedo de onda corta de las forestaciones, se observa luego del incendio un muy gradual ascenso del mismo hasta hacerse similar al de los pastizales solo en los últimos años del período de análisis (Figura 12). Estadísticamente, recién a partir del octavo año luego de producido el incendio se observan diferencias significativas entre la forestación quemada y la forestación control. Esto podría deberse a que luego del incendio queda aún abundante biomasa muerta de troncos y ramas en pie lo cual favorece la absorción de radiación (Houspanossian et al. 2013), evitando que el albedo aumente de manera tan repentina.

Este trabajo confirma los menores valores de albedo de los bosques en comparación con la vegetación herbácea, observados en otros trabajos en la región (Nosetto et al. 2005, Jackson et al 2008, Houspanossian et al. 2013). Previo al incendio, las forestaciones presentaban un albedo de onda corta 0,02 menor que los pastizales (Figura 12). Esta diferencia es similar en magnitud a la encontrada por Jackson et al. 2008, al comparar forestaciones de pino y pastizales en la zona de Corrientes (Argentina), pero menor a la observada por estos mismos autores en las zonas de Entre Ríos (Argentina) y Rivera (Uruguay). La diferencia de albedo encontrada en este trabajo también es menor a la observada por Houspanossian et al. 2017 entre bosques xerófitos de la región chaqueña y pasturas.

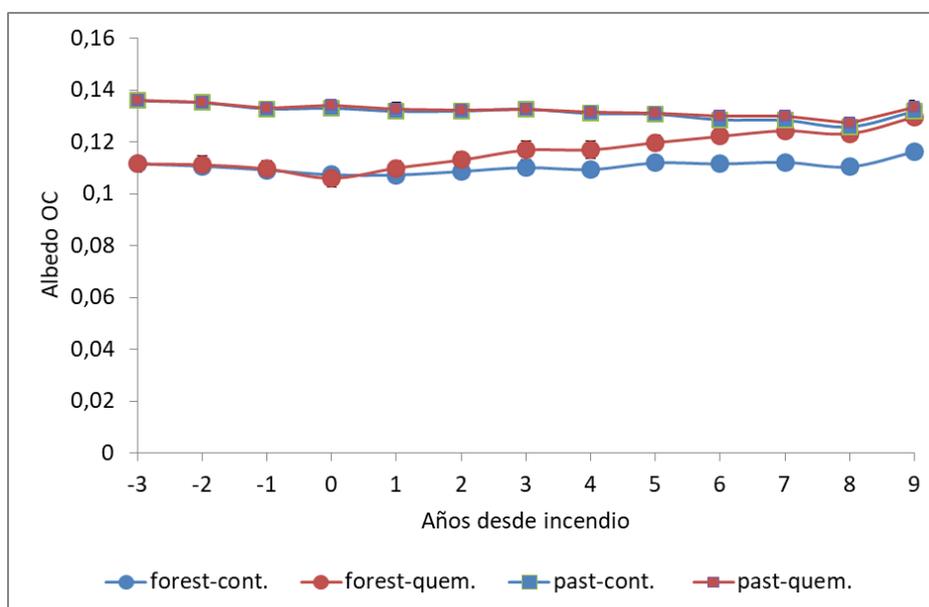


Figura 12. Dinámica anual del albedo de onda corta en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino.

Al separar el albedo onda corta en albedo visible e infrarrojo cercano, se observan ciertas diferencias en el efecto del incendio sobre ambas variables (Figuras 13 y 14). En el año inmediatamente posterior al incendio, se observa en el caso del albedo del infrarrojo cercano un pequeño descenso (-6 % respecto al valor pre-fuego) en las forestaciones quemadas, mientras que en el caso del visible se observa un pequeño aumento (+10 %), si bien en ambos casos nos son diferencias significativas. Posteriormente, se observa un aumento gradual de ambos albedos, mostrando

diferencias no significativas con el pastizal control y quemado, a partir del octavo año de producido el incendio.

Este trabajo concuerda con trabajos previos que muestran que el establecimiento de forestaciones produce un efecto biofísico de calentamiento a causa del menor albedo (Jackson et al. 2008). Sin embargo es interesante notar que el incendio revierte dicho efecto y debido al cambio en la comunidad vegetal que se traduce en un aumento de albedo, produce un efecto biofísico de enfriamiento. Esto también ya ha sido observado en otros ecosistemas, siendo en las regiones boreales donde se produce un mayor efecto de enfriamiento debido a un mayor contraste de albedo. Esto se debe a que los incendios de los bosques dejan expuesta la superficie del suelo, la cual está usualmente cubierta de nieve (Chen et al. 2018).

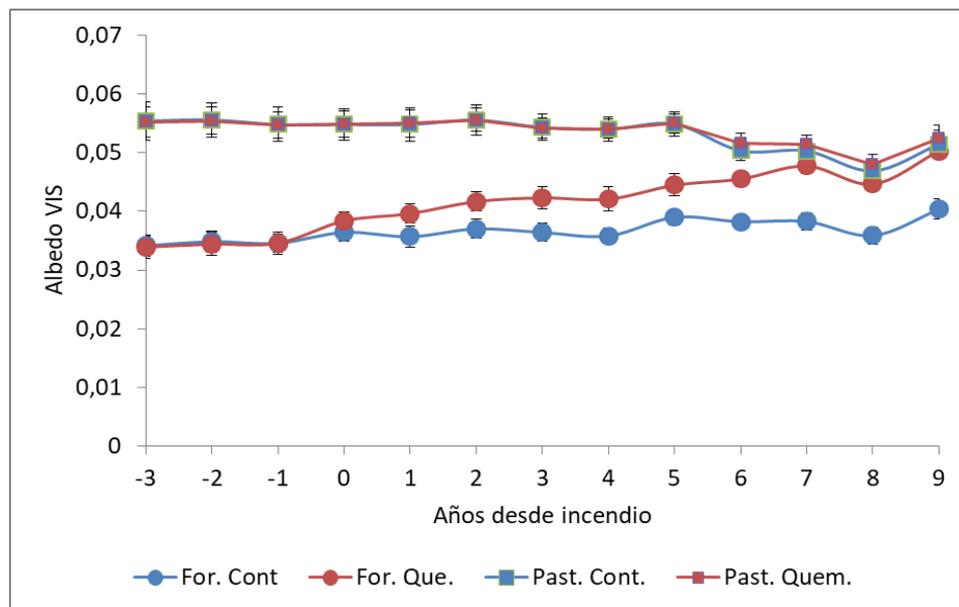


Figura 13. Dinámica anual del albedo visible en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino.

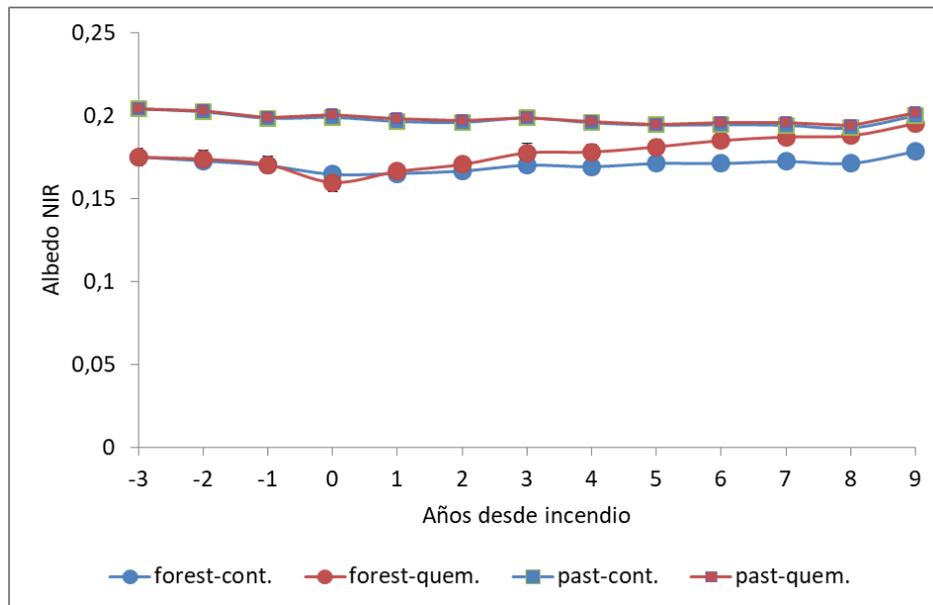


Figura 14. Dinámica anual del albedo del infrarrojo cercano en sitios quemados y control de pastizales naturales y forestaciones de pino.

4. Conclusiones

Después de realizados los análisis del efecto de los incendios sobre el funcionamiento post-fuego de ecosistemas de pastizal natural y forestaciones de pino en las Sierras de Córdoba se encontró que los incendios tuvieron impactos diferentes sobre las variables NDVI y EVI, a escala anual comportándose así:

- El NDVI de las forestaciones tuvo una caída gradual, igualando los valores de los pastizales control y quemados, solamente en el sexto año después de ocurrido el incendio.
- El EVI de las forestaciones después de ocurrido el incendio tiene una caída abrupta alcanzando un valor menor al de los pastizales en el año posterior al incendio.
- Los pastizales no tuvieron cambios significativos a esta escala.

A escala temporal de 16 días las variables se comportaron de la siguiente manera:

- El NDVI y el EVI de los pastizales no mostraron grandes cambios, los más importante a destacar es el pico que se da en esta cobertura en el año posterior al incendio (12 % para el NDVI y 18 % para el EVI), con respecto a los sitios control.

- Los valores máximos de NDVI de las forestaciones se asemejan rápidamente a los de los pastizales, mientras que los valores mínimos tardan 7 años en asemejarse a los de los pastizales.
- Los valores mínimos de EVI se asemejan inmediatamente a los de los pastizales, mientras que los valores máximos tardan 4 años en alcanzar a los valores de los pastizales.

La tendencia del NDVI y EVI en forestaciones de disminuir puede deberse a que las forestaciones tienen más de 25 años de plantadas lo cual se puede ver asociado a caídas en la productividad primaria, como se ha determinado en otros estudios.

Los incendios tuvieron efectos sobre el albedo de onda corta de las forestaciones y no de los pastizales, pero este fue muy gradual, tanto así, que las forestaciones quemadas y control tuvieron diferencias significativas tan solo 8 años después de ocurrido el incendio.

Este trabajo nos muestra que el incendio aumenta el albedo (el albedo de forestaciones es menor al de suelo desnudo y/o pastizales), lo que produce un efecto biofísico de enfriamiento, contrario al efecto de calentamiento desde el punto de vista del balance de carbono.

El NIR captó un descenso del albedo de las forestaciones en el año inmediatamente posterior al incendio, del 6 %.

Los valores obtenidos y las respuestas de las variables encontradas a partir de este trabajo pueden ser de interés para posibles futuras investigaciones en el área de estudio o comparaciones del comportamiento, dinámica e impacto de los fuegos sobre el funcionamiento de los ecosistemas de forestaciones de pino y pastizales en otras áreas de interés.

5. Referencias bibliográficas

Argañaraz, J., Radeloff, V., Bar-Massada, A., Gavier, G., Scavuzzo, M., y Bellis, L. (2015). *Mapeo y evaluación del riesgo de incendio en la interfase urbano-rural de las sierras de Córdoba*. Recuperado de http://www.researchgate.net/publication/277323769_Mapeo_y_evaluacin_del_riesgo_d_e_incendio_en_la_interfase_urbano-rural_de_las_sierras_de_Crdoba

Argañaraz, J., Gavier, G., Zak, M. y Bellis, L (2015). *Fireregime, climate, and vegetation in the sierras de Córdoba, Argentina*. 2015. Recuperado de <http://fireecologyjournal.org/docs/Journal/pdf/Volume11/Issue01/055.pdf>

Argañaraz, J., Gavier, G., Zak, M. y Bellis, L. (2015). *Human and biophysical drivers of fires in Semiarid Chaco mountains of Central Argentina*. Science of the total environment. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/7923>

Binkley, D., Stape, J., Ryan, M., Barnard, H. y Fownes, J. (2002). *Age-related decline in forest ecosystem growth: An individual-tree, stand-structure hypothesis*. Ecosystems. 2002. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10021-001-0055-7>

Bonanse, M., y Fernández, R. (2012). *Remote sensing of suspended solids concentration in a reservoir with frequent wildland fires on its watershed*. Water Science and Technology. Recuperado de <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/67/1/217/15613/Remote-sensing-of-suspended-solids-concentration?redirectedFrom=fulltext>

Bravo, S., Kunst, C., Grau, R. y Aráoz, E. (2010). *Fire–rainfall relationships in Argentine Chaco savannas*. Journal of Arid Environments. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/248568958_Fire-Rainfall_relationships_in_Argentine_Chaco_savannas

Chen, D., Loboda, T., He, Y., Zhang, Y. y Liang, S. (2018). *Strong cooling induced by stand-replacing fires through albedo in Siberian larch forests*. Scientific Reports.

Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/323856726_Strong_cooling_induced_by_stand-replacing_fires_through_albedo_in_Siberian_larch_forests

Cingolani, A., Vaieretti, M., Giorgis, M., La Torre, N., Whitworth, J. y Renison, D. (2013). *Can livestock and fires convert the sub-tropical mountain rangelands of central Argentina into a rocky desert?* The Rangeland Journal. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/10815>

Colombatti, M. (2007). *Guía para la prevención de los incendios forestales en Córdoba*. Gobierno de la Provincia de Córdoba. Argentina.

Di Bella, C., Posse, G., Beget, M., Fischer, M., Mari, N. y Verón, S. (2008). *La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones*. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54017106004>

Di Bella, C., Fischer, M., Jobbágy, E. y Gabriel, E. (2011). *Fire patterns in north-eastern Argentina: influences of climate and land use/cover*. International Journal of Remote Sensing. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/15363>

Di Bella, C. y Posse, G. (2014). Estudio y seguimiento de los incendios. En José María Paruelo, Carlos Di Bella y Mayra Milkovic (Editores), *Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica, sus aplicaciones en agronomía y ciencias ambientales* (p. 337). Buenos Aires: Hemisferio Sur.

Díaz-Delgado, R. (2000). *Caracterización mediante teledetección del régimen de incendios forestales en Cataluña (periodo 1975-1998) y su influencia en los procesos de regeneración*. Recuperado de <http://oro.open.ac.uk/59612/7/59612.pdf>

Dore, S., Kolb, T., Montes-Helu, M., Eckert, S., Sullivan, B., Hungate, B., Kaye, J., Hart, S., Koch, G y Finkral, A. (2010). *Carbon and water fluxes from ponderosa pine*

forests disturbed by wildfire and thinning. Ecological Applications. Recuperado de <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/09-0934.1>

Fischer, M., Di Bella, C. y Jobbágy, E. (2012). *Fire patterns in central semiarid Argentina*. Journal of Arid Environments. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.11.009>

Fischer, M., Di Bella, C. y Jobbágy, E. (2015). *Influence of fuel conditions on the occurrence, propagation and duration of wildland fires: A regional approach*. Journal of Arid Environments. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140196315000944>

González, P. (2017). *Impacto de los incendios forestales en el suelo, agua, vegetación y fauna*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Recuperado de <https://www.camara.cl/pdf.aspx?prmTIPO=DOCUMENTOCOMUNICACIONCUENTA&prmID=39186>.

Houspanossian, J., Noretto, M. y Jobbágy, E. (2013). *Radiation Budget changes with dry forest clearing in temperate Argentina*. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23504897>

Houspanossian, J., Giménez, R., Jobbágy, E. y Noretto, M. (2017). *Surface albedo raise in the South American Chaco: Combined effects of deforestation and agricultural changes*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/306291884_Surface_albedo_raise_in_the_South_American_Chaco_Combined_effects_of_deforestation_and_agricultural_changes

Jackson, R., Randerson, J., Canadell, K., Anderson, R., Avissar, R., Baldocchi, D., Bonan, G., Caldeira, K., Duffenbaugh, N., Field, C., Hungate, B., Jobbágy, E., Kueppers, L., Noretto, M. y Pataki, D. (2008). *Protecting climate with forests*. Environmental Research Letters. Recuperado de <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/3/4/044006/meta>

Jobbágy, E., Acosta, A. y Noretto, M. (2013). *Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina)*. 2013. Recuperado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2013000200002

Kasischke E. y Turetsky, R. (2006). *Recent changes in the fire regime across the North American boreal region—Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska*. Geophysical Research Letters. Recuperado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006GL025677>

Nasi, R., Dennis, R., Meijaard, E., Applegate, G y Moore, P. (2001). *Los incendios y la diversidad biológica*. FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/004/y3582s/y3582s08.htm>

Noretto, M., Jobbágy, E. y Paruelo, J. (2005). *Land use change and water losses: The case of grassland afforestation across a soil textural gradient in Central Argentina*. Global Change Biology. Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2005.00975.x>

O'Halloran , T., Law, B., Goulden, M., Wang, Z., Barr, J., Schaaf, C., Brown, M., Fuentes, J., Göckede, M., Black, A. y Engel, V. (2011). *Radiative forcing of natural forest disturbances*. Global Change Biology. Recuperado de <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02577.x>

PNEF. *Plan Nacional de Estadística Forestal. Estadísticas de Incendios Forestales 2000-2012*. Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable.

PNMF. *Plan Nacional del Manejo del fuego. Programa Nacional de Estadística Forestal. Estadística de Incendios Forestales*. Buenos Aires, Argentina. Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable, Ministerio de Salud y Ambiente de la Nación. 2003-2006.

Ramos, M. (2010). *Manejo del Fuego*. Recuperado de <http://www.fire.uni-freiburg.de/iffn/country/cu/Manejo-del-Fuego-Ramos-Rodriguez-Cuba-2010.pdf>

Randerson, J., Liu, H., Flanner, M., Chambers, S., Jin, Y., Hess, P., Pfister, G., Mack, M., Treseder, K., Welp, L., Chapin, F., Harden, J., Goulden, M., Lyons, E., Neff, J., Schuur, E. y Zender, C. (2006). *The Impact of Boreal Forest Fire on Climate Warming*. Science. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/6686392_The_Impact_of_Boreal_Forest_Fire_on_Climate_Warming

Reinhart, K., Dangi, S. y Vermeire, L. (2016). *The effect of fire intensity, nutrients, soil microbes, and spatial distance on grassland productivity*. Plant and Soil. Recuperado de <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/30300500/Publications/Uploaded1272012/2016%20Plant%20Soil%20Reinhart%20et%20al.pdf>

Renison, D., Cingolani, A. y Suarez, R. (2002). *Efectos del fuego sobre un bosquecillo de *Polylepis australis* (Rosaceae) en las montañas de Córdoba, Argentina*. Revista chilena de Historia Natural. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-078X2002000400007

Richardson, D. (1998) *Forestry trees as invasive aliens*. Conservation Biology. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/279997123_Forestry_Trees_as_Invasive_Aliens

Rotenberg, E. y Yaki, D. (2010). *Contribution of Semi-Arid Forests to the Climate System*. Science. Recuperado de <https://science.sciencemag.org/content/327/5964/451>

Scasta, J., Thacker, E., Hovick, T., Engle, D., Allred, B., Fuhlendorf, S. y Weir, J. (2015). *Patch-burn grazing (PBG) as a livestock management alternative for fire-prone ecosystems of North America*. Renewable Agriculture and Food Systems. Recuperado de <https://allredbw.com/publications/Scasta2016a.pdf>

Serafini, M., Antes, M. y Villanueva, S. (2014). *Propuesta didáctica basada en la interpretación visual de imágenes satelitarias*. Memorias XVI Simposio Internacional SELPER. Recuperado de <https://selper.org.co/papers-XVI-Simposio/Educacion-en-Geomatica/ED8-Propuesta-didactica-basada-en-la-interpretacion-visual.pdf>

Vasallo, M., Dieguez, H., Garbulsky, M., Jobbágy, E., y Paruelo, J. (2012). *Grassland afforestation impact on primary productivity: a remote sensing approach*. Applied vegetation science. Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/avsc.12016>

Vásquez, C. y Orozco, A. (1989). *La destrucción de la naturaleza*. Recuperado de <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/083/htm/destrucc.htm>

Westerling, A., Hidalgo, H., Cayan, D y Swetnam, T. (2006). *Warming and Earlier Spring Increase Western U.S. Forest Wildfire Activity*. Science. Recuperado de <http://science.sciencemag.org/content/313/5789/940>

6. Bibliografía

Abaurrea, M (2013). *Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra*. Universidad Pública De Navarra. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Recuperado de <http://academica.e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/7790/578142.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Bisquert, P. y Del Mar, M. (2011). *Una metodología para la estimación del riesgo de incendio empleando imágenes del sensor MODIS/TERRA*. 2011. Recuperado de <http://www.tdx.cat/handle/10803/80941>

Carvacho, L. y Sánchez, M. (2010). *Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005*. Recuperado de

<https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/66614/CARVACHO.PDF?sequence=1&isAllowed=y>

Córdoba Forestal. Recuperado de <http://cordobaforestal.blogspot.com.br/p/informacion-tecnica.html>

Chuvieco, Emilio. (2009). *Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección*. Recuperado de <http://www.rac.es/ficheros/doc/00917.pdf>

En 14 años, los incendios afectaron 657 mil hectáreas de las sierras cordobesas. Unciencia. Recuperado de <http://www.unciencia.unc.edu.ar/2015/septiembre/en-14-anhos-los-incendios-afectaron-657-mil-hectareas-de-las-sierras-cordobesas>