

**Influencia del clima, la vegetación y el hombre sobre la frecuencia,
intensidad y distribución de los incendios en Argentina.**

*Trabajo Final presentado para optar al título de Especialista en Teledetección y
Sistemas de Información Geográfica*

Diana Katherine Pinilla Vargas

Ingeniera Catastral y Geodesta - Universidad Distrital Francisco José de Caldas - 2012



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

TUTOR

María de los Ángeles Fischer
Ingeniera Agrónoma (FAyCA-UM)
Magister en Recursos Naturales (EPG-FAUBA)

JURADO DE TRABAJO FINAL

Tutor
María de los Ángeles Fischer
Ingeniera Agrónoma (FAyCA-UM)
Magister en Recursos Naturales (EPG-FAUBA)

Jurado
Carlos M. Di Bella
Ingeniero Agrónomo (Facultad de Agronomía, UBA)
Doctor del Institut National Agronomique Paris-Grignon (Paris-Francia)

Jurado
María Eugenia Beget
Ingeniera Agrónoma (Facultad de Agronomía, UBA)
Magister en Recursos Naturales (EPG-FAUBA)

Fecha de defensa del Trabajo Final: 29 de Agosto de 2016

Agradecimientos

A mi tutora María de los Ángeles Fischer, que a pesar de la distancia, con su comprensión y apoyo incondicional corrigió y asesoró este trabajo.

Al profesor Carlos Di Bella, quién inspiró este proyecto.

A Julieta Straschnoy, quien en el inicio me asesoró como estudiante extranjera, integrándome a la gran familia de la UBA.

A mis jurados por su disposición y apoyo.

Y agradezco de forma especial a mi familia, quienes me dieron la fuerza para empezar y terminar esta fase de mi vida, por su apoyo en los momentos de duda, por su amor y su fe en mí. Especialmente mi madre.

"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	11
Palabras clave	12
1. Introducción	15
2. Materiales y Métodos	18
2.1. Insumos	18
2.1.1. Focos de calor	18
2.1.2. Uso y cobertura del suelo	18
2.1.3. Clima	20
2.1.4. Divisiones políticas y regiones	21
2.1.5. Influencia humana	22
2.2. Extracción de información y análisis	23
3. Resultados y Discusión	24
3.1. Patrones espaciales	24
3.2. Patrones temporales	39
3.3. Patrones espacio-temporales	43
4. Conclusiones	48
5. Bibliografía	50
6. Anexo	53

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Esquema conceptual del proyecto y estudios asociados a los momentos previos, durante y posteriores a un evento incendio.	17
Figura 2. Distribución espacial por análisis de grilla con celdas de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$, del principal uso y coberturas del suelo registradas en los años 2000 a 2003, 2003 a 2007 y 2008 a 2012 para toda Argentina, obtenido de productos globales CCI-LC (resultado de series temporales de vegetación MERIS y SPOT). Las clases apreciadas en la figura corresponden a zonas arbustivas y herbáceas (A y H), cuerpos de agua, zonas de bosque, cultivos, zonas de matorral, zonas de nieve, praderas, zonas urbanas, zonas de vegetación natural (V.N.) y zonas de escasa vegetación (Z.E.V.).	20
Figura 3. Zonas protegidas (en la leyenda Z.P., señalado en color blanco con puntos verdes) y ecorregiones, suministrado por el Sistemas de Información Nacional Ambiental (SIAN) y el Sistema Federal de Áreas Protegidas.	21
Figura 4. Mapa de Influencia Humana publicado en el 2008 por el Centro de Aplicaciones de Datos socioeconómicos de la NASA (SEDAC).	22
Figura 5. Grilla conformada para la extracción y recopilación de la información de base. Las celdas tienen una dimensión de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$	23
Figura 6. Número de focos de calor detectados por el sensor MODIS (AQUA-TERRA) desde el 1/11/2000 al 31/12/2014, por análisis de grilla con celdas de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$. El círculo morado junto con la flecha indican las áreas con mayor concentración de focos.	24
Figura 7. Poder radiativo promedio (FRP) detectado por el sensor MODIS (AQUA-TERRA) desde el 1/11/2000 al 31/12/2014, por análisis de grilla con celdas de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$. El círculo azul junto con la flecha indican las áreas con mayor energía radiativa promedio.	25
Figura 8. Modelo de ajuste lineal entre el poder radiativo promedio por celda (FRP) y el número de focos detectados para los doce meses del año. Las barras corresponden al error estándar. $FRP = 0,001(\text{Focos}) + 6,0805$; $n=12$; $R^2=0,84$; $P\text{-valor} = 0,000015 < \alpha=0,05$ (rechazo de hipótesis nula, es decir la variable focos de calor es significativa en el modelo).	26
Figura 9. a) Número de focos por latitud y b) poder radiativo por latitud para el periodo comprendido del 1/11/2000 al 31/12/2014. Las líneas punteadas azules indican la tendencia polinómica del número de focos y el poder radiativo; las barras muestran la desviación estándar por latitud.	26
Figura 10. a) Número de focos por longitud y b) Poder radiativo por longitud para el periodo comprendido del 1/11/2000 al 31/12/2014. Las líneas punteadas rojas indican la tendencia polinómica del número de focos y el poder	27

radiativo; las barras muestran la desviación estándar por longitud.

Figura 11. a) Zona anómala donde se observó una baja correspondencia entre el número de focos y su poder radiativo (celdas en rojo), y b) gráfico de dispersión del número de focos y el poder radiativo para dicha zona (puntos rojos) y todo el territorio argentino (puntos azules). La línea roja punteada indica la tendencia del poder radiativo y el número de focos ($\text{Focos} = 1,33(\text{FRP})^2 + 35,73(\text{FRP}) - 76,6$), ajustada por modelo polinómico con un valor de $r^2=0,7$. 28

Figura 12. Precipitación efectiva (PE) promedio obtenida por la diferencia de los registros por celda de precipitación y evapotranspiración potencial ($\text{PE} = \text{PP} - \text{PET}$), obtenidos de productos globales MOD16A2 y datos TRMM_3B43, desde el 1/11/2000 al 31/12/2014 29

Figura 13. a) Relación de los registros totales de número de focos y la PE (mm/mes), la línea roja representa la tendencia de los datos ($\text{Focos} = -0,000003(\text{PE})^4 - 0,0004(\text{PE})^3 + 0,1274(\text{PE})^2 + 10,84(\text{PE}) - 5,2126$), ajustada por modelo polinómico, $n=4$; $r^2=0,18$. b) Descripción de la densidad de focos de calor y registros promedio de PE por provincia, las barras indican la densidad de focos por provincia, los puntos el valor promedio de precipitación efectiva y las líneas la desviación estándar de la PE por provincia. c) Relación de los registros promedio de FRP y la PE (mm/mes), la línea roja representa la tendencia de los datos ($\text{FRP} = -0,00000002(\text{PE})^4 - 0,00005(\text{PE})^3 + 0,0007(\text{PE})^2 + 0,1926(\text{PE}) + 3,4507$), ajustada por modelo polinómico, $n=4$; $r^2=0,27$. d) Descripción de los registros promedio de FRP y registros promedio de PE por provincia, las barras indican el poder radiativo promedio por provincia, los puntos el valor promedio de precipitación efectiva y las líneas la desviación estándar de la PE por provincia. Lo anterior contemplado para el periodo de estudio desde el 1/11/2000 al 31/12/2014. 30

Figura 14. Comportamiento de la densidad de focos, la precipitación efectiva promedio (mm/mes) y el poder radiativo (MW) registrados en los 13 años de estudio para las principales ecorregiones del territorio argentino. Las líneas llenas indican las desviaciones estándar. 31

Figura 15 a) Comportamiento de la densidad de focos de calor y el poder radiativo, las barras indican la densidad de focos, los puntos los valores promedio de FRP y las líneas la desviación estándar del FRP por cobertura. b) Comportamiento de la densidad de focos y la precipitación efectiva promedio, las barras indican la densidad de focos, los puntos los valores promedio de PE y las líneas la desviación estándar de la PE por cobertura. Lo anterior registrado en los 13 años de estudio para áreas de bosque, matorral, zonas arbustivas y herbáceas (A y H), vegetación natural (V.N.), praderas, zonas de escasa vegetación (Z.E.V.) y uso asociado a zonas de cultivo y centros urbanos 33

Figura 16. Relación de la densidad de focos de calor con intervalos de precipitación efectiva promedio (mm/mes) registrados en los 13 años de estudio para áreas de cobertura boscosa, agrícola, zonas de matorral, 34

vegetación natural (V.N), zonas de escasa vegetación (Z.E.V), praderas, zonas arbustivas y herbáceas (A y H) y zonas urbanas.

Figura 17. Gráficos de análisis Scaterplots de: a) densidad de focos (nº/ha), b) PE (mm/mes) y c) FRP (MW), para las coberturas y usos de interés. 35

Figura 18. a) Comportamiento de la densidad de focos de calor y la PE (mm/mes) para las principales zonas protegidas en la Argentina, las barras indican la densidad de focos, los puntos los valores promedio de PE y las líneas la desviación estándar de la PE por zona. b) Comportamiento de la densidad de focos y el FRP promedio (MW) para las principales zonas protegidas en la Argentina, las barras indican la densidad de focos, los puntos los valores promedio de FRP y las líneas la desviación estándar del FRP por zona. Lo anterior registrado en los 13 años de estudio. 36

Figura 19. Mapa de influencia humana generado por análisis de grilla con celdas de 0,5°x 0,5° y ubicación de principales centros poblados del territorio argentino. Insumo original publicado por el Centro de Aplicaciones de Datos Socioeconómicos de la NASA (SEDAC). Se descartan valores de IH del rango de 37 a 60 de IH debido a que representan el 0,2% de la grilla de análisis (3 celdas). 37

Figura 20. a) Gráfico de densidad de puntos (densidad de focos de calor) para los diferentes niveles de influencia humana registrados en los 13 años de estudio. Los puntos corresponden a cada una de las celdas que conforman la grilla de análisis, las líneas marcan los intervalos de variabilidad de cada clase (el punto rojo corresponde a la media y las líneas externas a los desvíos estándar). b) Relación del nivel de influencia humana, la densidad total de focos y el poder radiativo promedio, registrados en los 13 años de estudio para toda la Argentina. Los valores de influencia humana fueron descritos en 5 intervalos iguales: muy bajo (0 a 6), bajo (7 a 12), medio (13 a 18), alto (19 a 24) y muy alto (25 a 30). 38

Figura 21. Relación de la densidad de focos de calor con los diferentes intervalos de influencia humana para áreas de cobertura arbustiva y herbácea, zonas de matorral, bosque, praderas, zonas de vegetación natural (V.N), zonas de escasa vegetación (Z.E.V.) y usos asociados a cultivos y centros urbanos. 38

Figura 22. Comportamiento mensual interanual del número de focos y el poder radiativo (FRP), para los 13 años de estudio y todo el territorio argentino, las barras indican las desviaciones estándar por mes del promedio de número de focos (barras rojas) y energía radiativa (barras cafés). No se incluyó la información correspondiente al año 2000 ya que sólo contaba con dos meses de información. 40

Figura 23. a) Comportamiento intranual del número de focos y los valores promedio de PE y b) comportamiento intranual del poder radiativo (FRP) y los valores promedio de PE. Lo anterior considerando los 13 años de estudio y todo el territorio argentino. 40

- Figura 24. Líneas de tendencia del comportamiento interanual de los valores promedio de PE y número de focos de calor para toda la Argentina, del año 2001 al 2014. La línea roja representa la tendencia de los datos del año 2001 (Focos= $34,406(PE) + 391,83$), ajustada por modelo lineal; $r^2=0,09$. La línea azul representa la tendencia de los datos del año 2014 (Focos= $-26,876(PE) + 4073,2$), ajustada por modelo lineal; $r^2=0,06$. 41
- Figura 25. Promedios del número de focos y poder radiativo manifestados en los años 2001 a 2014, las barras indican las desviaciones estándar por año de cada grupo de datos. Se observa un comportamiento proporcional entre el número de focos y su poder radiativo a excepción del año 2005. 42
- Figura 26. Incidencia de focos de calor para los 13 años de estudio. Los puntos azules indican el total de focos registrados en la primera mitad del periodo de estudio (2001-2007), los puntos rojos por su lado, describen la incidencia en la segunda mitad del periodo (2008-2014). Las líneas punteadas corresponden a las líneas de tendencia, con ajustes del 0,13 y 0,74 para la primera y segunda mitad, respectivamente 43
- Figura 27. Análisis mensual de la densidad espacial de focos de calor. a) densidad de focos del mes de agosto, b) densidad de focos del mes de septiembre, c) densidad de focos del mes de enero, d) cuadrantes por latitud para los máximos registros de número de focos por celda, e) cuadrantes por longitud para los máximos registros de número de focos por celda. 45
- Figura 28. a) Características espaciales del cuadrante ABI. Descripción del uso y coberturas comprendidas así como los porcentajes de influencia humana por cobertura. b) Características espaciales del cuadrante AII-AIII. Descripción del uso y coberturas comprendidas así como los porcentajes de influencia humana por cobertura. 46
- Figura 29. Análisis interanual de la densidad espacial de focos de calor. a) Densidad de focos del año 2001, b) densidad de focos del 2003, c) densidad de focos del 2008, d) análisis interanual de los cuadrantes por latitud para los máximos registros de número de focos por celda, e) análisis interanual de los cuadrantes por longitud para los máximos registros de número de focos por celda. 47

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Simplificación de clases de los productos de uso y cobertura CCI-LC globales. La descripción de las clases originales se puede consultar en el anexo 1 del proyecto.	19
Tabla 2. Estadísticos descriptivos del poder radiativo, la densidad de focos y la precipitación efectiva promedio para las ecorregiones agrupadas; n=9. b) Prueba t para una media de los valores de FRP (media = 26 MW; p=0,0046).	31
Tabla 3. Prueba Friedman para análisis de varianza (ANOVA): Las zonas de escasa vegetación presentan diferencias significativas respecto a las clases de bosque, zonas arbustivas y herbáceas, vegetación natural, zonas de cultivos y praderas	33
Tabla 4. Prueba Friedman para análisis de varianza (ANOVA): Las zonas de bosque, cultivos y matorral (Letra F), presentan diferencias significativas de densidad de focos por nivel de influencia humana respecto a las demás coberturas.	39
Tabla 5. Prueba t para una media del número de focos y FRP promedio (p=0,0001).	42

Título: Influencia del clima, la vegetación y el hombre sobre la frecuencia, intensidad y distribución de los incendios en Argentina.

RESUMEN

Los incendios son eventos que causan distintos niveles de impacto en los ecosistemas terrestres debido a efectos biogeoquímicos y biofísicos que pueden desencadenar la destrucción de la biodiversidad, desertificación, disminución de la calidad del agua, ocasionando pérdidas muchas veces irremediables. En Argentina, las estadísticas oficiales indican que los incendios afectan un promedio de 870 mil hectáreas anualmente, generando pérdidas significativas de recursos naturales así como de vidas humanas. A pesar de las notables mejoras en el monitoreo de incendios en los últimos años, muchas veces existen problemas para cubrir la totalidad de las áreas afectadas; por este motivo, el uso de información satelital ofrece una gran oportunidad para abordar el tema a escala regional, de una forma objetiva y periódica. El objetivo principal de este trabajo fue realizar un análisis descriptivo general de los incendios en toda Argentina, desde el 2000 hasta el 2014 a partir de información de sensores remotos, y estudiar su relación con variables bióticas y abióticas como el clima (se calculó la precipitación efectiva o PE como indicador de déficit hídrico, obtenida de la diferencia de la precipitación acumulada y la evapotranspiración potencial), el uso y cobertura del suelo, la influencia humana, e información de ecorregiones y zonas de protección. Para la extracción de la información se implementó un Sistema de Información Geográfica, y se aplicó una grilla de celdas de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ de tamaño. Se realizaron análisis descriptivos generales de los focos de calor y su energía radiativa junto con el resto de las variables usando regresiones lineales simples, modelos ANOVA y gráficos generales estándar. Se observó una relación directa entre el número de focos y el poder radiativo (FRP), exponiendo un caso atípico en el extremo noreste argentino, donde un menor número de focos fue acompañado de un alto FRP asociado a la presencia de bosques subtropicales. Por su parte, la mayor densidad de focos en la zona norte y centro argentina se asoció principalmente al tipo de uso y cobertura del suelo y al nivel de influencia humana. En la ecorregión del Chaco húmedo y Chaco seco, mayores densidades de focos se asociaron a la presencia de cobertura boscosa y en la zona centro, coincidente con el límite oriental de la ecorregión del Espinal, al uso y nivel de intervención humana, destacándose áreas de uso agropecuario y niveles altos de influencia humana (de 19 a 30 IH). Se evidenció que la mayor densidad de focos ocurrió en coberturas boscosas, zonas de cultivo y matorral, la primera con los mayores registros históricos de precipitación efectiva (entre 65 y 120 mm/mes) y la última con presencia de un importante déficit hídrico (entre 10 y 64 mm/mes). Por su lado, el análisis hecho por áreas protegidas arrojó que, los reservorios de humedal y las reservas naturales ubicadas en la zona norte y centro argentina albergaron la mayor concentración de focos. Se observó además, que los máximos registros de focos a nivel mensual coincidieron con los menores registros de precipitación efectiva, particularmente en los meses de agosto y septiembre. A nivel interanual, se observó una relación negativa entre el número total de focos por año y el promedio anual de PE, a excepción del año 2001 que presentó menor frecuencia de focos, y que la incidencia aumentó con valores más altos de PE (90 mm/año). El 2001 se caracterizó por condiciones atípicas, donde el estado de la vegetación estuvo por encima del promedio histórico para los meses con mayor incidencia de fuegos.

Con los resultados obtenidos se evidenció que la problemática de los incendios es aún muy importante, a pesar de haberse reducido en los últimos años; sobre todo en la región del Chaco seco, donde en el 2014 se quemaron más de 1 millón de hectáreas. Este hecho está asociado principalmente al desmonte para dar lugar a actividades de ganadería y siembra de cultivos en esta región. Mientras tanto, en la zona centro las constantes acciones de quema se asocian a prácticas agrícolas tradicionales. Con los resultados obtenidos, se observó que el uso de información derivada de sensores remotos para el análisis de incendios permite disponer de datos con una gran resolución espacial y temporal, así como el uso de sistemas de información geográficas permite utilizar el volumen de información que los sensores remotos proveen. Se espera que la información derivada de este trabajo permita apoyar a otros proyectos de seguimiento y afectación de incendios en el país y constituya información de referencia para planes de manejo ambiental, planes de prevención y futuras publicaciones.

Palabras clave: Focos de calor, poder radiativo, teledetección, tipos de vegetación, precipitación efectiva, influencia humana, patrones espacio temporales.

Title: Influence of climate, vegetation and man on the frequency, intensity and distribution of fires in Argentina.

ABSTRACT

Fires are events that can cause different levels of impact on terrestrial ecosystems due to biogeochemical and biophysical effects causing the biodiversity destruction, desertification, reduction of water quality, and losses often permanent. In Argentina, official statistics indicate that fires affect an average 870 thousand hectares annually, generating significant losses of natural resources and human lives. Despite significant improvements in monitoring fires in recent years, there are often problems to cover all the affected areas. For this reason, the use of satellite data provides a great opportunity to address this issue at a regional level. The main objective of this work was to conduct a general descriptive analysis of fires occurred in Argentina from 2000 to 2014 using remote sensing data, and to study the relation of fires to biotic and abiotic variables such as weather (effective precipitation or PE was calculated as an indicator of water deficit, obtained from the difference of the accumulated precipitation and evapotranspiration potential), the use and land cover, the human influence, protected areas and ecological regions. For getting data, a Geographic Information System was implemented, and a grid of $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ cells was applied. General descriptive analysis of hotspots and fire radiative power (FRP) were performed and relationship with the rest of the variables were studied using simple linear regressions, ANOVA models and standard general graphics. A direct relationship between the number of hotspots and FRP was observed, with exception of the Argentine northeast zone, where fewer hotspots showed high FRP values, related with the presence of subtropical forests. Meanwhile, the highest density of hotspots in the northern and central Argentina was mainly related with the land use/cover and human influence level. In the ecological region of Humid Chaco and dry Chaco, higher densities of hotspots were associated with the presence of forest cover, while in the center region, coincident with eastern boundary of the Espinal, high density of fires were related with high human intervention levels (19-30 IH). High density of hotspots occurred in forest cover, agriculture areas and shrublands, the first with the highest record of effective precipitation (between 65 and 120 mm / month) and the latest with the presence of a significant water deficit (between 10 and 64 mm/month). Protected reservoirs and natural wetland reserves in the northern and central Argentina were the most affected by fires. It was also noted that highest density of fires occurred in August and September, months with the lowest effective rainfall records. Annually, it was observed a negative relationship between the total number of hotspots and the average effective precipitation, with exception of 2001, year showing the lowest number of hotspots and an increasing incidence with higher PE (90 mm / year). The year 2001 was characterized by atypical conditions where the vegetation conditions were above the historical average.

With data obtained it was shown that the problem of fires still very important, despite the fires frequency decreased over study years; especially in the region of the dry Chaco, where in 2014 more than one hundred hectares were burned. This issue was mainly associated to deforestation activities to promote livestock and agriculture practices in this region. Meanwhile, in the central area constant burning actions were associated with traditional farming practices. With the results obtained, it was observed

that the use of remote sensing data for fire analysis provides information with greater spatial and temporal resolution, and the use of geographic information systems allows using this amount of information. It is expected that the information derived from this study support other projects of monitoring and analyzing fires in the country and would represent a baseline for environmental management, prevention practices and future publications.

Keywords: Hotspot, fire radiative power, remote sensing, vegetation types, effective rainfall, human influence, spatial and temporal patterns.

1. INTRODUCCIÓN

Los fuegos son procesos de combustión que hacen referencia a toda situación donde arden o se queman sustancias y que pueden formar parte del funcionamiento normal de los ecosistemas (Paruelo *et al.* 2014). Este fenómeno, que se manifiesta en llamas, emanación de vapor de agua y dióxido de carbono, se origina por una reacción química de oxidación exotérmica de carácter irreversible (Ministerio del Interior 2015). Depende indefectiblemente de la presencia de cuatro condiciones: existencia de material combustible, el comburente (oxígeno), un aumento de temperatura y una reacción en cadena, es decir la combinación de las moléculas del combustible con el oxígeno. El fuego presenta tres fases importantes: una primera fase de ignición donde aumenta la temperatura del material combustible desprendiéndose de éste vapores visibles (por ende esta fase depende en gran medida de la humedad del material combustible); una segunda fase de llama (combustión rápida) donde la concentración de partículas ascendentes y los vapores emitidos en presencia de la cantidad de oxígeno necesaria se transforman en llamas y pueden alcanzar temperaturas de hasta 1400 °C; y una tercera fase de humo (combustión lenta) donde se visualizan los fuegos de rescoldo, que en relación a la fase dos presenta una disminución de temperatura significativa (Paruelo *et al.* 2014). A su vez el fuego puede propagarse por tres medios: radiación, convección y conducción, la primera se puede definir como el desplazamiento de ondas de calor, la segunda como el desplazamiento de gases y la tercera como el desplazamiento a través de una sustancia (Andalucía 2013); dicha propagación se impulsa por la continuidad espacial del combustible, tanto vertical como horizontalmente, así como por el efecto de los vientos, la pendiente, entre otros.

Cuando el fuego se propaga, puede dar lugar a incendios que son eventos de mayor magnitud, indeseados en general y con un alto poder destructivo ya que pueden afectar la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas (Di Bella *et al.* 2008a). Su manifestación se asocia a diferentes causas, siendo más relevantes las de tipo: intencional (provocado con un propósito específico, por ejemplo, quema de biomasa vegetal como práctica en el manejo de pastizales), negligencia (provocado por descuido o accidente) y natural (provocado por rayos en zonas vulnerables, altas temperaturas u otro factor ambiental incidente) (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable 2015). Son perturbaciones que modifican profundamente los ambientes afectando el sistema tierra-atmósfera, con múltiples consecuencias, muchas de ellas negativas. Los incendios pueden afectar a los ciclos biogeoquímicos y al flujo de energía (Neary *et al.* 2005) a partir de, por ejemplo, cambios en las propiedades físico-químicas del suelo, cambios en la cantidad de biomasa vegetal y tipo de cobertura o cambios en la composición atmosférica como consecuencia del humo y partículas liberadas (Lehsten *et al.* 2009); sin mencionar el impacto social y económico que implica la presencia de incendios en zonas de reserva, zonas agrícolas y zonas cercanas a áreas metropolitanas (manifestado comúnmente con pérdidas de biota de conservación, pérdidas económicas de producción y afectación directa a la salud) (OPS 1997, Francisco *et al.* 2007). Los incendios alteran no sólo la cantidad de biomasa vegetal en superficie, sino que pueden alterar sus características y funcionamiento mediante, por ejemplo, la reducción de especies nativas y la promoción de especies pirófitas (especie vegetal con afinidad al fuego). Por otro lado, las llamas en sí mismas o el calor y la falta de oxígeno pueden provocar la muerte por asfixia o quemaduras de la fauna y también, la migración de otras especies. Los balances hidrológicos, también se ven profundamente alterados por

la reducción de la cubierta vegetal, que permite el retorno del agua a la atmósfera por la transpiración de las plantas y por el incremento de la impermeabilidad del suelo (impedimento de la penetración del agua en el suelo), aumentando así la escorrentía superficial. La atmósfera también se ve afectada por los incendios, que liberan CO₂, vapor de agua y otros gases, alterando el efecto invernadero (absorción y reemisión de la radiación de onda larga), lo cual impacta el clima a nivel local y global (cambio en las precipitaciones, temperatura, presencia de deshielo y eventos extremos). Y el suelo no escapa a los efectos de los incendios ya que pueden acelerar su nivel de degradación y alterar sus características físico-químicas mediante la pérdida de algunos nutrientes o incluso mediante la incorporación de otros que antes no estaban fácilmente disponibles (Nasi *et al.* 2002). Que los efectos antes detallados u otros ocurran efectivamente, depende no sólo de la ocurrencia de los incendios sino también de la frecuencia, densidad e intensidad que presenten. Asimismo, es muy importante evaluar los cambios que estas variables presentan a lo largo del tiempo, por la interacción con factores antrópicos, factores bióticos (tipo de vegetación, fauna) y abióticos (viento, humedad y temperatura).

En el mundo, todos los años se queman centenares de millones de hectáreas forestales y agrícolas. De acuerdo a estadísticas de la FAO, entre los años 1987 y 1996 se registraron anualmente cerca de 66.000 incendios en Europa y 133.000 en América del Norte, con una extensión media anual de 544.000 y 4.295.000 hectáreas, respectivamente (FAO 1997). En Etiopía y Sudán meridional, los incendios destruyen millones de hectáreas cada año, por ejemplo, en el período comprendido entre 2000 y 2008 se produjeron más de 200.000 incendios en Sudán y casi el doble en Etiopía (FAO 2009). En el año 2009, los incendios forestales provocaron daños valorados en millones de dólares en el estado de California, EE.UU y en el estado de Victoria en Australia (FAO 2009). En Suramérica, todos los años en la Amazonia brasileña los incendios devastan una superficie que corresponde al doble del área de Costa Rica (Nepstad *et al.*, 1999).

En Argentina, de acuerdo a estadísticas oficiales, año tras año los incendios devastan miles de hectáreas, aproximadamente 870 mil hectáreas al año (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable 2015). Con antecedentes recurrentes que exponen un comportamiento espacial y una frecuencia intra e interanual, siendo un caso típico la presencia de incendios en los meses de enero y febrero como efecto estacional (temporada de verano) y en los meses de julio y agosto (final de invierno, comienzo de primavera) por prácticas de quema para la remoción de material senescente e impulsión de períodos de rebrote (CCA 2014). De acuerdo a los informes de Estadística de Incendios Forestales en Argentina (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable 2015), las regiones Pampeana, Centro y Patagónica presentan la mayor área quemada desde el año 2002 al 2014, siendo el área quemada de la región Pampeana seis y siete veces mayor que la región Centro y Patagónica, respectivamente. Sin embargo, teniendo en cuenta el área quemada en función de la superficie total de cada región, aquellas tres que se destacan son la región Pampeana, Centro y NOA con aproximadamente 454.199, 165.687 y 57.440 hectáreas quemadas, respectivamente. Siendo el valor de la región Pampeana nueve veces mayor respecto a las regiones NEA, Norte y Patagónica. En Argentina, las coberturas más dañadas corresponden a pastizales, arbustales y bosques nativos, oscilando en un intervalo del 30% a 40% en relación al área total quemada por región.

Por todas las implicancias asociadas a los incendios en Argentina, diferentes instituciones han priorizado su estudio con el fin de realizar un seguimiento y control de los mismos. Entre ellas se destacan: Defensa Civil, Servicios Forestales Provinciales, Cuerpo de Bomberos, Policía Provincial, etc. Pese a sus esfuerzos de proporcionar información actualizada (generalmente expuesta en censos de periodicidad mensual y anual), aún presentan problemas para cubrir la totalidad de las zonas afectadas (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable 2015) y fallas en los sistemas de alerta temprana. Es aquí donde la teledetección se convierte en una herramienta útil para el estudio de este tipo de eventos y en general de cualquier fenómeno del que se quiera obtener información a distancia. Los sensores remotos ofrecen una amplia cobertura con la posibilidad de acceder a datos de superficies con acceso restringido, uniformidad en la toma de datos y amplias series históricas de información. Se pueden obtener así datos antes, durante y después de la ocurrencia de un incendio. Por ejemplo, los sensores remotos pueden ofrecer información asociada al contenido hídrico del combustible para análisis del peligro de propagación e ignición (Chuvieco 1990), mapas de focos de calor para la localización de sitios afectados por anomalías de temperatura en la superficie, patrones continentales de densidad (Di Bella et al. 2006), análisis de los factores que influyen su ocurrencia, propagación y duración (Di Bella *et al.* 2008, Fischer *et al.* 2011, Fischer *et al.* 2015), estudio de la relación entre precipitaciones y la ocurrencia de incendios (Spessa *et al.* 2005, Prieto 2009, Fischer *et al.* 2011), análisis de emisiones de dióxido de carbono por quemaduras (Sione *et al.* 2009, Schultz *et al.* 2008, van der Werf *et al.* 2010), información del poder radiativo del fuego (FRP) que puede ser asociado a la cantidad de biomasa quemada (Verón *et al.* 2012), detección del área quemada a partir del uso de índices de vegetación (Chuvieco *et al.* 2005), estimación de superficies quemadas (Chuvieco *et al.* 2008), o estimación de la recuperación de la cobertura vegetal post-incendio (Lentile *et al.* 2006), entre otros (Figura 1).

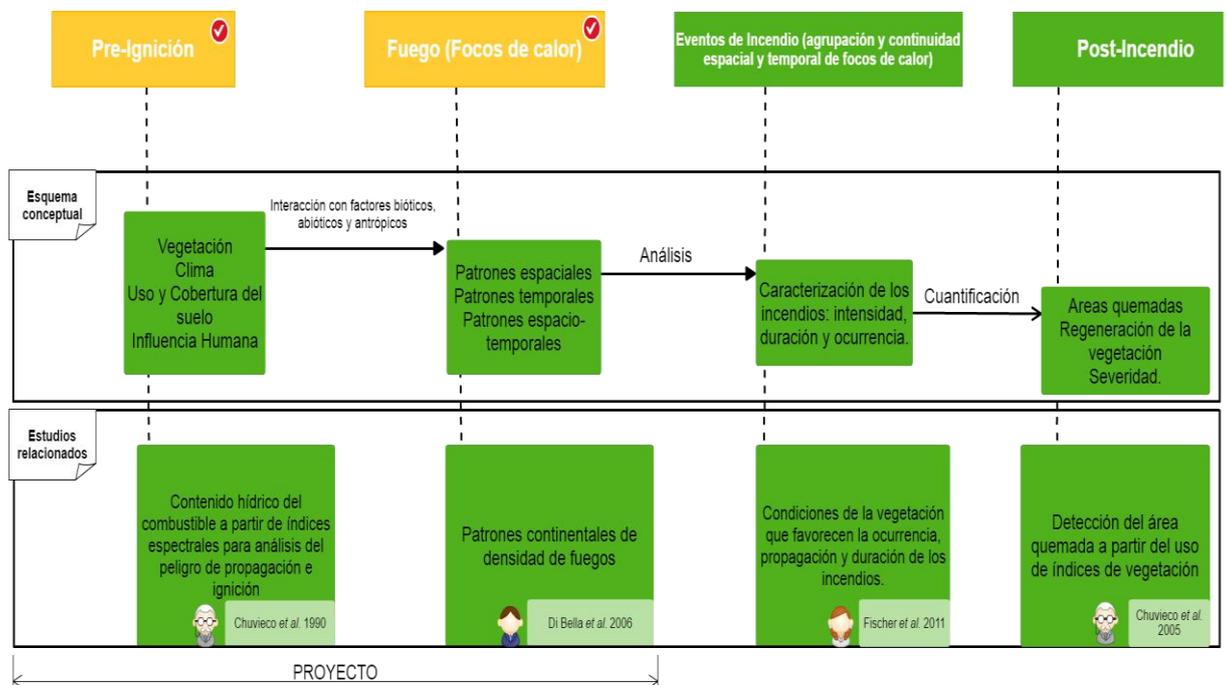


Figura 1. Esquema conceptual del proyecto y estudios asociados a los momentos previos, durante y posteriores a un evento incendio.

Si bien existen antecedentes que describen a los incendios en sus distintas etapas, a escala nacional los estudios orientados a la caracterización de estos fenómenos son más reducidos y existen pocos que abarquen períodos largos de estudio. Es por este motivo que el objetivo general de este trabajo es estudiar la ocurrencia y el comportamiento de los incendios detectados en la superficie continental de Argentina durante 13 años de estudio, evaluando la influencia que tienen sobre ellos el clima (precipitación efectiva), la vegetación (asociada principalmente a la ubicación de ecorregiones), y la presencia del hombre por medio de variables como el uso de la tierra o el nivel de influencia humana a través de la presión humana (*e.g.* densidad poblacional), el nivel de infraestructura (edificios, ciudades) y accesos. De forma más específica se busca entonces, analizar la relación de estas perturbaciones con algunos de los factores más relevantes que controlan su frecuencia y distribución: la precipitación y evapotranspiración potencial como indicadores del estado hídrico del combustible; los tipos de cobertura vegetal, así como las regiones ecológicas a modo de evaluar las clases más vulnerables a sufrir incendios, y analizar principalmente el efecto de la componente antrópica sobre la distribución espacial y temporal de los incendios en base a un análisis conjunto de: el nivel de influencia humana y; los usos del suelo con la densidad de focos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Insumos

2.1.1. Focos de calor

Se dispuso de una serie histórica de focos de calor provistos por la FIRMS (Fire Information for Resource Management System, Fuente: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/request.php>), obtenidos a partir del procesamiento de productos estándar MODIS tipo MOD14/MYD14 de anomalías térmicas y fuego (basados en la intensidad y variabilidad de la temperatura de superficie). La información está comprendida en el período del primero de noviembre de 2000 al 31 de diciembre de 2014, con resolución espacial de 1 x 1 km. Los focos proporcionarán información de la ubicación, la fecha y el poder radiativo (FRP) de los sitios donde se detectaron anomalías de temperatura.

2.1.2. Uso y cobertura del suelo

Se utilizaron tres productos de cobertura del suelo de la Iniciativa de Cambio Climático CCI-LC (resultado de series temporales de vegetación MERIS y SPOT). Cada producto cubre un período de 5 años (1998-2002, 2003-2007, 2008-2012), asignados a un sistema de coordenadas geográfico (GCS) basado en el elipsoide de referencia WGS84. Son productos de 300m de resolución espacial, con una leyenda de 37 clases que exponen principalmente una amplia variedad de coberturas, de las cuales dos son asociadas a usos del suelo (zonas urbanas y cultivos). Para simplificar el análisis de información, las clases fueron agrupadas obteniendo finalmente 12 clases:

	CLASES FINALES	CLASES ORIGINALES
0	No dato	0
1	Cultivos	10, 20, 30
2	Matorral	120, 121, 122
3	Pradera	130
4	Arbustiva	12, 180
5	Herbáceas	11, 110
6	Zonas de escasa vegetación	140, 150, 152, 153, 200, 201, 202
7	Vegetación natural	40
8	Bosque	50, 60, 61, 62, 70, 71, 72, 80, 81, 82, 90, 100, 160, 170
9	Zonas urbanas	190
10	Cuerpos de agua	210
11	Nieve	220

Tabla 1. Simplificación de clases de los productos de uso y cobertura CCI-LC globales. La descripción de las clases originales se puede consultar en el anexo 1 del proyecto.

A partir de los tres productos de uso y cobertura del suelo se realizó un análisis de clases predominantes, haciendo una extracción preliminar de las clases contenidas y su superficie para cada celda de la grilla, esto con el fin de identificar las coberturas más representativas por celda (superficies mayores al 50% del área de celda). Dicho análisis mostró un comportamiento constante en los tipos de uso y cobertura, para los 13 años de estudio (Figura 2).

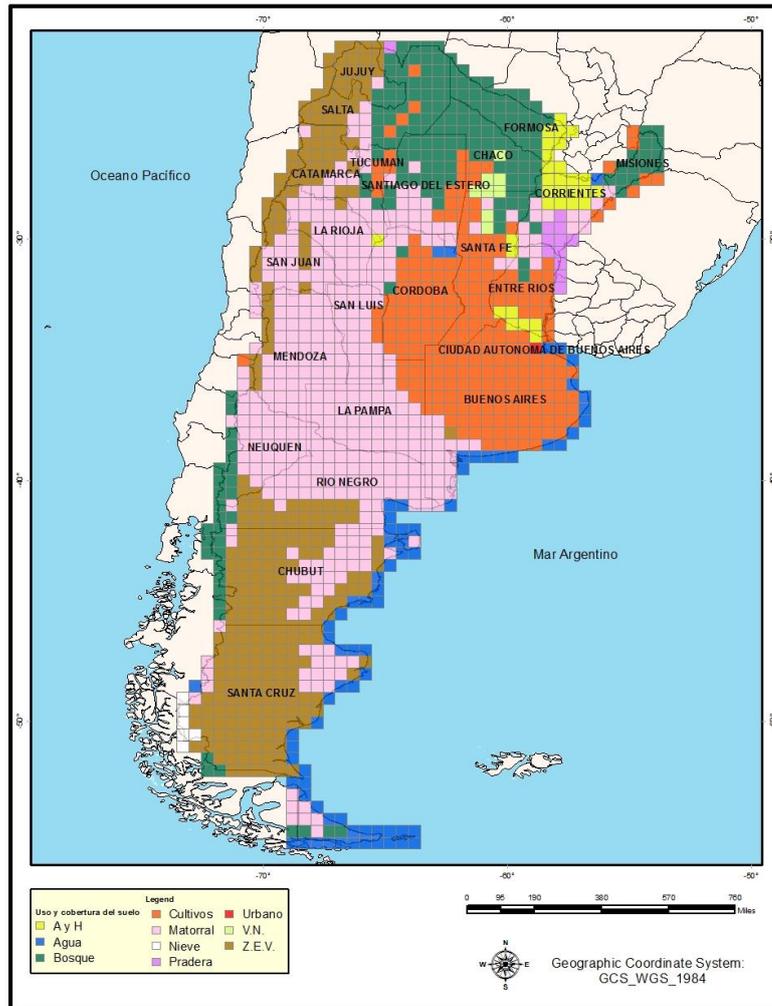


Figura 2. Distribución espacial por análisis de grilla con celdas de 0,5°x 0,5°, del principal uso y coberturas del suelo registradas en los años 2000 a 2003, 2003 a 2007 y 2008 a 2012 para toda Argentina, obtenido de productos globales CCI-LC (resultado de series temporales de vegetación MERIS y SPOT). Las clases apreciadas en la figura corresponden a zonas arbustivas y herbáceas (A y H), cuerpos de agua, zonas de bosque, cultivos, zonas de matorral, zonas de nieve, praderas, zonas urbanas, zonas de vegetación natural (V.N.) y zonas de escasa vegetación (Z.E.V.).

2.1.3. Clima

Se contó con datos de evapotranspiración potencial (PET) obtenidos de productos globales MOD16A2 (NASA, a), de periodicidad mensual, con resolución espacial de 0,05° o 5,6km, y datos de precipitación acumulada (PP) obtenida de productos TRMM_3B43 (NASA, b), proporcionados por la Misión de Medición de Lluvias Tropicales, con resolución espacial de 0,25° y periodicidad mensual). Con ellos se realizó el cálculo de precipitación efectiva (PE) entendida como la diferencia de la precipitación y la evapotranspiración potencial ($PE = PP - PET$), como indicador del déficit hídrico mensual (Fischer *et al.* 2011).

2.1.4. Divisiones políticas y regiones ecológicas

Se contará con información vectorial de los límites administrativos a escala departamental y provincial obtenido de la base de datos geográfica del Instituto Geográfico Nacional e información de regiones ecológicas que describen la existencia de comunidades naturales y especies en la Argentina suministrado definidas por el Sistemas de Información Nacional Ambiental – SIAN y el Sistema Federal de Áreas Protegidas (Figura 3). Las regiones ecológicas están clasificadas en nueve clases: Chaco Seco, Chaco Húmedo, Espinal, Pampa, Savana, Yungas, Estepa, Bosque y Otros. Para su mayor comprensión se agruparon las ecorregiones de Savana Inundada de Paraná y Savana Mesopotámica del Sur en la clase “Savana”; las ecorregiones de Estepa Patagónica y Estepa Andina del Sur en la clase “Estepa”; las ecorregiones de Bosque alto de Paraná, Bosque Húmedo Araucano, Bosque templado de Valdivia y Bosque Magallánico en una de “Bosques”; y las ecorregiones de Puna de los Andes Centrales, Puna Seca de los Andes Centrales, Monte Alto y Monte Bajo, de menor importancia relativa a la incidencia de incendios en la clase “Otros”.

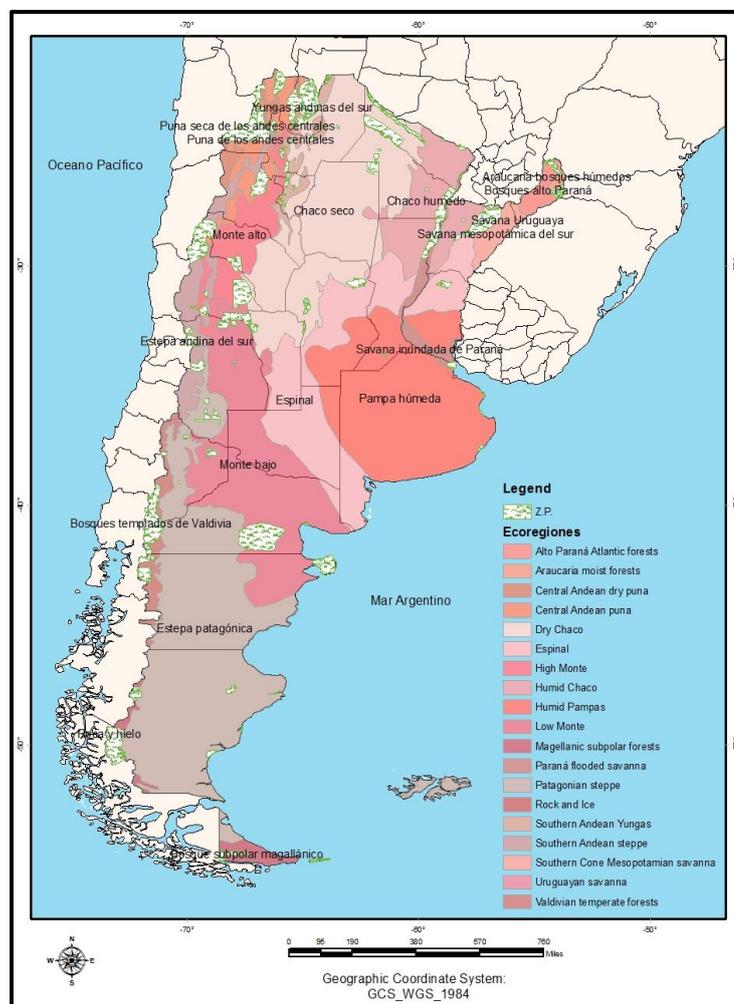


Figura 3. Zonas protegidas (en la leyenda Z.P., señalado en color blanco con puntos verdes) y ecorregiones, suministrado por el Sistemas de Información Nacional Ambiental (SIAN) y el Sistema Federal de Áreas Protegidas.

2.1.5. Influencia humana

Se dispuso de un mapa de influencia humana asociado a diversas acciones antrópicas que explica la influencia humana relativa en diferentes biomas terrestres a nivel país (Figura 4, Fuente: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/wildareas-v2/sets/browse>). Este producto, se generó a partir de un conjunto de datos globales de cuadrículas de 1 kilómetro, suministrados por la Sociedad de Conservación de la vida silvestre (WCS) y el Centro de la Universidad de Columbia para la Red Internacional de Información sobre Ciencias de la Tierra (CIESIN). Específicamente 9 capas de datos globales que cubren diferentes aspectos de la presión humana, destacando la densidad de la población, usos de la tierra, infraestructura y accesos. Gracias a un algoritmo desarrollado por la SEDAC (Centro de Aplicaciones de Datos socioeconómicos de la NASA), este producto permite expresar los impactos antropogénicos en un rango de valores de 0 a 64. Siendo 0 la inexistencia de intervención y 64 el máximo nivel de intervención.

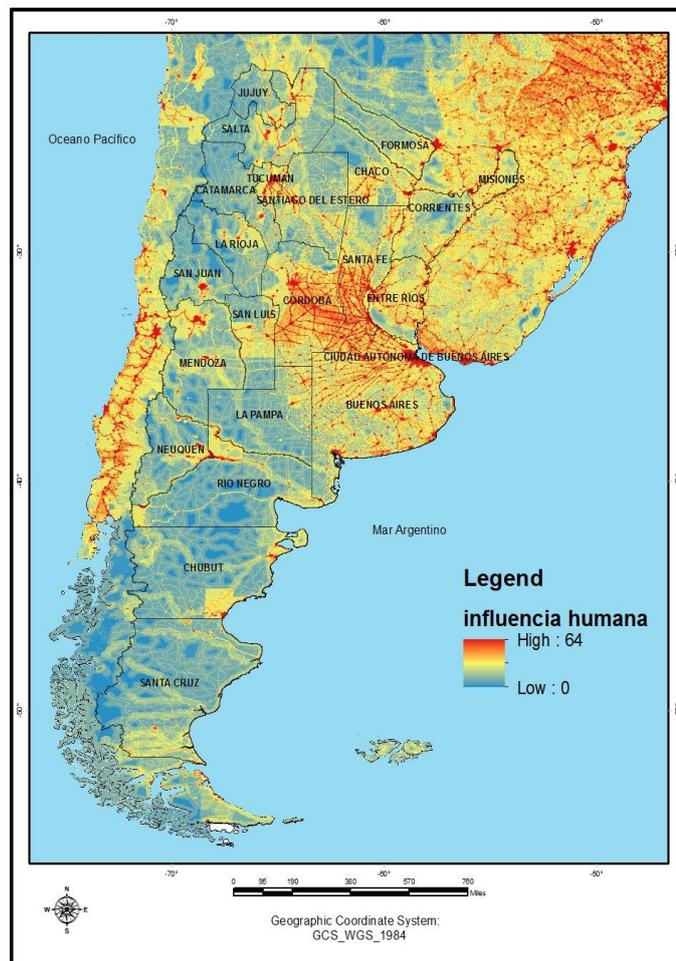


Figura 4. Mapa de Influencia Humana publicado en el 2008 por el Centro de Aplicaciones de Datos socioeconómicos de la NASA (SEDAC).

2.2. Extracción de información y análisis

El estudio abarca la superficie continental de la República Argentina de aproximadamente 2.780.000 km². La extracción de información se realizó mediante la implementación de una grilla de 0,5°x0,5° (Figura 5) de dimensión, asociado a la resolución espacial de los insumos descritos en el punto 2.1 (Di Bella *et al.* 2006)

Del proceso de extracción realizado, y para los 13 años de estudio, se consolidó una base de datos tipo Excel, en donde para cada celda se registraron el número de focos detectados, los valores de precipitación, evapotranspiración potencial, las clases predominantes de uso y cobertura del suelo, ecorregiones, la precipitación efectiva calculada de acuerdo a lo expuesto en el punto 2.1.3 y el nivel de influencia humana predominante.

Posterior al proceso de extracción, se realizó un análisis conjunto de las variables de interés mediante tablas dinámicas, metodologías estandarizadas para la generación de relaciones simples y múltiples (regresiones), análisis de varianza, así como análisis descriptivos generales (Ordaz *et al* 2011, Boqué *et al* 2004).



Figura 5. Grilla conformada para la extracción y recopilación de la información de base. Las celdas tienen una dimensión de 0,5° x 0,5°

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Patrones espaciales

Mediante una inspección visual de la distribución espacial de los focos de calor detectados en el territorio argentino desde el 2000 al 2014 (Figura 6), se puede observar una alta concentración hacia la región Norte-Noreste de Argentina abarcando principalmente las provincias de: Santiago del Estero (que concentra ~17% de los focos del país), Salta (~13%), Formosa y Chaco (~11%), Santa Fe (~10%), Corrientes (~8%), Entre Ríos (~4%), Tucumán y Misiones (~3%). Se observa además una concentración de focos conformando un arco en la región central del país, que abarcan las provincias de Córdoba, San Luis y La Pampa, que concentran el 3,4%, 3% y 2,9% de los focos, respectivamente.

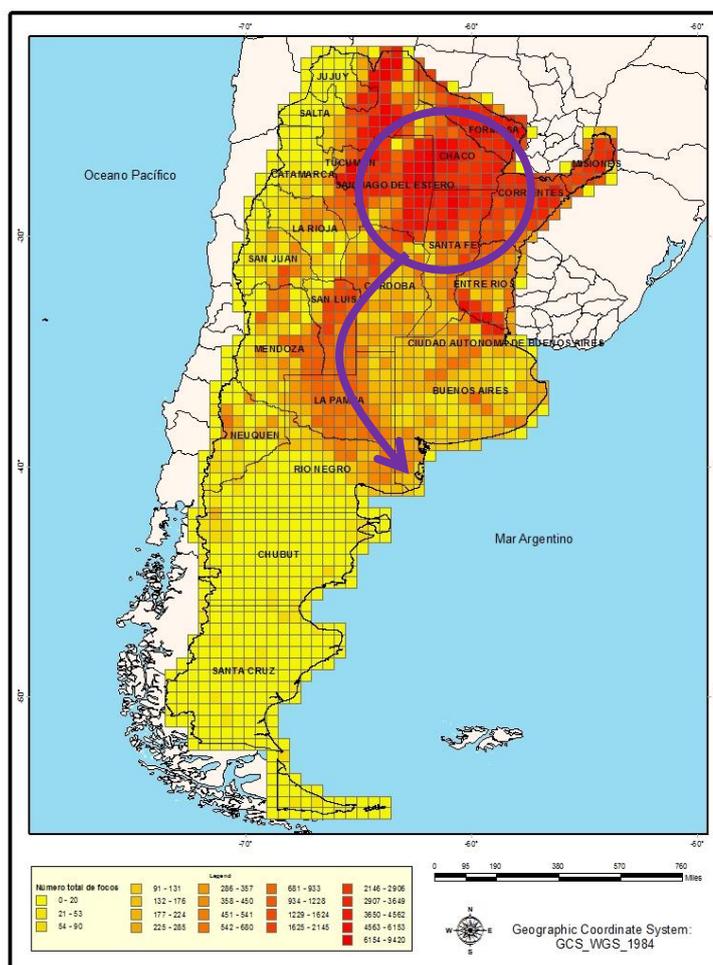


Figura 6. Número de focos de calor detectados por el sensor MODIS (AQUA-TERRA) desde el 1/11/2000 al 31/12/2014, por análisis de grilla con celdas de 0,5°x0,5°. El círculo morado junto con la flecha indican las áreas con mayor concentración de focos.

Por otro lado, se analizó el comportamiento espacial de la energía radiativa emitida por los incendios (FRP) para los 13 años de estudio y todo el territorio argentino. Para ello, se calculó el promedio de FRP de los focos contenidos en cada celda, de las 1266 que conforman la grilla de trabajo. El análisis visual de esta variable mostró un comportamiento homólogo al del número de focos (Figura 7), donde se evidenció el

hecho que a mayor concentración de focos por unidad de superficie (celda), mayor es el promedio del poder radiativo manifestado (FRP) (Figura 8). Sin embargo, también se observaron diferencias en la extensión y rangos de estos dos elementos de estudio. Provincias en el norte argentino como Santiago del Estero, Salta y el Chaco experimentaron un poder radiativo promedio entre los 46 a 66 MW (MegaWatts), y provincias cercanas a la zona centro como Córdoba, San Luis y la Pampa expusieron niveles promedio de FRP en el rango de los 20 a 45 MW.

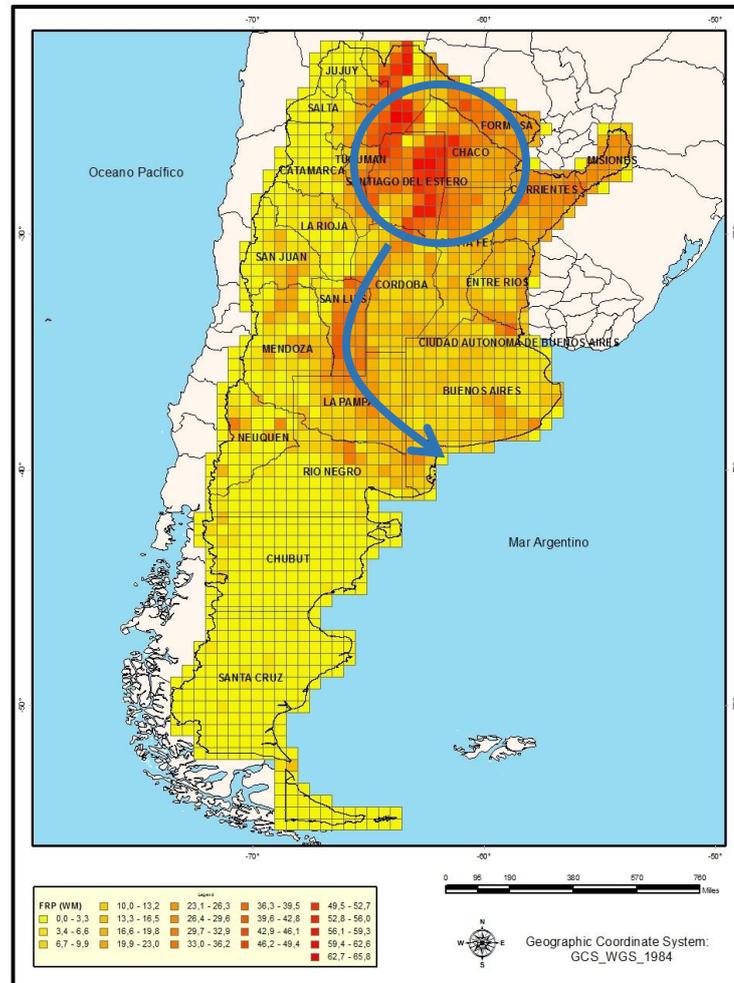


Figura 7. Poder radiativo promedio (FRP) detectado por el sensor MODIS (AQUA-TERRA) desde el 1/11/2000 al 31/12/2014, por análisis de grilla con celdas de 0,5° x 0,5°. El círculo azul junto con la flecha indican las áreas con mayor energía radiativa promedio.

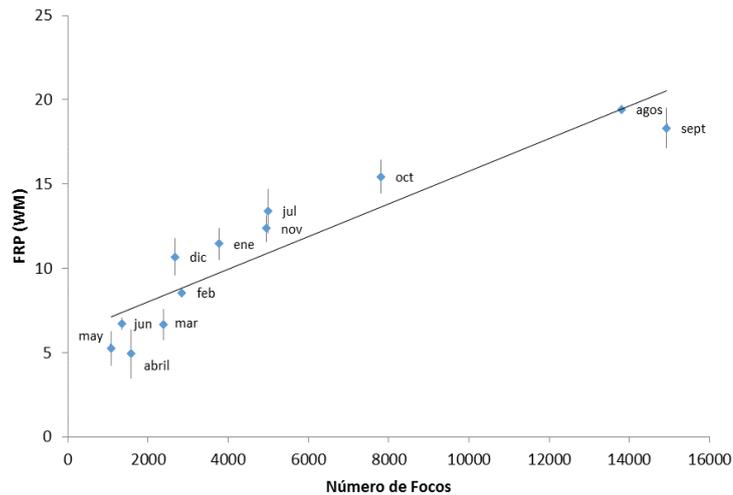


Figura 8. Modelo de ajuste lineal entre el poder radiativo promedio por celda (FRP) y el número de focos detectados para los doce meses del año. Las barras corresponden al error estándar. $FRP = 0,001(\text{Focos}) + 6,0805$; $n=12$; $R^2= 0,84$; $P\text{-valor} = 0,000015 < \alpha=0,05$ (rechazo de hipótesis nula, es decir la variable focos de calor es significativa en el modelo).

Espacialmente tanto el número de focos como su poder radiativo expusieron altos registros en la zona centro-noreste Argentina entre las latitudes -25° y -40° , siendo evidente una mayor variabilidad en los valores de energía radiativa (Figura 9a y 9b) tal como lo expuesto en investigaciones previas (Di Bella *et al.* 2006, Fischer *et al.* 2011, Fischer *et al.* 2015). Este comportamiento puede estar asociado a la predominancia espacial de cobertura vegetal y la diversificación de la cantidad de biomasa, lo cual explicaría la variabilidad del poder radiativo (mayor para coberturas con alto índice de área foliar como bosques frondosos y menor para coberturas con menor cantidad de biomasa como zonas de cultivos y matorrales)

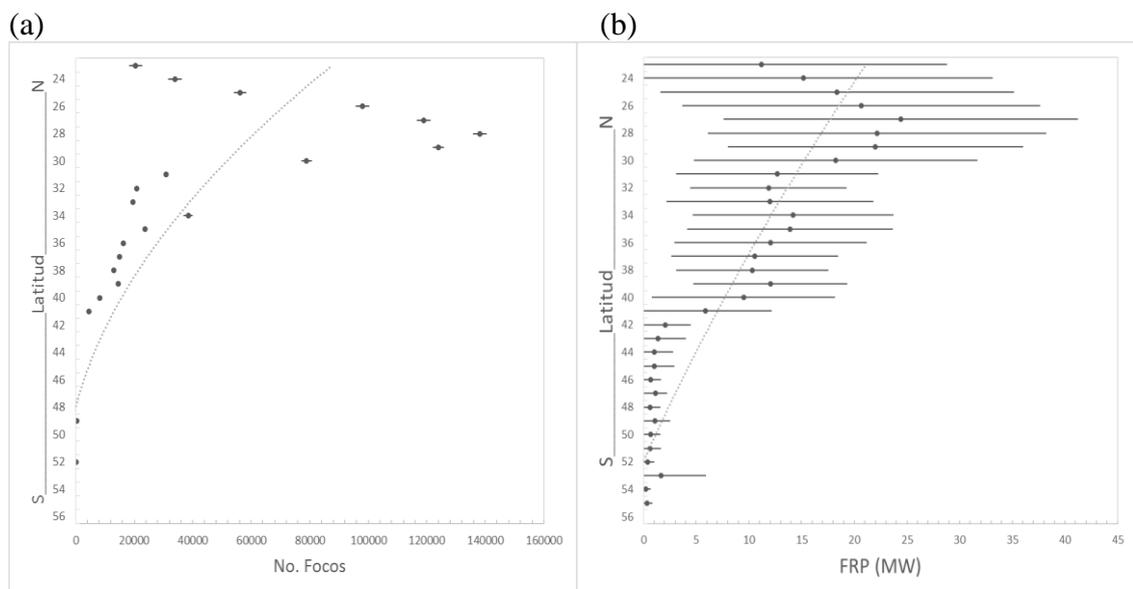


Figura 9. a) Número de focos por latitud y b) poder radiativo por latitud para el periodo comprendido del 1/11/2000 al 31/12/2014. Las líneas punteadas azules indican la

tendencia polinómica del número de focos y el poder radiativo; las barras muestran la desviación estándar por latitud.

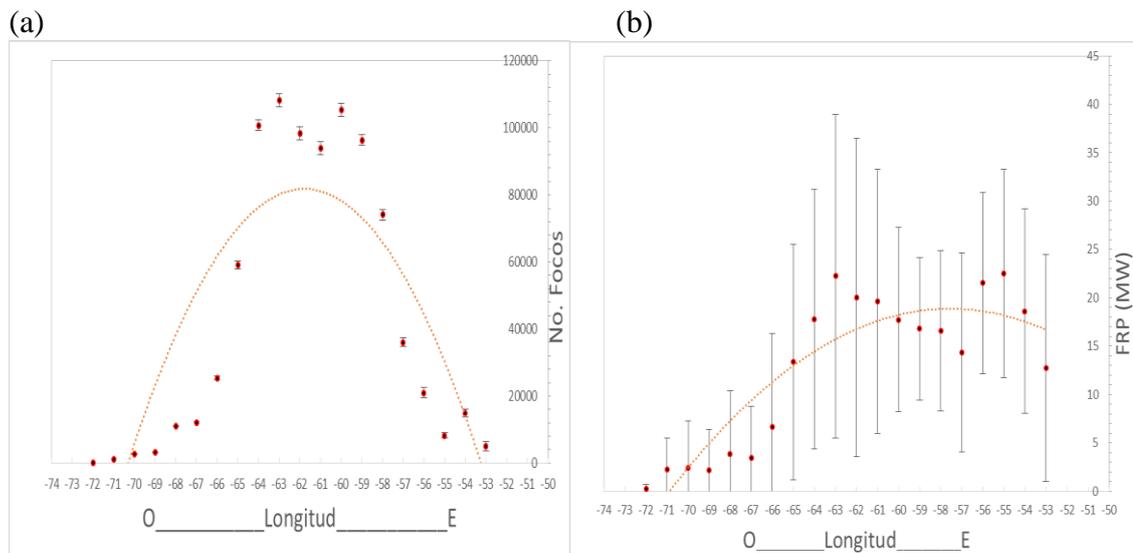


Figura 10. a) Número de focos por longitud y b) Poder radiativo por longitud para el periodo comprendido del 1/11/2000 al 31/12/2014. Las líneas punteadas rojas indican la tendencia polinómica del número de focos y el poder radiativo; las barras muestran la desviación estándar por longitud.

Por su parte, entre las longitudes de -53° a -58° , se observó una menor concentración de focos de calor, justificado por una caída significativa de su tendencia espacial (línea roja), mientras el poder radiativo promedio mostró un decrecimiento muy leve, siendo máximo en longitudes de -54° a -56° (Figura 10a y 10b). Dicha región abarca principalmente la provincia de Misiones y parte de Corrientes, con muy poca participación de las provincias de Formosa y Entre Ríos (Figura 11a y 11b). La densidad de focos aquí comprende al 11,7% del total del país (8,7% y 2,9% para las provincias de Corrientes y Misiones, respectivamente) con un poder radiativo promedio de 20 MW. Esta zona corresponde mayormente a áreas boscosas (bosque húmedo y bosque alto de Paraná ubicados en Misiones) con presencia de algunas zonas de arbustivas y herbáceas. Dicha anomalía explica cómo, a pesar de presentar un bajo número de focos (específicamente en Misiones), se asoció un alto poder radiativo al tipo y cantidad de material combustible.

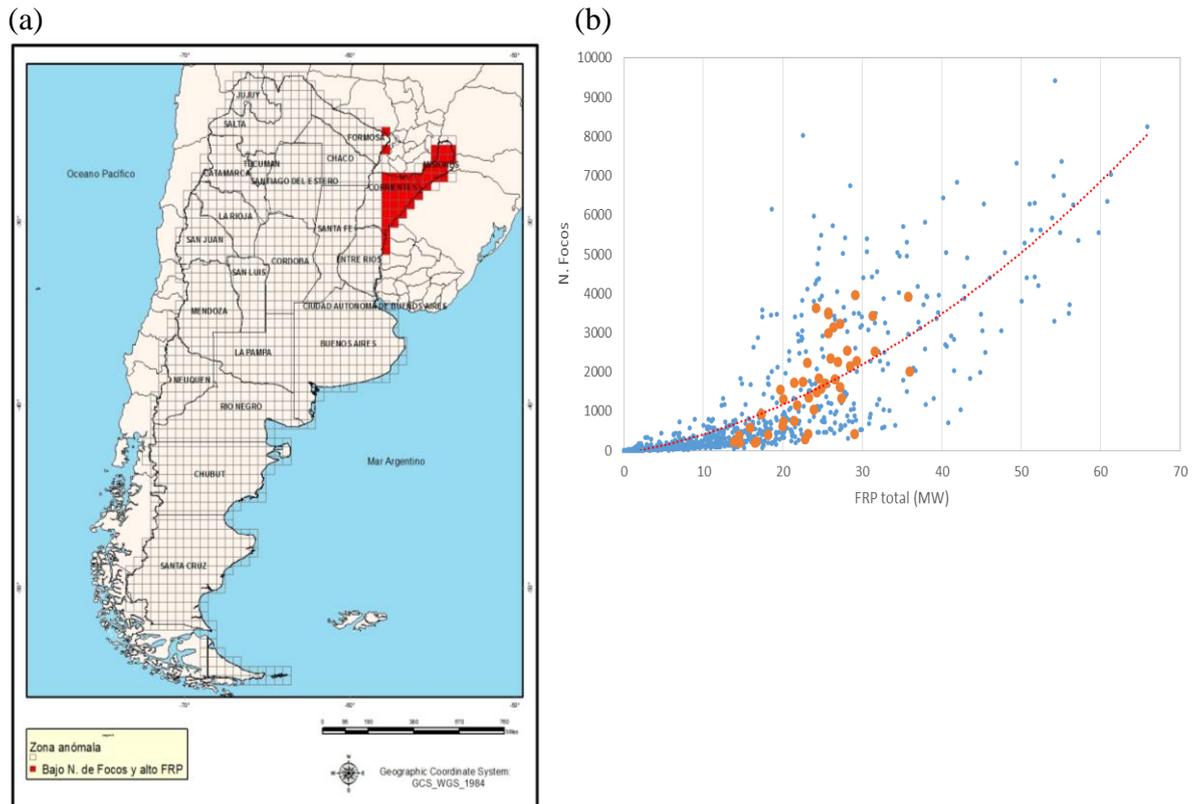


Figura 11. a) Zona anómala donde se observó una baja correspondencia entre el número de focos y su poder radiativo (celdas en rojo), y b) gráfico de dispersión del número de focos y el poder radiativo para dicha zona (puntos rojos) y todo el territorio argentino (puntos azules). La línea roja punteada indica la tendencia del poder radiativo y el número de focos ($Focos = 1,33(FRP)^2 + 35,73(FRP) - 76,6$), ajustada por modelo polinómico con un valor de $r^2=0,7$.

La precipitación efectiva (PE), por su parte, registró un gradiente en sentido E-O (Figura 12), donde hacia el noreste se registraron valores de 121 a 176 mm mensuales (involucrando la provincia de Misiones y Corrientes, con densidad de focos de 0,1 y 0,3 respectivamente) y los menores valores hacia el oeste (sobre la región de Cuyo, con una densidad de focos promedio de $\sim 0,059$) con registros desde -46 a -9 mm mensuales. La distribución espacial de los focos de calor está asociada a rangos de PE de 10 a 64 mm mensuales en la zona centro Argentina, y está asociada a valores en el rango de 10 a 120 mm mensuales en la zona norte argentina. En la zona centro se puede observar que el arco central de densidad de focos coincide con el límite de 60 mm de PE, posiblemente asociado al límite de las regiones fitogeográficas pampeana y del espinal, y al cambio de cobertura vegetal (límite de zona agrícola y zona de matorral). Entonces, en términos generales, el arco central de densidad de focos coincide espacialmente con bajos registros de precipitación efectiva (rangos de PE de 10 a 64 mm/mes, Figura 12) y el comienzo de un tipo de vegetación más propicio a sufrir incendios. Por su parte, los máximos registros de número de focos y energía radiativa ubicados en la zona norte argentina (particularmente en las provincias de Salta, Santiago de Estero, Formosa y el Chaco) presentaron valores de PE de 60 a 100 mm/mensuales donde no se evidenció déficit hídrico (Figura 13a y 13c), por lo tanto, la densidad de focos de calor en este

caso no es limitada por el factor clima y sí probablemente por el tipo de vegetación justificado por la predominancia de cobertura boscosa (bosque húmedo y seco).

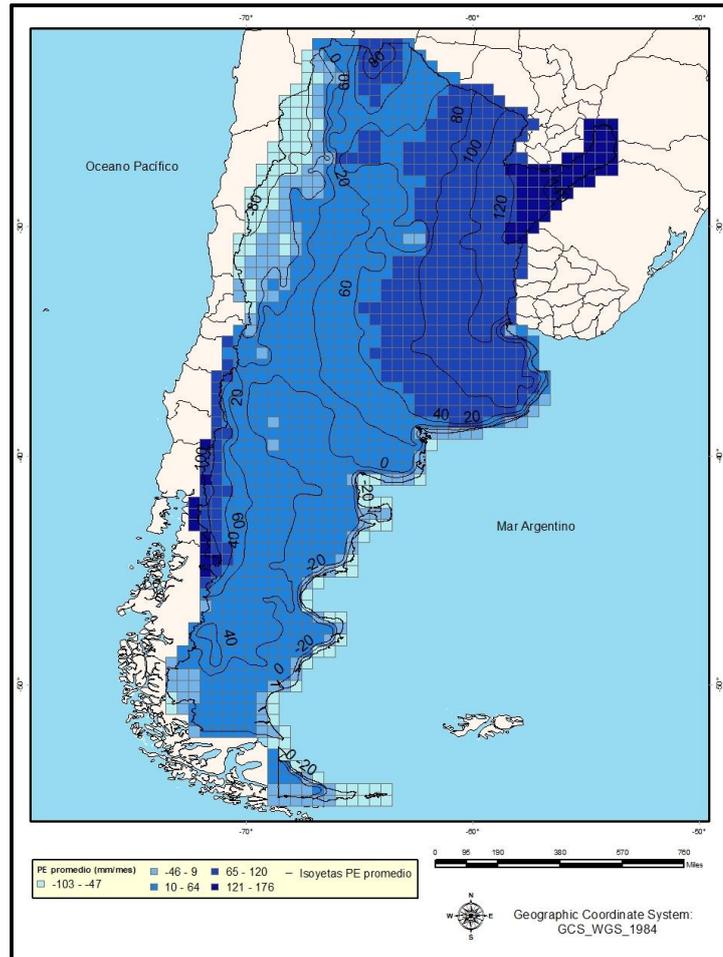


Figura 12. Precipitación efectiva (PE) promedio obtenida por la diferencia de los registros por celda de precipitación y evapotranspiración potencial ($PE = PP - PET$), obtenidos de productos globales MOD16A2 y datos TRMM_3B43, desde el 1/11/2000 al 31/12/2014.

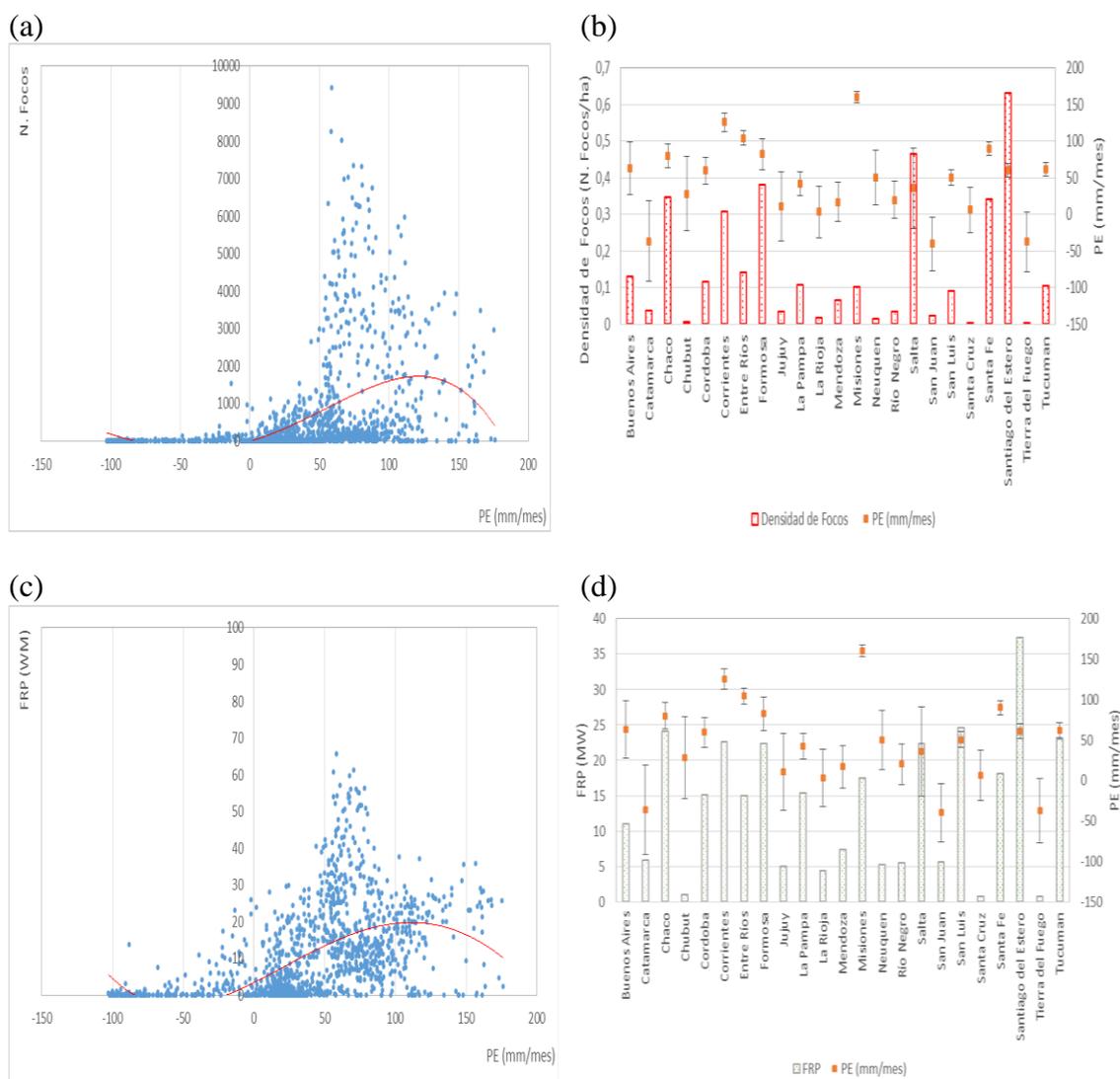


Figura 13. a) Relación de los registros totales de número de focos y la PE (mm/mes), la línea roja representa la tendencia de los datos ($Focos = -0,000003(PE)^4 - 0,0004(PE)^3 + 0,1274(PE)^2 + 10,84(PE) - 5,2126$), ajustada por modelo polinómico, $n=4$; $r^2=0,18$. b) Descripción de la densidad de focos de calor y registros promedio de PE por provincia, las barras indican la densidad de focos por provincia, los puntos el valor promedio de precipitación efectiva y las líneas la desviación estándar de la PE por provincia. c) Relación de los registros promedio de FRP y la PE (mm/mes), la línea roja representa la tendencia de los datos ($FRP = -0,00000002(PE)^4 - 0,00005(PE)^3 + 0,0007(PE)^2 + 0,1926(PE) + 3,4507$), ajustada por modelo polinómico, $n=4$; $r^2=0,27$. d) Descripción de los registros promedio de FRP y registros promedio de PE por provincia, las barras indican el poder radiativo promedio por provincia, los puntos el valor promedio de precipitación efectiva y las líneas la desviación estándar de la PE por provincia. Lo anterior contemplado para el periodo de estudio desde el 1/11/2000 al 31/12/2014.

La ubicación y extensión de ecorregiones definidas por condiciones geomorfológicas y climáticas relativamente uniformes o recurrentes (definidas por el Sistema de Información Nacional Ambiental –SIAN en 1997), constituyó otro factor asociado a los registros de densidad de focos en las zonas norte y centro argentina. Se observó que el

Chaco seco y el Chaco húmedo, fueron las dos ecorregiones que registraron mayor densidad de focos de calor, con porcentajes de densidad de focos de ~39% y ~25% del total del país, respectivamente (Figura 14). Si bien ambas concentran más del 60% de densidad de focos del país, la precipitación efectiva (PE) varía significativamente entre ambas con una diferencia de 45 mm/mes, lo cual indicaría que en los rangos en que esta variable fluctúa no resultaría limitante para el crecimiento de biomasa que se transforme en combustible para un incendio. Sin embargo, esto sí podría estar sucediendo en el caso del Monte Alto, Monte Bajo y la Puna (agrupados en la clase Otros) donde se registran los menores valores de PE dentro de la República Argentina (Figura 14). Otro patrón observado se asocia a la distribución espacial y el límite oriental de la ecorregión del Espinal, la cual coincidió espacialmente con una alta densidad de focos registrada en el arco noreste-sureste y con un porcentaje de ocurrencia de focos de 10,83% del total del país. El poder radiativo promedio de los incendios no mostró mucha variabilidad entre ecorregiones (CV ~ 49%, Tabla 2), sin embargo es significativamente mayor en las ecorregiones con presencia de cobertura boscosa (chaco seco, húmedo y bosque $p=0,0046$, Tabla 2b), concordando con resultados citados en investigaciones sobre el comportamiento espacial del poder radiativo de acuerdo al tipo de vegetación predominante (Taborda 2013, Roberts *et al* 2005).

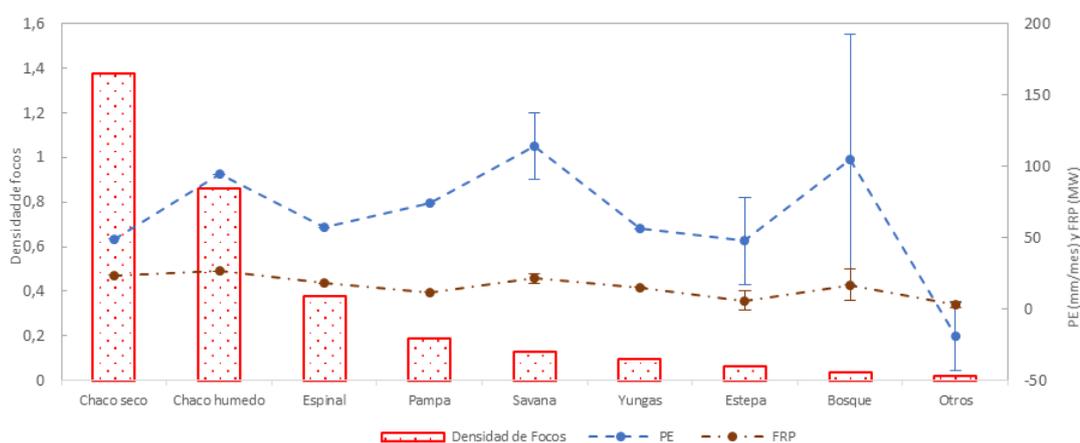


Figura 14. Comportamiento de la densidad de focos, la precipitación efectiva promedio (mm/mes) y el poder radiativo (MW) registrados en los 13 años de estudio para las principales ecorregiones del territorio argentino. Las líneas llenas indican las desviaciones estándar.

a)

Resumen	FRP	Densidad de Focos	PE
Media	15,88	0,35	64,26
D.E.	7,80	0,47	39,82
Var(n-1)	60,84	0,22	1585,47
Var(n)	54,08	0,19	1409,31
CV	49,13	133,38	61,96
Mín	3,14	0,02	-18,93
Máx	26,73	1,38	114,07
Kurtosis	-0,95	0,59	0,23

b)

Variable	n	Media	DE	LI(95)	LS(95)	T	p(Bilateral)
FRP	6	12,42	6,84	5,24	19,60	-4,86	0,0046

Tabla 2. a) Estadísticos descriptivos del poder radiativo, la densidad de focos y la precipitación efectiva promedio para las ecorregiones agrupadas; n=9. b) Prueba t para una media de los valores de FRP (media = 26 MW; p=0,0046).

Analizando al uso y tipo de cobertura del suelo como otro factor predisponente a la presencia de incendios, se observó que las coberturas con mayor densidad de focos fueron bosque, cultivos y matorral con porcentajes de densidad de focos (n° focos/ha) de 44,4%, 20,8% y 20,1% del total del país, respectivamente. Dichas clases se ubicaron en las zonas norte y centro de Argentina.

La cobertura de bosque al exponer la mayor densidad de focos y estar caracterizada por una mayor cantidad de biomasa disponible respecto de las demás, explica como la disposición de material combustible influye en la presencia de incendios, sin embargo, cuando involucra todos los tipos de bosques con diferentes características estructurales y ambientales (bosque magallánico, templado, húmedo y alto), expone un FRP poco significativo respecto a las demás coberturas (prueba t para una media = 15,24; p=0,99, Figura 15a). Cuando se consideran la cobertura boscosa junto con las zonas de vegetación natural (V.N), se observan los mayores registros de poder radiativo promedio (24,5 MW para zonas de vegetación natural y 22,7 MW para áreas boscosas). Dichas coberturas están, las dos ubicadas de forma contigua en la zona norte argentina (zona sur de provincia del Chaco y zona norte de la provincia de Santa Fe), siendo un claro ejemplo de la continuidad espacial que presentan los incendios, condicionada en este caso por el tipo de cobertura vegetal. Las zonas agropecuarias, siendo de gran interés por considerarse un indicador directo de intervención humana en el medio, presentó una importante concentración de focos con una precipitación efectiva promedio de 81,1 mm/mes (Figura 15b) y un promedio de FRP de 15,3 MW. Los matorrales, fueron la tercera clase en registrar el mayor número de focos por celda y expusieron uno de los valores más bajos de precipitación efectiva ~29 mm/mes (cobertura predominante en las provincias de la Rioja, San Juan, San Luis, Mendoza, la Pampa y zonas norte de Neuquén y Rio Negro). Otras coberturas con menor densidad de focos y altos registros de poder radiativo fueron la clase de zonas arbustivas y herbáceas, zonas de praderas y la clase de zonas de vegetación natural del norte de la provincia de Corrientes y sur del Chaco. Este resultado indica que bajo algunas condiciones, la energía radiativa emitida por los fuegos no siempre aumenta con la mayor densidad de focos detectados. Por su parte, las zonas de escasa vegetación (Z.E.V) ubicadas en la zona noroeste y sur argentina, muestran que el déficit hídrico no es el factor más determinante en la densidad de focos si no que probablemente la disponibilidad de material combustible es el principal factor limitante, tal como lo expuesto en investigaciones sobre el potencial de los fuegos (donde se evidencian bajos registros de fuegos para coberturas con poca cantidad de biomasa aérea y mayor biomasa subterránea, Verón *et al.* 2012, Wooster 2002). Las zonas de escasa vegetación se consideran entonces una clase particular con diferencias significativas en registros de densidad, FRP y PE respecto a las demás coberturas (a excepción de zonas urbanas y de matorral, Tabla 3).

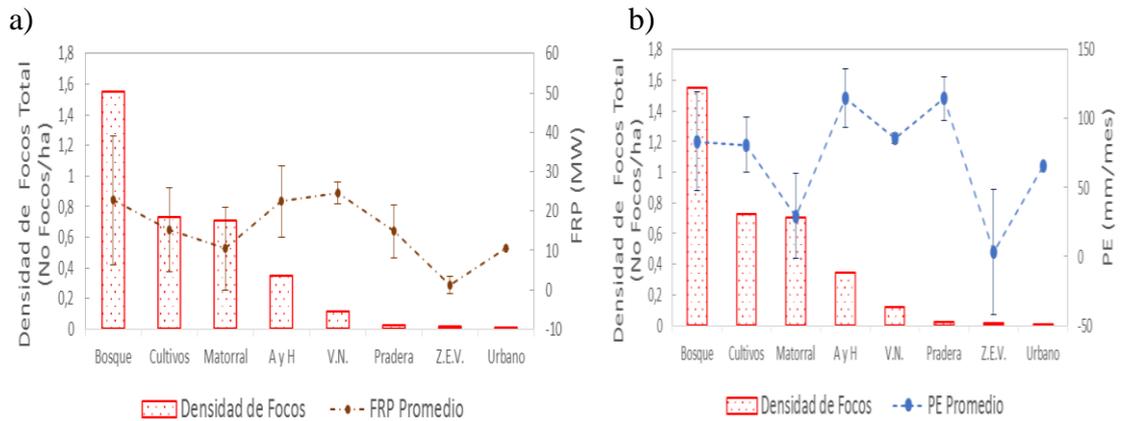


Figura 15. a) Comportamiento de la densidad de focos de calor y el poder radiativo, las barras indican la densidad de focos, los puntos los valores promedio de FRP y las líneas la desviación estándar del FRP por cobertura. b) Comportamiento de la densidad de focos y la precipitación efectiva promedio, las barras indican la densidad de focos, los puntos los valores promedio de PE y las líneas la desviación estándar de la PE por cobertura. Lo anterior registrado en los 13 años de estudio para áreas de bosque, matorral, zonas arbustivas y herbáceas (A y H), vegetación natural (V.N.), praderas, zonas de escasa vegetación (Z.E.V.) y uso asociado a zonas de cultivo y centros urbanos.

Prueba de Friedman

Bosque	Cultivos	Matorral	A y H	V.N.	Pradera	Z.E.V.	Urbano	T ²	p
6,67	5,33	3,67	6,33	6,00	4,67	1,33	2,00	4,00	0,0131

Minima diferencia significativa entre suma de rangos = 9,100

Tratamiento	Suma(Ranks)	Media(Ranks)	n
Z.E.V.	4,00	1,33	3 A
Urbano	6,00	2,00	3 A B
Matorral	11,00	3,67	3 A B C
Pradera	14,00	4,67	3 B C
Cultivos	16,00	5,33	3 C
V.N.	18,00	6,00	3 C
A y H	19,00	6,33	3 C
Bosque	20,00	6,67	3 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,050)

Tabla 3. Prueba Friedman para análisis de varianza (ANOVA): Las zonas de escasa vegetación presentan diferencias significativas respecto a las clases de bosque, zonas arbustivas y herbáceas, vegetación natural, zonas de cultivos y praderas.

Por su parte, también se analizaron los rangos de precipitación efectiva (PE) para los distintos tipos de cobertura en donde se registraron las mayores densidades de focos (Figura 16). Los bosques mostraron una mayor densidad de focos con precipitaciones efectivas (PE) de entre 65 y 120 mm/mes, mostrando un aumento significativo desde los 10 mm/mes, lo cual se debe principalmente a la agrupación en una sola clase de bosques con diferentes características ambientales, ya citado anteriormente. A pesar de ello este resultado nota que la cobertura boscosa no se encuentra limitada únicamente por el déficit de las precipitaciones, sino que también juega un rol importante la cantidad de biomasa disponible para la quema. Otra particularidad es que la muestra la clase matorral, que expuso la mayor densidad de focos en sitios con menores registros de PE,

de entre 10 y 64 mm/mes, y registros de menor densidad en presencia de déficit hídrico (de -46 a 9 mm/mes).

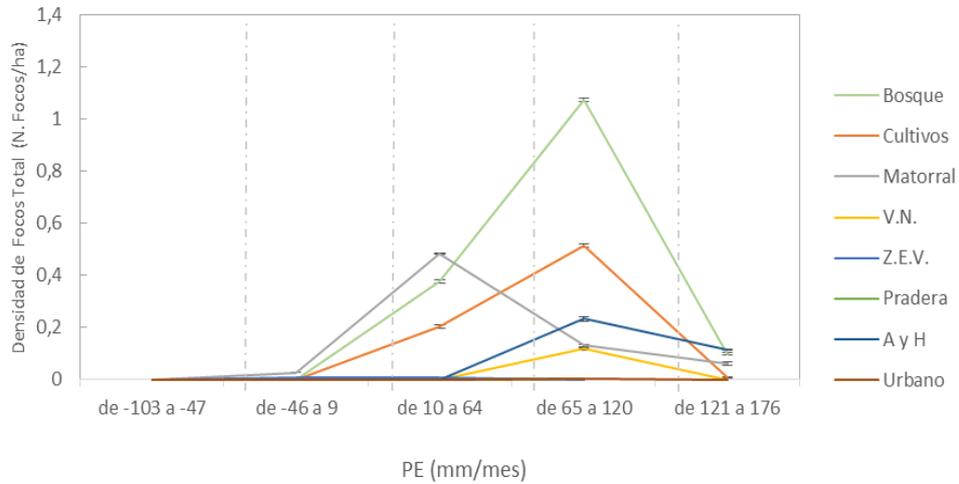


Figura 16. Relación de la densidad de focos de calor con intervalos de precipitación efectiva promedio (mm/mes) registrados en los 13 años de estudio para áreas de cobertura boscosa, agrícola, zonas de matorral, vegetación natural (V.N), zonas de escasa vegetación (Z.E.V), praderas, zonas arbustivas y herbáceas (A y H) y zonas urbanas.

Al analizar el comportamiento de la densidad de focos, la PE y el FRP entre tipos de cobertura, se observó que la zona boscosa mostró registros de muy alta densidad de focos (Figura 17a), así como altos registros de PE y FRP promedio (Figura 17b y 17c). Sin embargo el 50% de los datos (segundo cuartil) de las zonas de bosque exhiben bajos registros de focos por celda. Las zonas agrícolas y de matorral aunque incluyen celdas con alta concentración de focos (presencia de valores atípicos muy altos, Figura 17a) el 75% de sus datos muestran registros de baja densidad de estos eventos. Haciendo de éstas las dos coberturas con mayor variabilidad en sus registros de focos por celda, posiblemente asociado a la diversificación espacial de los registros de focos en cada tipo de cobertura, lo cual podría plantear la idea de la existencia de zonas críticas que perteneciendo a una misma cobertura presentan incendios de mayor magnitud.

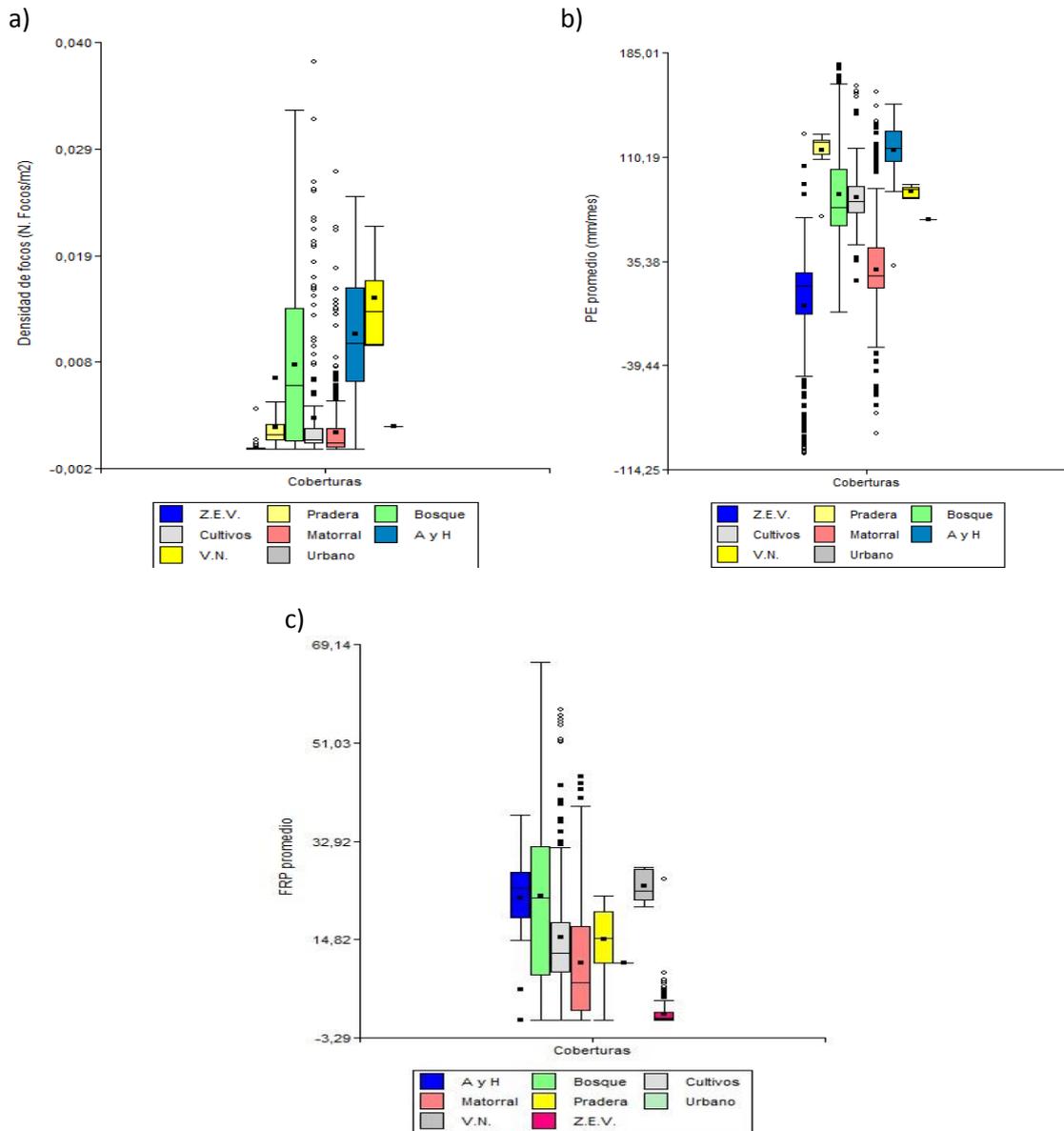


Figura 17. Gráficos de análisis Scatterplots de: a) densidad de focos (n°/ha), b) PE (mm/mes) y c) FRP (MW), para las coberturas y usos de interés.

Por otro lado, se observa que las principales zonas protegidas gubernamentalmente se encuentran agrupadas en la zona noroeste argentina, donde la densidad de focos es baja (con porcentaje de densidad de focos de 0,09 a 0,47% del total del país). Sin embargo se observó que los reservorios de humedales y las reservas naturales albergan aproximadamente el 80% de focos del total registrado para las zonas de protección en la Argentina, así como el mayor poder radiativo liberado para los 13 años de estudio (Figura 18a y 18b). Dichas zonas se caracterizan por regimenes altos de precipitación (rangos de PE de 68 a 135 mm/mes) y se ubican principalmente en las provincias del Chaco, Santa Fé, Corrientes (zona norte Argentina) y en la provincia de San Juan, en áreas donde predominan bosques y vegetación arbustiva y herbácea.

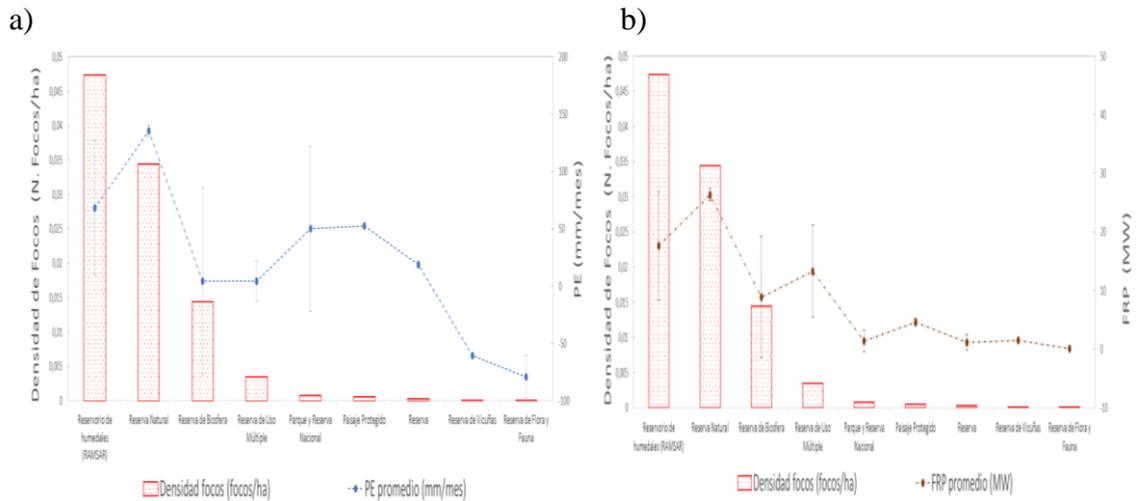


Figura 18. a) Comportamiento de la densidad de focos de calor y la PE (mm/mes) para las principales zonas protegidas en la Argentina, las barras indican la densidad de focos, los puntos los valores promedio de PE y las líneas la desviación estándar de la PE por zona. b) Comportamiento de la densidad de focos y el FRP promedio (MW) para las principales zonas protegidas en la Argentina, las barras indican la densidad de focos, los puntos los valores promedio de FRP y las líneas la desviación estándar del FRP por zona. Lo anterior registrado en los 13 años de estudio.

El nivel de influencia humana, calculado por la SEDAC, con valores del rango de 1 a 64 IH, muestra los mayores niveles sobre las áreas más pobladas de Argentina, como la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, y algunas grandes ciudades de las provincias de Córdoba, Santa Fé y Entre Ríos. Los niveles medios de intervención se encuentran dispersos a lo largo del territorio argentino, en la periferia de los principales centros poblados. Por su parte, los niveles más bajos se concentran en la zona noroeste y sur argentina.

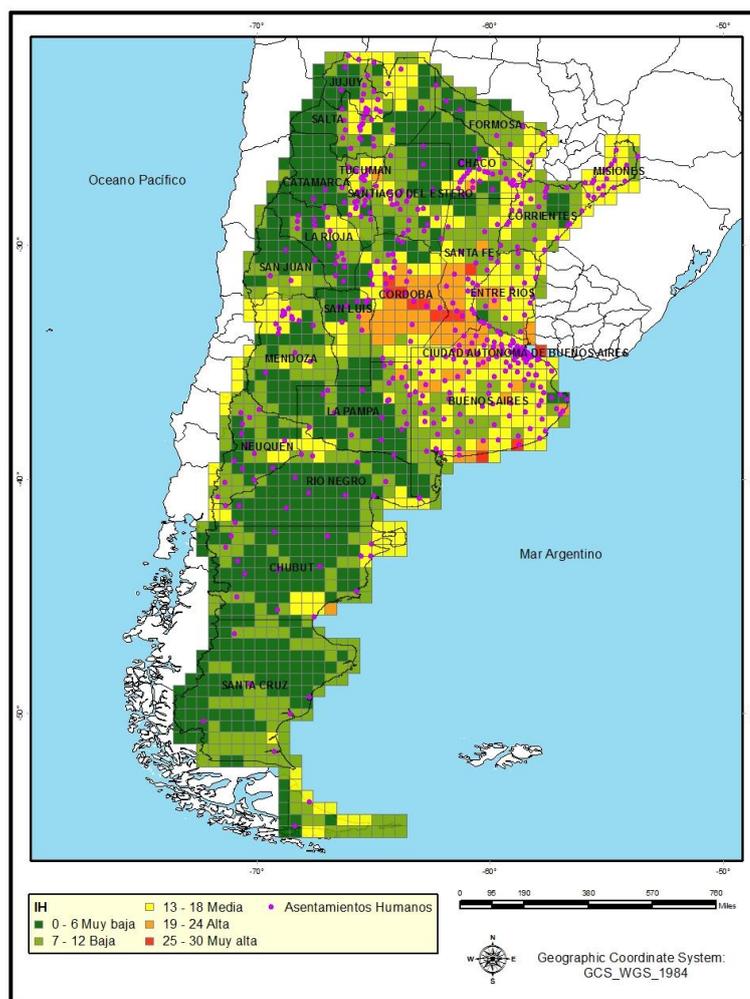


Figura 19. Mapa de influencia humana generado por análisis de grilla con celdas de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ y ubicación de principales centros poblados del territorio argentino. Insumo original publicado por el Centro de Aplicaciones de Datos Socioeconómicos de la NASA (SEDAC). Se descartan valores de IH del rango de 37 a 60 de IH debido a que representan el 0,2% de la grilla de análisis (3 celdas).

Espacialmente, las mayores densidades de focos de calor se detectaron en las áreas con intervención media y muy baja (densidad de focos de $\sim 1,2$ n $^{\circ}$ /ha), con rango de valores de 13 a 18, y de 0 a 6 de IH, respectivamente (Figura 20a y 20b). Las zonas de intervención muy baja registraron los mayores niveles de energía radiativa (~ 58 MW, Figura 20b) donde predominan las zonas de matorral, Z.E.V. (70%) y zonas de bosque (19%); y las zonas de intervención media el 38%, 30% y 15% de su superficie lo conforman zonas de cultivos, matorral y zona boscosa, respectivamente. Por su parte, las zonas de alta y muy alta influencia humana (19 a 30 de IH) se caracterizan por predominancia de zonas de cultivo ($\sim 60\%$). Se observó entonces que, a niveles altos de intervención humana las zonas agrícolas y de matorral registran la mayor densidad de focos; y en zonas de intervención media a muy baja son los bosques la cobertura más vulnerada por incendios (Figura 21), presentando diferencias significativas de densidad de focos por nivel de influencia respecto a las clases de arbustivas y herbáceas, vegetación natural, zonas de escasa vegetación, praderas y zonas urbanas ($p = 0,0001$,

Tabla 4). Por lo tanto, el factor antrópico explica los incendios de zonas boscosas cerca a centros poblados donde hay niveles medios de intervención y los incendios contralados (incendios de menor magnitud con baja densidad de focos y menor liberación de energía radiativa) en zonas agrícolas y de matorral donde es mayor la intervención humana. Este análisis es coherente con resultados de otras investigaciones de la espacialidad de los incendios en la Argentina y la amenaza antrópica como componente del riesgo ambiental, donde se describe que la transformación del territorio en los últimos años con impactos en el relevamiento de las coberturas vegetales nativas (caso de estudio: Sierras de Comechingones, oeste de Córdoba) ha influido en el aumento de la probabilidad de eventos de incendios (Grandis *et al.* 2015).

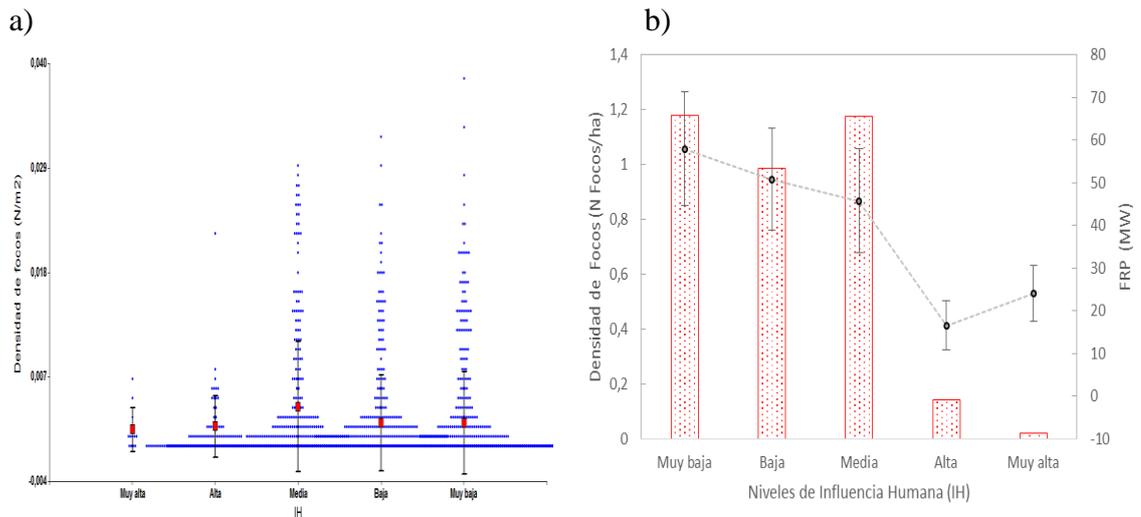


Figura 20. a) Gráfico de densidad de puntos (densidad de focos de calor) para los diferentes niveles de influencia humana registrados en los 13 años de estudio. Los puntos corresponden a cada una de las celdas que conforman la grilla de análisis, las líneas marcan los intervalos de variabilidad de cada clase (el punto rojo corresponde a la media y las líneas externas a los desvíos estándar). **b)** Relación del nivel de influencia humana, la densidad total de focos y el poder radiativo promedio, registrados en los 13 años de estudio para toda la Argentina. Los valores de influencia humana fueron descritos en 5 intervalos iguales: muy bajo (0 a 6), bajo (7 a 12), medio (13 a 18), alto (19 a 24) y muy alto (25 a 30).

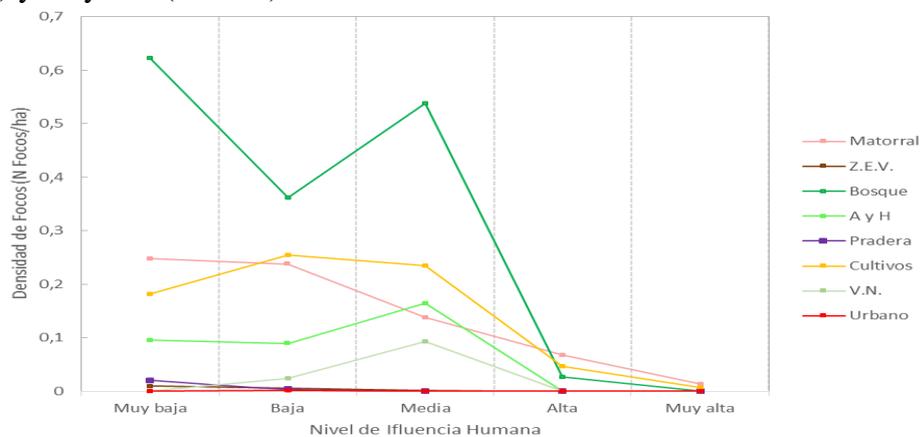


Figura 21. Relación de la densidad de focos de calor con los diferentes intervalos de influencia humana para áreas de cobertura arbustiva y herbácea, zonas de matorral, bosque, praderas, zonas de vegetación natural (V.N), zonas de escasa vegetación (Z.E.V.) y usos asociados a cultivos y centros urbanos.

Prueba de Friedman

Bosque	Cultivos	Matorral	Pradera	V.N.	Z.E.V.	A y H	Urbano	T ²	p
6,70	6,80	6,80	2,90	3,20	3,10	4,50	2,00	13,09	<0,0001

Minima diferencia significativa entre suma de rangos = 7,990

Tratamiento	Suma (Ranks)	Media (Ranks)	n	
Urbano	10,00	2,00	5	A
Pradera	14,50	2,90	5	A B
Z.E.V.	15,50	3,10	5	A B C
V.N.	16,00	3,20	5	A B C D
A y H	22,50	4,50	5	C D E
Bosque	33,50	6,70	5	F
Matorral	34,00	6,80	5	F
Cultivos	34,00	6,80	5	F

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,050)

Tabla 4. Prueba Friedman para análisis de varianza (ANOVA): Las zonas de bosque, cultivos y matorral (Letra F), presentan diferencias significativas de densidad de focos por nivel de influencia humana respecto a las demás coberturas.

3.2. Patrones temporales

De acuerdo al análisis temporal de la densidad de focos de calor detectados en la República Argentina se observó que la mayor cantidad de focos se alcanzaron durante los meses de fines de invierno y principios de primavera (Figura 22). Agosto registró valores significativamente mayores de focos detectados respecto de los meses desde noviembre a julio. El poder radiativo (FRP), por su parte, mostró un comportamiento similar al del promedio de focos. El FRP presentó una tendencia creciente desde el mes de abril hasta alcanzar el máximo en agosto, y una tendencia decreciente desde agosto hasta abril (Figura 22). Esta tendencia coincide con los resultados en investigaciones sobre patrones temporales de la densidad de fuegos en Sudamérica y reportes de análisis mensuales de las superficies afectadas por incendios en la Argentina, que es asociada al empleo del fuego como herramienta de manejo a finales de la estación invernal con el objetivo de reducir la biomasa senescente en superficie y favorecer el rebrote de la vegetación para alimento de ganado (Di Bella *et al.* 2006, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable 2015).

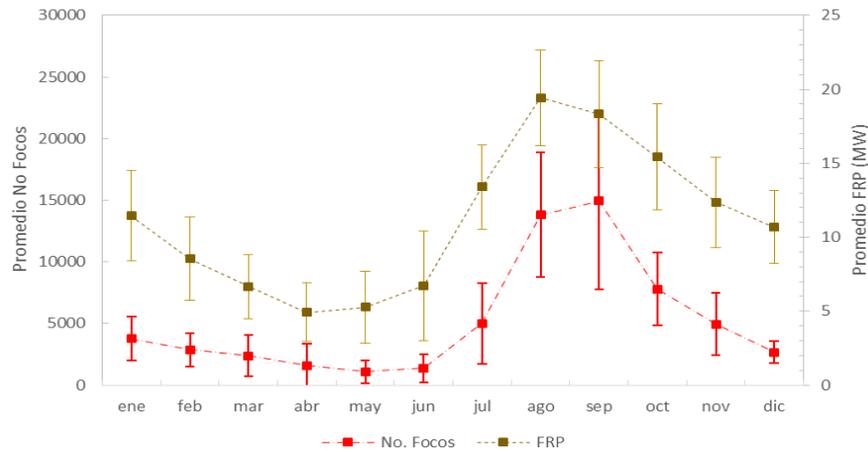


Figura 22. Comportamiento mensual interanual del número de focos y el poder radiativo (FRP), para los 13 años de estudio y todo el territorio argentino, las barras indican las desviaciones estándar por mes del promedio de número de focos (barras rojas) y energía radiativa (barras café). No se incluyó la información correspondiente al año 2000 ya que sólo contaba con dos meses de información.

De igual forma se comparó el comportamiento mensual de la precipitación efectiva (PE) promedio junto con la densidad y poder radiativo de los focos de calor (Figura 23). Se observó que, el comportamiento de la PE era inverso al número y al poder radiativo de los focos. Es decir, con los valores más bajos de PE se alcanzaron los máximos registros de número de focos y FRP. Esto sucede durante los meses de agosto a diciembre, el comportamiento inverso sucede durante los meses de enero a junio. Dicha relación del comportamiento mensual del número de focos y la PE fue citada en otras investigaciones sobre factores climáticos en la ocurrencia, propagación y duración de incendios en la Argentina, describiendo el aumento de número de fuegos a medida que disminuye la PE para los meses de agosto y septiembre (Fischer *et al.* 2011).

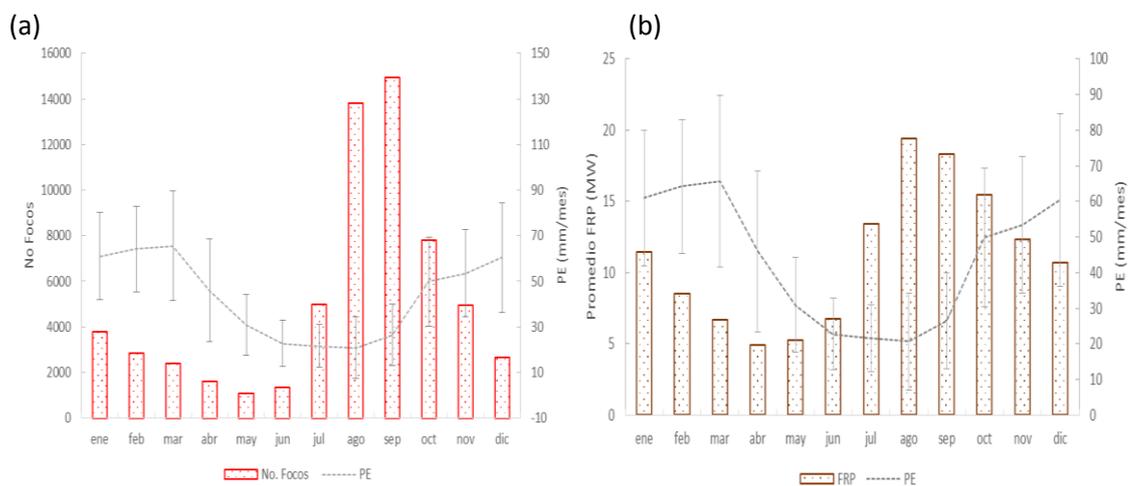


Figura 23. a) Comportamiento intranual del número de focos y los valores promedio de PE y b) comportamiento intranual del poder radiativo (FRP) y los valores promedio de PE. Lo anterior considerando los 13 años de estudio y todo el territorio argentino.

A su vez, este comportamiento inverso entre el número de focos o el poder radiativo respecto de la precipitación efectiva fue analizado anualmente. De esta forma, se pudo observar que, dentro de los 13 años de estudio, la mayoría de los años se comportaron de la misma forma, excepto durante el 2001, cuando se registraron los máximos valores de focos con mayores registros de PE (Figura 24).

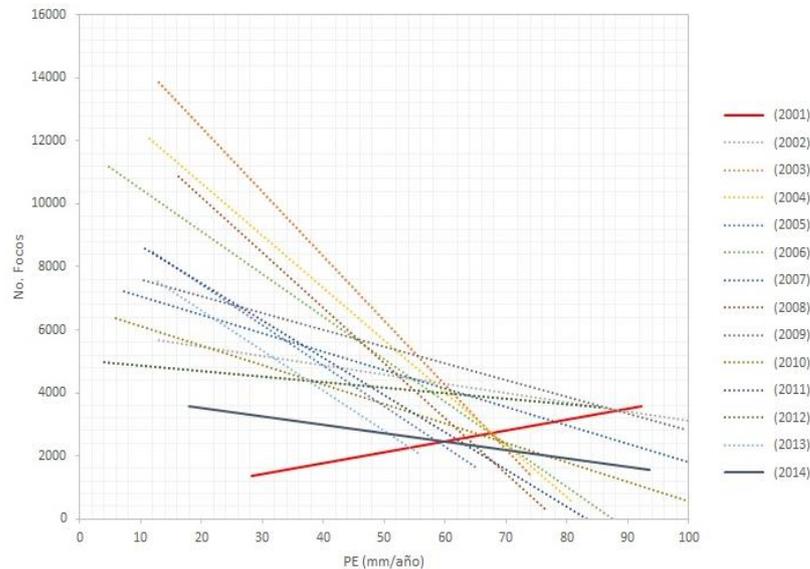


Figura 24. Líneas de tendencia del comportamiento interanual de los valores promedio de PE y número de focos de calor para toda la Argentina, del año 2001 al 2014. La línea roja representa la tendencia de los datos del año 2001 (Focos= 34,406(PE) + 391,83), ajustada por modelo lineal; $r^2=0,09$. La línea azul representa la tendencia de los datos del año 2014 (Focos= -26,876(PE) + 4073,2), ajustada por modelo lineal; $r^2=0,06$.

El año 2001 presentó uno de los menores registros promedio de focos detectados (Figura 24 y 25), así como un bajo poder radiativo, sin embargo su comportamiento respecto a la PE es opuesto en relación a los demás años (Figura 24). Éste, fue un año que durante la estación de mayor incidencia de fuegos presentó valores de indicadores de la humedad y estado de la vegetación por encima del promedio histórico (fuente: <http://sepa.inta.gob.ar/>). El año 2014, que también presentó uno de los menores registros promedio de focos detectados, fue un año con valores por debajo del promedio de la serie histórica de información (2000-2016, fuente: <http://sepa.inta.gob.ar/>).

El número promedio de focos como el poder radiativo presentaron diferencias significativas entre años ($p=0,0001$, Tabla 5). Los años con máximos registros promedio de focos de calor fueron 2003, 2008, 2004 y 2009, que registraron también el mayor poder radiativo (13,9, 13,4, 12,83 y 12 MW, respectivamente, Figura 25), resultado que coincide con el histórico de estadísticas forestales en la Argentina (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable 2015).

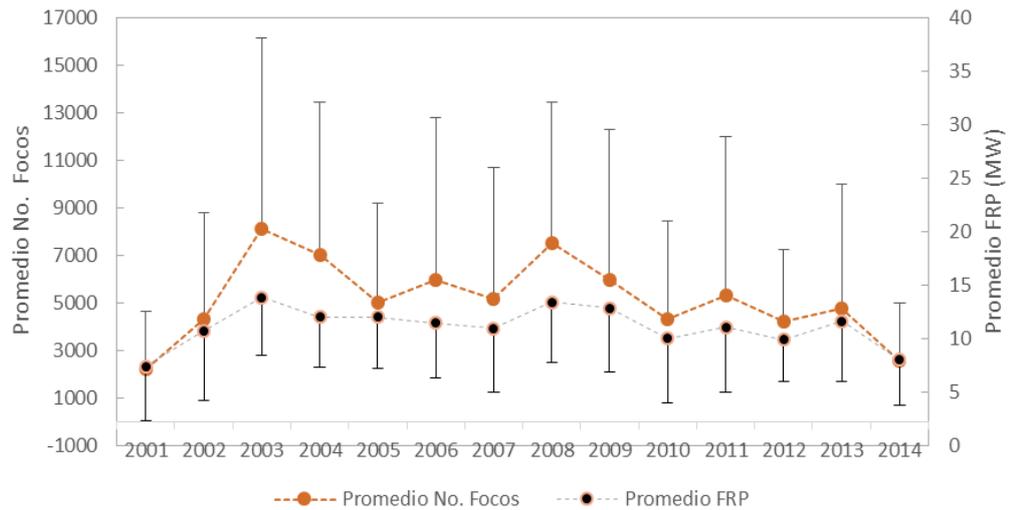


Figura 25. Promedios del número de focos y poder radiativo manifestados en los años 2001 a 2014, las barras indican las desviaciones estándar por año de cada grupo de datos. Se observa un comportamiento proporcional entre el número de focos y su poder radiativo a excepción del año 2005.

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 2232,42

Variable	n	Media	DE	LI(95)	LS(95)	T	p(Bilateral)
PROMEDIO No Focos	14	5182,15	1688,49	4207,24	6157,06	6,54	<0,0001

Variable	n	Media	DE	LI(95)	LS(95)	T	p(Bilateral)
Promedio FRP	14	11,10	1,84	10,04	12,16	-293,93	<0,0001

Tabla 5. Prueba t para una media del número de focos y FRP promedio ($p=0,0001$).

En toda la superficie de Argentina, la frecuencia de focos mostró un comportamiento disímil entre la primera mitad del período de estudio (2001-2007) y la segunda mitad (2008-2014). La primera mitad, a pesar de ser muy variable, no mostró incrementos ni decrementos significativos en la incidencia de los focos. Por su parte la segunda mitad mostró una tendencia negativa ($y = -7422.x + 1E+07$; $r^2=0,746$). El número de focos detectados en el 2014 cayó más de un 65% respecto del 2008 (Figura 26). La mayoría de las ecorregiones mostraron esta misma tendencia para las dos etapas del período; a excepción del Espinal y la clase Otros donde la tendencia fue negativa durante todo el período de estudio, aunque con distinta magnitud (Espinal: $r^2=0,4$; Otros: $r^2=0,73$). Las ecorregiones correspondientes a Bosques ($y = -228,1x + 46063$, $r^2= 0,74$) y Chaco seco ($y= -3023x+6E+06$, $r^2= 0,739$) fueron aquellas que más redujeron la incidencia de focos desde el 2008 en adelante, lo cual puede estar asociado a la aplicación de la ley de bosques que busca la protección de áreas de esta clase frente al desmonte sancionada en el 2007 (Ley Nacional de Bosques Nativos, 2007). Por otro lado, el espinal y las yungas mostraron una tendencia negativa pobre y nula, respectivamente, indicando que la incidencia no sufrió modificaciones significativas en los últimos años. Aún observando la tendencia decreciente de la incidencia de focos anualmente, es importante destacar

que cada año se detectan más de 30 mil focos de calor en Argentina, lo que equivaldría potencialmente a más de 3 millones de hectáreas afectadas por incendios, por lo que la problemática aún resulta ser muy importante y requiere de la atención de los sistemas de control y prevención pertinentes.

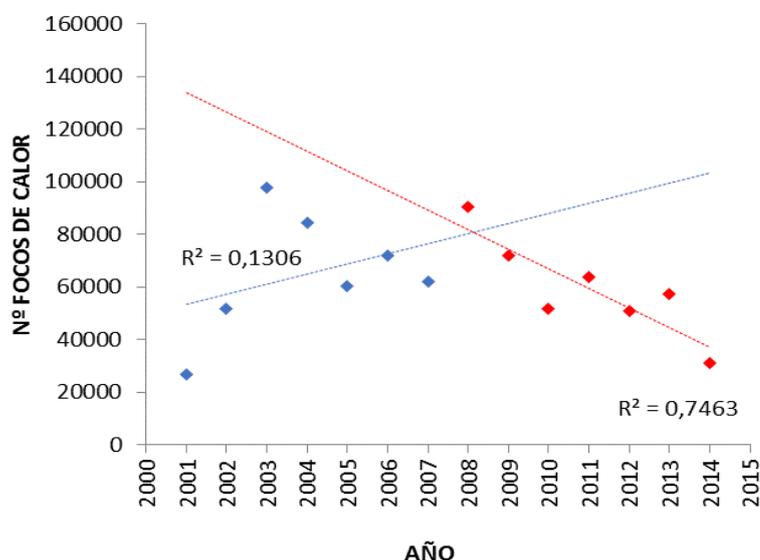


Figura 26. Incidencia de focos de calor para los 13 años de estudio. Los puntos azules indican el total de focos registrados en los años de la primera mitad del periodo de estudio (2001-2007), los puntos rojos por su lado, describen la incidencia en la segunda mitad del periodo (2008-2014). Las líneas punteadas corresponden a las líneas de tendencia, con ajustes del 0,13 y 0,74 para la primera y segunda mitad, respectivamente.

3.3. Patrones espacio-temporales

Los focos de calor también mostraron patrones de comportamiento espaciotemporal. Se registró un retraso de la máxima densidad de focos en sentido noreste-sudoeste (figura 27). Por ejemplo, hacia la región noreste de Argentina, sobre las provincias de Santiago del Estero y Chaco, entre otras, la mayor densidad de focos se alcanza principalmente en el mes de agosto y septiembre; mientras que hacia la provincia de La Pampa la mayor densidad se alcanza hacia diciembre y enero (figura 27).

La región norte argentina, representada en la Figura 27 por el cuadrante ABI, expuso una PE promedio en agosto y septiembre para los 13 años de estudio de 13,73 y 35,64 mm/mes, respectivamente, siendo éstos registros bajos de acuerdo al promedio de precipitación efectiva intranual para la zona norte Argentina PE promedio de ~60 mm/mes y que oscila entre los 10 a 120 mm/mes. Este rango de valores evidencia la presencia de déficit hídrico para dicha región y época particular del año. Este cuadrante comprende la ecoregión del Chaco seco y húmedo, y posee un 36,8% de área boscosa, 27% matorral, 15,3% de agrícola, 10% de zona arbustiva y herbácea, 3,6% de zona de escasa vegetación, 3,2% de pradera y 3% de zona de vegetación natural. Las superficies con mayor densidad de focos se ubican principalmente en zonas boscosas (con intervención alta y media en el 1% y 29% de la superficie total boscosa) y zonas de cultivo (con intervención media en el 29% de la superficie total agrícola, Figura 28a). El cuadrante AII-AIII, por su parte, corresponde al arco de gran densidad de incendios en

sentido noreste-sudeste del centro argentino. Comprende la ecoregión de Espinal que incluye: 63,1% de zona matorral, 35,7% de zonas de cultivos y 0,71% de zona de escasa vegetación. En esta región la PE promedio en enero es de 74,8 mm/mes siendo uno de los mayores registros de PE promedio respecto al histórico intranual para los 13 años de estudio, descartando la presencia de déficit hídrico para ésta región y época particular del año. Los lugares con mayor densidad de focos corresponden a zonas de matorral y cultivos, siendo en esta segunda mayor el nivel de influencia humana (con intervención alta y muy alta en el 50% de la superficie total agrícola, Figura 28b).

De acuerdo a lo anterior, el cuadrante ABI presenta entonces una alta densidad de focos a nivel intranual justificado por: presencia de déficit hídrico en los meses de agosto y septiembre (finales de invierno y comienzo de primavera) e intervención humana media a alta en zonas boscosas y en menor medida en zonas agrícolas probablemente asociado a actividades económicas de la región tales como la ganadería intensiva y la explotación forestal: deforestación por avance de la frontera agropecuaria (Dirección de Bosques 2005). Por otro lado, el cuadrante AII-AIII presenta una alta densidad de focos a nivel intranual justificado por presencia predominante de matorrales (material altamente combustible) y una notoria intervención en zonas de cultivo por implementación de prácticas de manejo para impulsión de rebrote. Es importante destacar que la ecoregión de Espinal a lo largo del tiempo ha sido notablemente transformada de sabanas y pastizales a zonas agrícolas, por ejemplo, la expansión de cultivos anuales para el aumento de la producción de soja (FAO 2004).

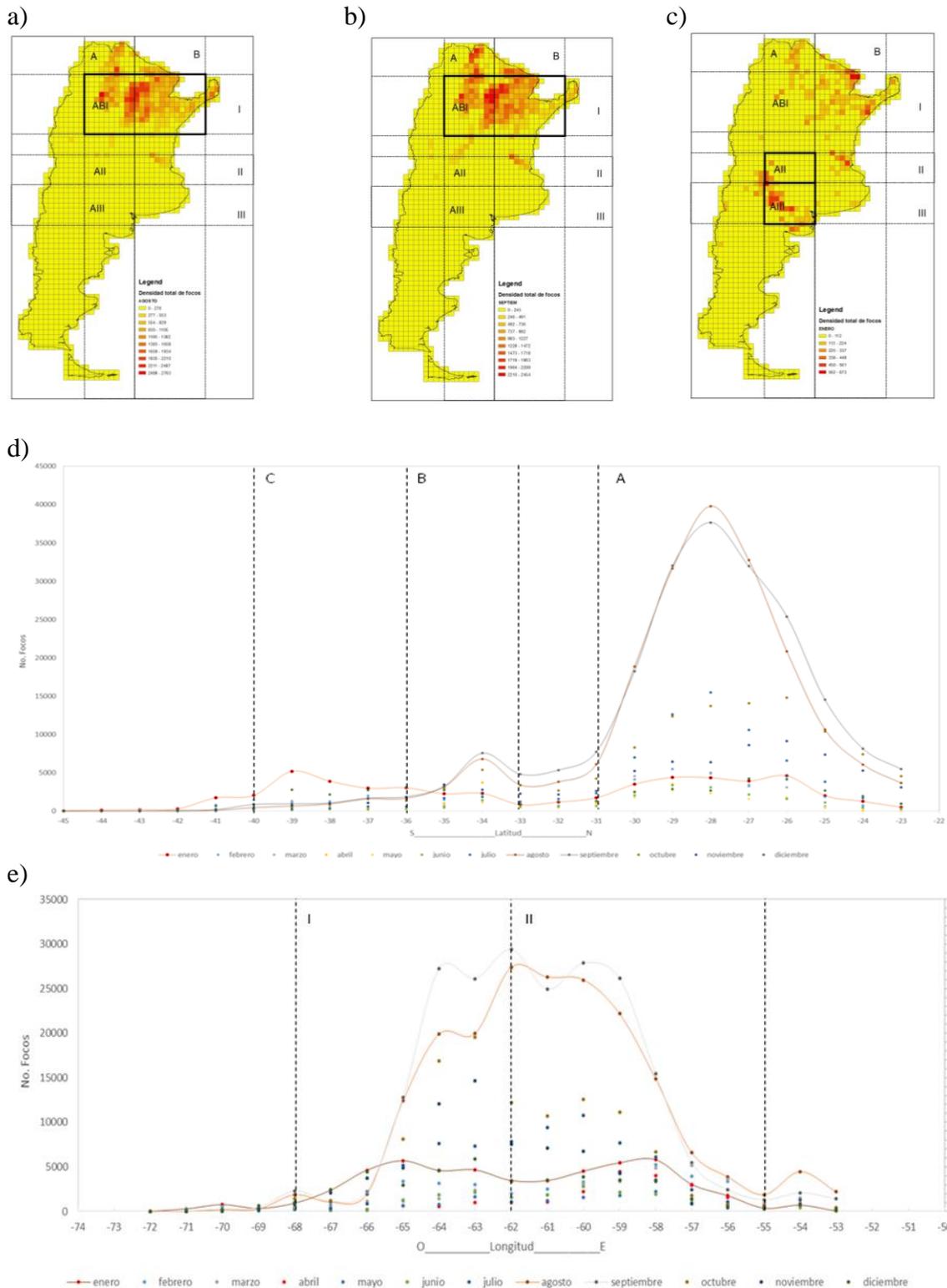


Figura 27. Análisis mensual de la densidad espacial de focos de calor. a) densidad de focos del mes de agosto, b) densidad de focos del mes de septiembre, c) densidad de focos del mes de enero, d) cuadrantes por latitud para los máximos registros de número de focos por celda, e) cuadrantes por longitud para los máximos registros de número de focos por celda.

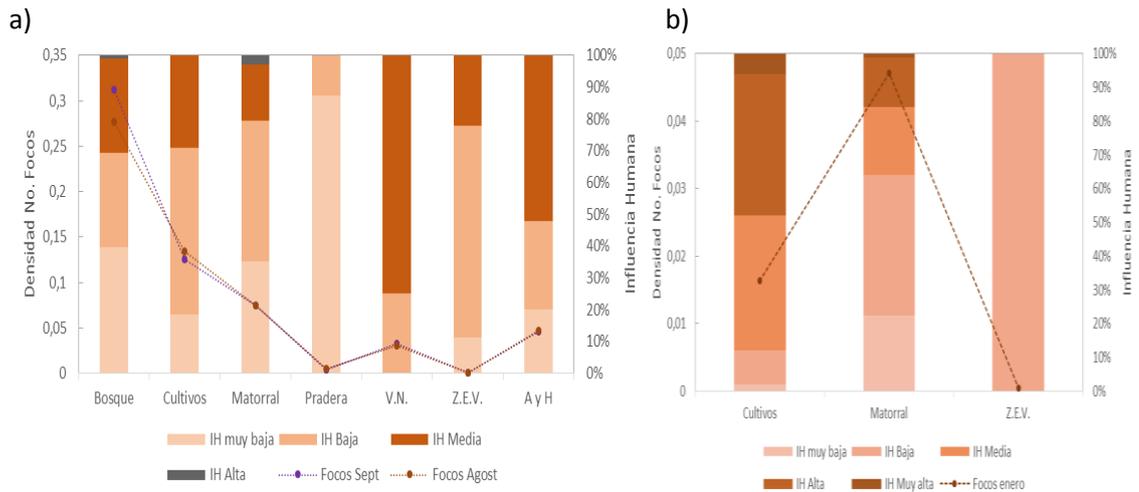


Figura 28. a) Características espaciales de los focos de agosto y septiembre del cuadrante ABI. Descripción del uso y coberturas comprendidas así como los porcentajes de influencia humana por cobertura. b) Características espaciales de los focos de enero del cuadrante AII-AIII. Descripción del uso y coberturas comprendidas así como los porcentajes de influencia humana por cobertura.

La dinámica interanual de la densidad de focos presentó un avance sur-norte, siendo máxima en la región centro en el año 2001 y máxima en la región norte en los años 2003 y 2008 (Figura 29d), coincidiendo con los resultados de los informes anuales de estadísticas forestales para la Argentina (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable 2015). El análisis interanual mostró que, el cuadrante ABI registró la mayor densidad de focos en los años 2003 y 2008, años donde la PE en dicha región no fue significativamente diferente respecto a los demás años de estudio (PE de ~78 y 61 mm/año, respectivamente, $p=0,9837$). Por su lado, el cuadrante AII-AIII (arco central de densidad de focos) tampoco presentó diferencias significativas de PE respecto a los otros años de estudio (PE de ~76; $p=0,9997$). Por lo tanto no se evidencia que los años 2003, 2008 y 2001 fueran años secos con baja precipitación. Las coberturas más vulneradas por incendios en la región norte en los años 2003 y 2008 corresponden principalmente a bosques y cultivos, época donde se registraron grandes extensiones de superficies deforestadas en provincias como Córdoba, Santiago de Estero y el Chaco (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación 2003, 2008). Mientras en la zona centro, en el año 2001 las zonas de matorral fue la cobertura más vulnerada. Es decir, que a nivel interanual la densidad de focos en los dos cuadrantes delimitados se asocia al factor antrópico.

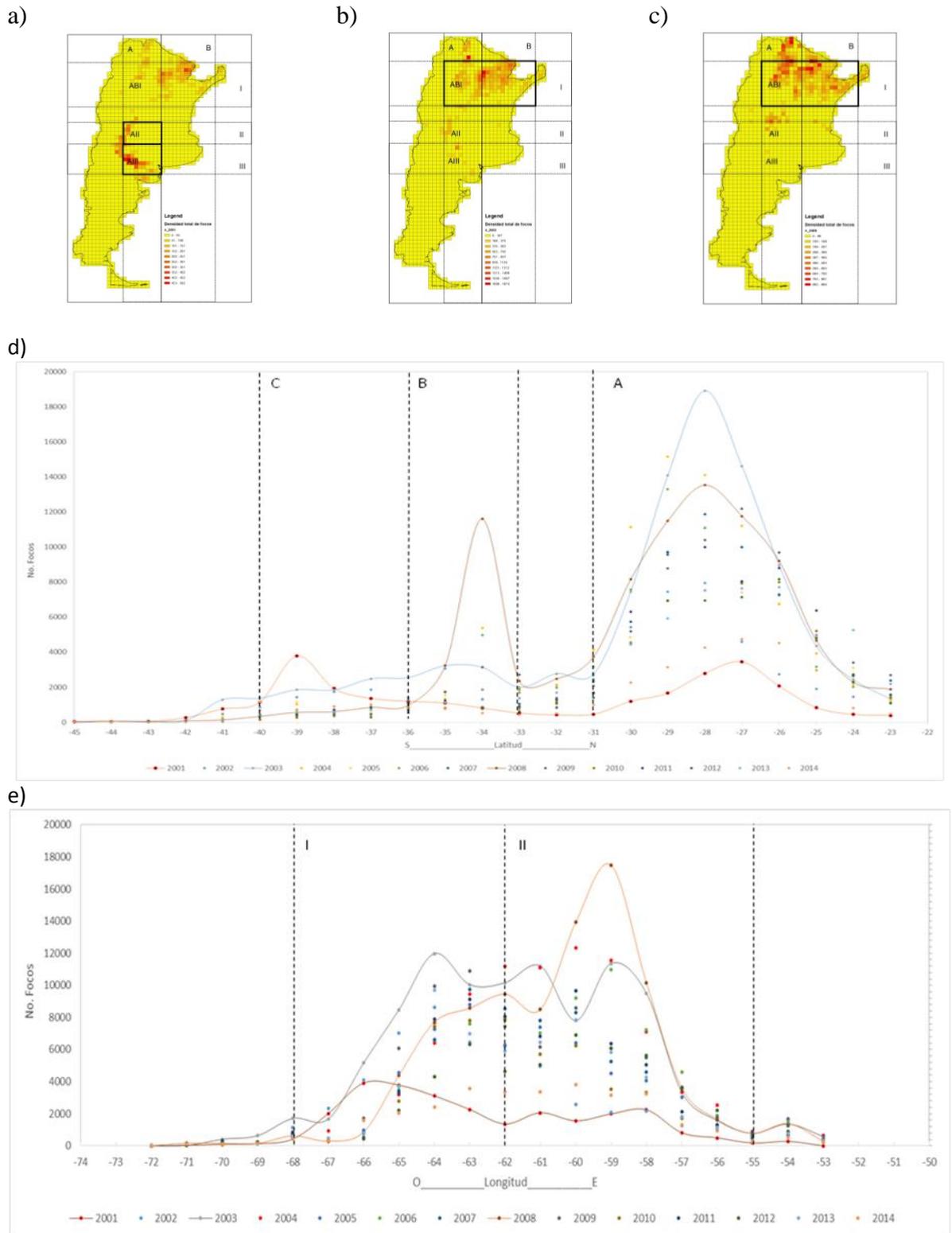


Figura 29. Análisis interanual de la densidad espacial de focos de calor. a) Densidad de focos del año 2001, b) densidad de focos del 2003, c) densidad de focos del 2008, d) análisis interanual de los cuadrantes por latitud para los máximos registros de número de focos por celda, e) análisis interanual de los cuadrantes por longitud para los máximos registros de número de focos por celda.

4. CONCLUSIONES

En Argentina, desde 01/09/2000 al 31/12/2014 se detectaron un total de 877.298 focos de calor. En promedio, alrededor de 6,21 millones de hectáreas fueron detectadas con temperaturas anómalas al menos una vez al año en todo el territorio Argentino. De estas anomalías detectadas, el 28% se localizó en la región Chaqueña, entre el Chaco Seco y el Chaco Húmedo, y en coberturas identificadas como bosques naturales. En el Chaco Seco, la disponibilidad hídrica a pesar de ser baja, parece no estar limitando el crecimiento de la vegetación y por lo tanto no limitaría la cantidad de combustible disponible para la combustión. Por su parte, la influencia humana de estas regiones es media a muy baja debido a que son zonas marginales destinadas al uso ganadero de las tierras o al desmonte para posterior cambio en el uso del suelo. El Chaco Seco, donde se encuentra uno de los bosques subtropicales secos más importantes de Sudamérica y, registró el mayor número de focos de calor en relación a las demás ecorregiones del país (~340.000 focos durante los 13 años de estudio), mostró una reducción significativa en la incidencia de focos en la segunda mitad del período de estudio (2008 a 2014), posiblemente asociado a la puesta en marcha de la ley de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos (Ley 26331), que a partir del 2007 reglamentó la obligatoriedad del monitoreo de desmontes, así como el estudio de impactos ambientales antes de su ejecución, prohibiendo la quema a cielo abierto de los residuos derivados de desmonte, fomentando la protección de los bosques nativos. Sin embargo, a pesar de esta reducción en la incidencia de los focos de calor, el alto registro en la región del Chaco sigue siendo una situación prioritaria que requiere la atención de los sistemas de control y prevención pertinentes. Con el 19 y 14% de la superficie total afectada por focos de calor, las ecorregiones de la Pampa Húmeda y el Espinal, donde predominan zonas de cultivo y matorral, respectivamente, y, que en relación a la zona norte presentaron menor densidad de focos, muestran como los focos se pueden asociar a actos controlados por el hombre en la Pampa Húmeda (como lo es la transformación del paisaje en zonas agrícolas justificado con niveles altos a muy altos de intervención humana), y a regímenes bajos de precipitación en la región del Espinal (justificado con rangos promedio de PE de 10 a 64 mm/mes). Por su lado, las áreas de protección más vulneradas fueron los reservorios de humedal y las reservas naturales, albergando el 80% del total de focos registrados en las áreas protegidas del país.

Tanto en la zona norte como en el arco de densidad de focos en la porción central de Argentina se observó cómo a medida que aumentaba la densidad de focos por celda, aumentó el poder radiativo (FRP). Sin embargo en las provincias de Misiones y Corrientes (extremo noreste argentino) un menor número de focos mantuvo un alto FRP, es decir, que en esta zona donde predominan áreas boscosas (bosque húmedo y bosque alto de Paraná) el tipo de material combustible y la disponibilidad de biomasa determinaron fundamentalmente la energía radiativa liberada.

Por otro lado, los meses de agosto y septiembre fueron los más afectados por focos de calor principalmente en la zona norte Argentina, coincidiendo con los registros intra-

anuales más bajos de precipitación efectiva (PE), o meses con presencia de déficit hídrico. Sin embargo, en la zona centro, la máxima ocurrencia de focos fue en el mes de enero, justificado por veranos muy cálidos. La máxima ocurrencia de focos ocurrió durante los años 2003 y 2008 en la zona norte, y en el año 2001 en la zona centro. Estos años cuya PE promedio anual no fue significativamente diferente respecto a los demás años de estudio, presentaron en el 2003 y 2008 grandes extensiones de superficies deforestadas (principalmente en Córdoba, Santiago de Estero y el Chaco, de acuerdo a informes de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación), es decir que los incendios ocurridos en estos años se asociaron principalmente al factor antrópico. Por su lado, en el año 2001 la cobertura más vulnerada en el centro del país fueron los matorrales, por lo que las anomalías de temperatura en este año y región particular, se asocian principalmente a la remoción de material para la expansión de zonas agropecuarias.

El estudio realizado mostró entonces cómo los sensores remotos permitieron la detección y monitoreo de los focos de calor y, con el uso conjunto de sistemas de información geográfica, asociar su comportamiento espacial y temporal a variables relevantes como el clima, el factor humano y el uso del suelo. Se destaca también, las diversas herramientas de los SIG para la extracción automática de grandes volúmenes de información (modelos de geo-procesamiento). Por lo tanto, la incorporación de la teledetección y los SIG, hace factible la realización de estudios serios y robustos para el seguimiento y estudio de fenómenos a distancia. Sin embargo, cabe destacar que los métodos convencionales de monitoreo siguen siendo indispensables para el análisis de la veracidad y la coherencia de los resultados obtenidos por métodos de percepción remota. Finalmente, este trabajo constituye una línea base para el análisis y comprensión de los incendios, para la implementación de nuevos trabajos, como el impacto y severidad de los incendios, la cuantificación de biomasa quemada e incluso, definir alternativas para usos adecuados de estos eventos (como lo es la generación de bioelectricidad). Algunos lineamientos particulares de este proyecto pueden orientarse al estudio histórico de anomalías de temperatura junto con cartografía de vientos para la predicción de alto riesgos de incendios en la provincia de Córdoba, lo cual sería muy útil principalmente en temporada invernal; a la generación de estadísticas robustas como apoyo a los planes actuales de manejo del fuego; la priorización de zonas vulneradas por incendios de acuerdo a su afectación en estos 13 años de estudio y seguimiento de su evolución siguiendo la metodología utilizada en este trabajo. Es decir, es grande el campo de investigación y muchos los resultados útiles que se podrían obtener, tanto para el control de los incendios como la prevención de los mismos.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Andalucía, J. De. (2013). Teoría del fuego. 1-22. Retrieved from http://www.juntadeandalucia.es/culturaydeporte/archivos_html/sites/default/contenidos/archivos/ahpcordoba/documentos/TEORIA_DEL_FUEGO.pdf.
2. Boqué, R., & Maroto, A. (2004). El Análisis De La Varianza (Anova). *Universitat Rovira I Virgili.*, 1–6.
3. CCA (2014), La quema de residuos agrícolas: fuente de dioxinas, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá. Disponible vía Internet. <http://www3.cec.org/islandora/en>
4. Chuvieco E., (Ed), (1990). Fundamentos de teledetección espacial. (RIALP, Madrid).
5. Chuvieco, E., Ventura, G., Martín, M., and Gómez, I. (2005). “Assessment of Multitemporal Compositing Techniques of MODIS and AVHRR Images for Burned Land Mapping.” *Remote Sensing of Environment* 94 (4): 450-462.
6. Chuvieco, E., Opazo, S., Siones, W., Del Valle, H., Anaya, J., Di Bella, C.M., Cruz, I., Manzo, L., Lopez, G., Mari, N., Gonzalez Alonso, F., Morelli, F., Setzer, A., Csiszar, I., Kapadegi, J.A., Bastarrika, A. and Libonati, R. (2008). Global Burned-land estimation in Latin America using Modis composite data. *Ecological Applications* 18(1):64-79.
7. CIESIN (Center for International Earth Science Information Network). Columbia University and Wildlife Conservation Society, the Bronx Zoo, New York. Disponible vía Internet. <http://www.sedac.ciesin.columbia.edu/wildareas>
8. Climate Change Initiative CCI-LC, ESA. Land cover maps. Disponible vía Internet. <http://esa-landcover-cci.org/>. Accedido 2000-2014.
9. Di Bella C.M., Posse G., Beget M., Fischer M., Verón S. (2008a). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, 17 (3): 39-52.
10. Di Bella, C.M., Fischer, M.A., Jobbágy, E.G. (2008b). The effect of land cover and use on the temporal and spatial pattern of fire occurrence in northeastern Argentina. *International Journal of Remote Sensing*, 32:4961-4971
11. Di Bella, C.M., Jobbágy, E.G., Paruelo, J.M. and Pinnock, S. (2006). Continental Fire Density Patterns in South America. *Global Ecology and Biogeography* 15(2):192-199.
12. Dirección de Bosques. (2005). Primer inventario nacional de bosques nativo Argentina. Informe regional Bosque Andino, 104. Disponible vía Internet. <http://www.ambienteforestalnoa.org.ar>
13. Earth Data. Fire Information for Resource Management System (FIRMS). Disponible vía internet <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms>
14. FAO (1997). El problema de los incendios forestales. <http://www.fao.org/noticias/new97-s.htm>
15. FAO (2004). FAOSTAT. Forestry database. Food and Agriculture Organization, ROME. <http://faostat.fao.org>
16. FAO (2009). El problema de los incendios forestales. <http://www.fao.org/news/story/es/item/29145/icode/>

17. Fischer, M.A., Di Bella, C.M., Jobbágy, E.G. (2011). Fire patterns in central semiarid Argentina. *International Journal of Arid Environments*, doi:10.1016/j.jaridenv.2011.11.009.
18. Fischer, M.A., Di Bella C.M., Jobbágy, E.G. (2015). Influence of fuel conditions on the occurrence, propagation and duration of wildland fires: a regional approach. *Journal of Arid Environments* 120, pp 63-71.
19. Francisco, S., Division, S. F., & Francisco, S. (2007). Riesgos a la Salud de los Niños por los Incendios Forestales - Fase Aguda James M. Seltzer, M.D., Mark Miller, M.D., M.P.H., y Diane L. Seltzer, M.A. Unidades de Salud Medioambiental Pediátricas. Disponible vía Internet. <http://www.aap.org>
20. Grandis, C. Brandi, A., Picciani, A., Finola. (2015). Análisis de la amenaza antrópica como componente del riesgo ambiental: Estudio de las variaciones sufridas en la vegetación en un área de las Sierras de Comechingones afectada por incendios forestales en la localidad de Achiras, Departamento Río Cuarto, Córdoba.
21. Lehsten, V., Tansey, K., Balzter, H., Thonicke, K., Spessa, a, Weber, U., Arneeth, a. (2009). Estimating carbon emissions from African wildfires. *Biogeosciences*, 6, 349–360. <http://doi.org/10.5194/bgd-5-3091-2008>
22. Lentile, L.B., Holden, Z.A., Smith, A.M., Falkowski, M.J., Hudak, A.T., Morga, P., Lewis, S.A., Gessler, P.E. and Benson N.C. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire* 15:19-345
23. Ley Nacional de Bosques Nativos, 2007. Ley 26331 de presupuestos mínimos de protección ambiental de los bosques nativos. Disponible en: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/135000-139999/136125/norma.htm>
24. Ministerio del Interior (2015). Dirección General de Protección Civil y Emergencias - Ministerio del Interior - España. Red Radio de Emergencia - REMER. VADEMECUM REMER - Las mareas. Retrieved from <http://www.proteccioncivil.org/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum12/vdm007.htm>
25. NASA (a), USGS. MODIS Products Table. Disponible vía Internet. https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table. Accedido 2000-2014.
26. NASA (b), Earth Data. Giovanni The Bridge Between Data and Science. Disponible vía Internet. <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Accedido 2000-2014.
27. Nasi R., Dennis R., Meijaard E., Applegate G. y Moore P. (2002). Los incendios forestales y la diversidad biológica. *Revista Internacional de Silvicultura E Industrias Forestales*, 53, 36–41.
28. Neary, Daniel G.; Ryan, Kevin C.; DeBano, Leonard F., eds. (2005). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol.4. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 250 p.
29. Nepstad, D., Schwartzman, S., Bamberger, B., Santilli, M., Ray, D., Schlesinger, P., Rolla, A. (2006). Inhibition of Amazon deforestation and fire by parks and indigenous lands. *Conservation Biology*, 20(1), 65–73. <http://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00351.x>
30. Ordaz, J., Melgar, M., & Rubio, C. (2011). Métodos estadísticos y econométricos. Universidad Pablo Olavide, pag 240. Disponible vía Internet. <https://www.upo.es/portal/impe/web/portada>

31. Organización Panamericana de la Salud. OPS. (1997). Guías sobre emergencias producidas por incendios de vegetación para la protección de la salud pública, 1–30. Disponible vía Internet. <http://www.bvsde.paho.org/sde/ops-sde/bvsde.shtml>
32. Paruelo, JM; Di Bella, CM y Milkovic, M (Editores). (2014). Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales. Editorial: Hemisferio sur
33. Prieto (2009). Relación entre las lluvias y los incendios en la Patagonia. Informe de investigación del Centro de Educación Integral San Ignacio.
34. Roberts, G., M. J. Wooster, G. L., Perry, N., Drake, L., Rebelo, F., Dipotso. (2005). Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: Application to southern Africa using geostationary SEVIRI imagery.
35. Schultz, M. G., Heil, A., Hoelzemann, J. J., Spessa, A., Thonicke, K., Goldammer, J. G., Held, A. C., Pereira, J. M. C., and van het Bolscher, M. (2008). Global wildland fire emissions from 1960 to 2000, *Glob. Biogeochem. Cy.*, 22, GB2002, doi:10.1029/2007GB003031.
36. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2003, 2008). Primer Compendio de Estadísticas Ambientales: República Argentina.
37. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, Argentina, 2007. Informe Regional Parque Chaqueño. Primer inventario Nacional de Bosques Nativos.
38. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2015). Estadísticas de Incendios Forestales 2002 a 2014, ISSN 1850-7230 (versión digital).
39. Sione, Aceñolaza, Zamboni, del Valle, Serafini y Gallardo. (2009). Aplicación de la teledetección en la estimación de las emisiones extraordinarias de CO₂ por quemados de áreas insulares en el complejo litoral del Río de Paraná. Centro Regional de Geomática. Universidad Autónoma de Entre Ríos. Disponible vía Internet. <https://ceregeo.org/publicaciones/>
40. Spessa, A., McBeth, B., & Prentice, C. (2005). Relationships among fire frequency, rainfall and vegetation patterns in the wet-dry tropics of northern Australia: An analysis based on NOAA-AVHRR data. *Global Ecology and Biogeography*, 14(5), 439–454. <http://doi.org/10.1111/j.1466-822x.2005.00174.x>.
41. Taborda. (2013). Detección de emisiones generadas por incendios forestales y quema de residuos agrícolas a partir de la energía y la potencia radiativa del fuego. (Colombia).
42. Van der Werf, J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, M. Mu, P. S. Kasibhatla, D. C. Morton, R. S. DeFries, Y. Jin, and T. T. van Leeuwen. (2010). Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires 1997–2009. Faculty of Earth and Life Sciences, VU University, Amsterdam, The Netherlands.
43. Verón, S.R., Jobbágy, E.G, Di Bella, C.M., Paruelo, J.M. and Jackson, R.B. (2012). Assessing the Potencial of Wildfires as a Sustainable Bioenergy Opportunity. *GCB Bioenergy* 4 (6):634-641.
44. Wooster MJ (2002) Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires. *Geophysical Research Letters* 29, 2027. doi:10.1029/ 2002GL015487.

6. ANEXO 1

Clases originales de los productos de uso y cobertura CCI-LC globales y agrupamiento de clases utilizado.

	CLASES ORIGINALES		CLASES FINALES	CLASES ORIGINALES
0	No dato	0	No dato	0
10	Cultivos	1	Cultivos	10, 20, 30
11	Cobertura herbácea	2	Matorral	120, 121, 122
12	Cobertura arbustiva	3	Pradera	130
20	Tierras de cultivo, regadío o post-inundación	4	Arbustiva	12, 180
30	Tierras de cultivo (>50%)/vegetación natural (<50%)	5	Herbáceas	11, 110
40	Vegetación natural (>50%) / cultivos (<50%)	6	Zonas de escasa vegetación	140, 150, 152, 153, 200, 201, 202
50	Cobertura boscosa de hojas anchas, hoja perenne, cerrada a abierta (>15%)	7	Vegetación natural	40
60	Cobertura boscosa de hojas anchas, hoja caduca, cerrada a abierta (>15%)	8	Bosque	50, 60, 61, 62, 70, 71, 72, 80, 81, 82, 90, 100, 160, 170
61	Cobertura boscosa de hojas anchas, hoja caduca, cerrada (>40%)	9	Zonas urbanas	190
62	Cobertura boscosa de hojas anchas, hoja caduca, abierta (15 - 40%)	10	Cuerpos de agua	210
70	Cobertura boscosa de hojas de aguja, hoja perenne, cerrada a abierta (>15%)	11	Nieve	220
71	Cobertura boscosa de hojas de aguja, hoja perenne, cerrada (>40%)			
72	Cobertura boscosa de hojas de aguja, hoja perenne, abierta (15 - 40%)			
80	Cobertura boscosa de hojas de aguja, hoja caduca, cerrada a abierta (>15%)			
81	Cobertura boscosa de hojas de aguja, hoja caduca, cerrada (>40%)			
82	Cobertura boscosa de hojas de aguja, hoja caduca, abierta (15 - 40%)			
90	Cobertura boscosa mixta (hojas anchas y hojas de aguja)			
100	Cobertura boscosa y arbustiva (>50%) / cobertura herbácea (<50%)			
110	Cobertura herbácea (>50%) / cobertura boscosa (<50%)			
120	Matorral			
121	Matorral de hoja perenne			
122	Matorral de hoja caduca			
130	Pradera			
140	Líquenes y musgos			
150	Zonas de escasa vegetación (<15%)			
152	Zonas de escasa vegetación con arbustiva de hoja perenne (<15%)			
153	Zonas de escasa vegetación con cobertura herbácea (<15%)			
160	Cobertura boscosa, inundada, agua dulce			
170	Cobertura boscosa, inundada, agua salada			
180	Zona arbustiva (>50%) y herbácea			
190	Zonas urbanas			
200	Área desnuda			
201	Área desnuda consolidada			
202	Área desnudo no consolidada			
210	Cuerpos de agua			
220	Zonas de nieve y hielo permanente.			