Caracterización de los focos de calor en la Patagonia argentina y la recuperación de la vegetación post-fuego

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

Tomás Leber
Ingeniero Agrónomo - Universidad de Buenos Aires - 2018

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

TUTOR

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

JURADO DE TRABAJO FINAL

Jurado
Gervasio Piñeiro Guerra
Ingeniero Agrónomo (Universidad de la República)
Dr en Ciencias Agropecuarias (EPG-FAUBA)

Jurado
Pablo Baldassini
Licenciado en Ciencias Ambientales (Universidad de Buenos Aires, Argentina)
Dr en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires, Argentina)

Fecha de defensa del Trabajo Final: 20 de Octubre de 2020

RESUMEN

En toda la Patagonia argentina y sus ecorregiones ocurren incendios cuyo origen puede ser natural o antrópico. Distintos estudios muestran una gran interrelación entre la variabilidad climática y la influencia del hombre en la ocurrencia de fuegos e incendios en esta región. Actualmente existen diversas técnicas y metodologías de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permiten su estudio a distintas escalas espacio-temporales. El objetivo de este trabajo fue estudiar los patrones de incendios de la Patagonia en el período 2001-2018 centrando la atención en un incendio de la localidad de Cholila (Chubut), el más grande de la historia argentina. Para ello se recurrió a distintos productos satelitales comerciales de los sensores MODIS y Landsat *(BAI*, *IVN*, *Q-IVN*, *focos de calor*) tanto por contar con resoluciones adecuadas para este estudio como por su fácil obtención; también se utilizaron productos propios. Se detectó un total de 14.689 focos en el período estudiado, siendo el año 2001 el de mayor cantidad de focos detectados (2.227) y el verano fue la estación en la que más se concentraron (9.730). Río Negro fue la provincia con mayor detección de focos. Los incendios en la localidad de Cholila ocurrieron en verano de 2015 y abarcaron unas 41.000has. Se generaron durante una sequía en una zona muy ventosa y con vegetación propensa a fuegos de alta severidad; al día de la fecha la vegetación no se ha recuperado. Este trabajo permitió conocer la situación patagónica respecto a la distribución y comportamiento espacial de los focos de calor, así como también en la región de Cholila la situación previa y posterior a un importante incendio. La información satelital muestra que al día de la fecha la vegetación en esta región no ha recuperado los valores previos al incendio.

INTRODUCCION

En la Patagonia argentina la ocurrencia de incendios tiene una larga historia y una tendencia cíclica en todas sus ecorregiones (*Schmidt*, 1996; *Blackhall* et al., 2015): espinal, monte de llanuras y mesetas, estepa patagónica y bosques patagónicos (Figura 1). Estos pueden ser de origen natural o antrópico (*Di Bella*, 2008) y su duración, frecuencia e intensidad generan degradación del suelo y emisión de una parte significativa de los gases de efecto invernadero (*Chuvieco*, 2008; *Prieto Herráez et al.*, 2017).

Figura 1- Mapa de la Patagonia argentina. En el recuadro rojo se ubica la zona de Cholila.

Las quemas o fuegos de origen antrópico son una importante práctica de manejo del suelo (*Kaufman*, 1998). En regiones semiáridas las mismas reducen la biomasa combustible y favorecen el rebrote; en regiones húmedas y subhúmedas, en cambio, se las asocia al desmonte no sólo para habilitar nuevas tierras al uso agrícola sino también para mantener la aptitud de las que ya cumplen esta función (*Cingolani*, 2008). Mediante distintos tipos de mecanismos, tanto la ganadería como las quemas y su acción conjunta, modifican las características de las comunidades pudiendo en algunos casos modificar las condiciones ambientales, generando condiciones más xéricas (*Blackhall et al.*, 2015). Los fuegos antrópicos suelen ocurrir en la región más occidental de la Patagonia, mientras que los de origen natural predominan en la región oriental (*Holz y Veblen*, 2016). Diversos estudios indican que existe interrelación entre la variabilidad climática y la influencia del hombre en la ocurrencia de fuegos e incendios patagónicos (*Mundo et al.*, 2017), y cómo la frecuencia de los mismos ha aumentado desde los primeros asentamientos, en combinación con el aumento de las temperaturas y períodos de sequía en la zona a partir de la segunda mitad del siglo XX (*Holz y Veblen*, 2011).

Como los fuegos están asociados de manera directa e indirecta a los distintos usos del suelo resulta de gran importancia contar con métodos fiables para caracterizar las áreas afectadas por los mismos y sus diferentes impactos ambientales. Para ello, podemos encontrar distintas herramientas y métodos que recurren a la teledetección y a información obtenida a partir de distintas plataformas satelitales (*Di Bella et al.*, 2008) que se procesan por medio de distintos Sistemas de Información Geográfica (SIG). El progreso y la severidad de los fuegos está asociado a distintos factores bióticos (tipo de combustible y sus características particulares) y abióticos (clima, topografía, etc.), pudiendo lograrse cierto grado de predictibilidad de los mismos (*Fischer*, 2014). Estas herramientas y metodologías son una alternativa atractiva a los métodos de campo, no sólo por resultar más económicos, sino por permitir un seguimiento en tiempo real del fuego, de sus patrones y factores

asociados, las cuales pueden aplicarse a la prevención, el combate y planificación y manejo de los mismos (*Chuvieco*, 2008; *Prieto Herráez et al.*, 2017). Las metodologías más frecuentemente utilizadas se basan en la detección de anomalías de temperatura, cuantificación de áreas quemadas, generación de diferentes tipos de índices y el estudio de la relación entre la ocurrencia de fuegos y sus distintos factores de control (*Di Bella et al*., 2011).

En este sentido la teledetección brinda información necesaria para el reconocimiento, predicción y prevención de fuegos de alto riesgo en ambientes naturales como ser los focos de calor, que son puntos de la superficie terrestre cuya anomalía de temperatura se asocia a fuegos e incendios (*Di Bella et al.*, 2008). Trabajar con focos de calor presenta distintas limitaciones, sin embargo, las resoluciones espaciales y temporales que presentan distintos sensores resultan en una importante ventaja para el estudio de los mismos. Por otro lado, suelen ser de fácil adquisición y están a disposición gratuita del usuario (*Chuvieco*, 2008). Los SIG complementan a la teledetección, no solo para determinar daños sino también para evaluar los costos y operaciones que de ellos se derivan, generar reportes, planificar y organizar planes de recuperación, así como también establecer planes de evacuación, etc. (*ESRI*, 2012).

La información obtenida remotamente permite también estudiar la regeneración de la vegetación luego de la ocurrencia de un evento de fuego a través del análisis de la recuperación de la actividad fotosintética. Esto resulta de gran interés ya que permite conocer la dinámica funcional de la superficie ante este tipo de disturbios (*Viana-Soto et al.*, 2017). Esta información resulta muy atractiva porque permite estudiar los incendios a distintas escalas (locales, regionales e incluso globales). Aunque la disponibilidad de información para hacer comparaciones entre distintos ecosistemas es aún escasa en algunos casos, la misma permite una identificación mucho más clara de los distintos cambios que pudiesen ocurrir, independientemente de la escala referida (*Meng et al.*, 2014; *Au Yeung*, 2017).

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo fue describir, analizar y evaluar los patrones espacio-temporales de los incendios ocurridos en la Patagonia argentina en el período comprendido entre el 2001 y el 2018, reconociendo cómo afectaron a la región. Asimismo, se caracterizaron los incendios de la localidad de Cholila ocurridos en febrero del 2015, el más grande que se haya registrado en la historia argentina, para estudiar los patrones espaciales del fuego y la recuperación de la vegetación a partir de distintos productos satelitales (*IVN*, *Q-IVN*, *focos de calor*, *dNBR*, etc.).

MATERIALES Y MÉTODOS

La región considerada en este trabajo fue la porción continental de la Patagonia Argentina (

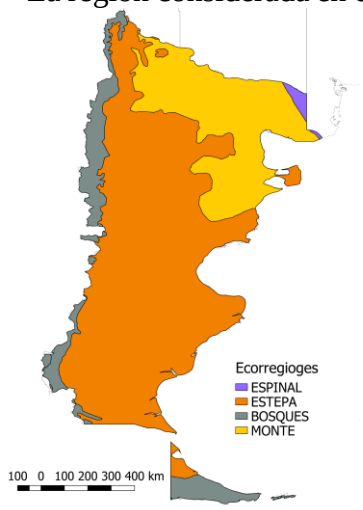
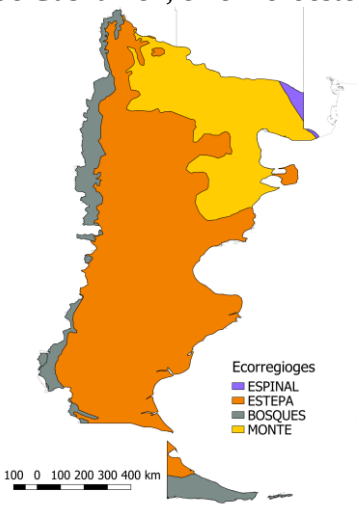


Figura 2). A fines prácticos se consideró a la misma comprendida por las provincias de Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego; es decir, que se extiende desde los 36°05’ S, en la ciudad de Chos Malal en Neuquén hasta Ushuaia, a los 55°03' S, con una superficie de más de 730.000 km^2. Para el estudio de la regeneración de la cobertura vegetal nos centramos en Cholila, localidad ubicada en el departamento de Cushamen, en el noroeste de la provincia de Chubut (recuadro Figura 2). En la Patagonia las precipitaciones disminuyen exponencialmente de oeste a este, donde en la región central llueven menos de 200 mm anuales, concentrándose durante el invierno, lo cual se traduce en importantes déficits hídricos durante la primavera y el verano. La temperatura media anual varía entre 3 y 14°C, aumentando en sentido sur-norte y oeste-este (*Paruelo et al.*, 1998). Es por estos factores, sumados a la humedad del aire, el régimen de vientos, la radiación, etc., que *Paruelo et al.* (1998) consideran a la Patagonia como una región árida, ya que toda su extensión pertenece a esta categoría, y sólo un 9% de la misma presenta características correspondientes a zonas bioclimáticas húmedas y sub-húmedas.



El período de estudio comprendió desde el 1 de enero del 2001 hasta el 29 de octubre del 2018. El mismo se correspondió con la disponibilidad de información de focos de calor obtenida de *FIRMS* (Fire Information for Resource Management System), de la NASA. El producto satelital utilizado fue MOD14A2 Colección 6, generado a partir de imágenes MODIS. El algoritmo de este producto detecta anomalías de temperatura y descarta falsos

positivos (pixeles identificados como focos de calor, cuando en realidad no lo son). El algoritmo de MOD14A2 utiliza la temperatura aparente de un pixel identificado como fuego y la diferencia entre éste y la temperatura de los píxeles circundantes (no fuego) para generar un producto cada 8 días con una resolución espacial de 1km y temporal diaria (*Maier et al.*, 2013).

Para la caracterización del incendio de Cholila, se utilizó el producto de MODIS de área quemada, MCD45A1. Este producto se obtiene con información del sensor Terra y Aqua y posee una resolución espacial de 500 m. El algoritmo aplicado por MCD45A1 detecta cambios bruscos en la dinámica de reflectancia de la superficie terrestre y permite determinar de esta manera qué áreas fueron afectadas por fuego. Esta información se complementó con información del *Global Forest Change* de *Hansen et al.* (2013). Concretamente se utilizó información que corresponde a la cobertura arbórea en el año 2000, considerada como la situación inicial de estudio (control), y la pérdida de este tipo de cobertura por año (2015). A diferencia de los otros utilizados, este producto es elaborado a partir de imágenes Landsat. Para el estudio de la recuperación de la vegetación se utilizó el índice IVN, *índice de vegetación normalizado*. Se trata del estimador de presencia y condición de la vegetación más utilizado, ya que integra aspectos fundamentales del comportamiento espectral de las estructuras vegetales en las longitudes de onda del rojo y el infrarrojo cercano (*Paruelo y Caride*, 2014). Este índice se calcula como:

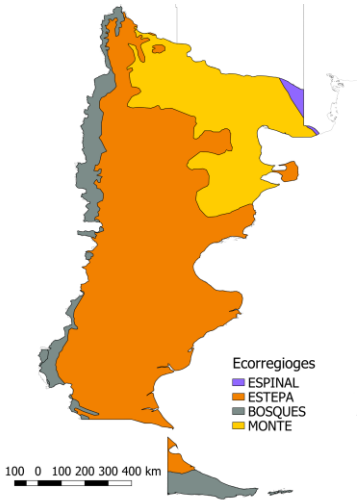


Figura 2 Ecorregiones de la Patagonia argentina.

$$IVN = \frac{IRc - R}{IRc + R}$$

Este índice fue provisto por SATVeg (*Embrapa*, 2015), plataforma que proporciona acceso a esta información en forma regular, permitiendo estudiar la evolución del mismo en el tiempo en las situaciones previas y posteriores al incendio en la zona afectada. El producto proporcionado brinda valores de IVN a escala de 250m cada 16 días. Para este análisis se utilizó el promedio de tres puntos de control no afectados por el incendio (control), el promedio de tres puntos ubicados las zonas más afectadas por el incendio y, a partir de estos dos valores, se calculó el índice Q-IVN:

$$Q\ IVN = \frac{IVN\ promedio\ fuego}{IVN\ promedio\ control}$$

Este índice permite reducir las variaciones fenológicas entre los puntos comparados (*Díaz Delgado*, 2003), de modo tal que se pueda comparar a los mismos entre sí en la situación pre y post-fuego y así poder estimar los niveles de recuperación fotosintética del punto afectado por el incendio (*Mari et al.*, 2007). A partir de este índice se analizó los niveles de recuperación de los puntos considerados como representativos del incendio, recurriendo a una regresión lineal.

El NBR es un índice que utiliza las bandas del infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta; el NBR es sensible a los cambios en la cantidad de biomasa fotosintéticamente activa, el contenido de humedad y condiciones de suelo post-fuego (*Miller y Thode*, 2007). A partir de la diferencia entre un valor previo y uno posterior a un evento de fuego se puede calcular el dNBR (*Differenced Normalized Burn Index*). Se trata del principal índice utilizado hoy en día para evaluar severidad de incendios (*Snyder et al.*, 2005), ya que esta correlacionado con la vegetación fotosintéticamente activa al momento previo del fuego y es un indicador de cuánta vegetación se vio afectada por el evento fuego (*Milley y Thode*, 2007). Estos índices se calculan de la siguiente manera:

$$NBR = \frac{IR\ cercano - IR\ onda\ corta}{IR\ cercano + IR\ onda\ corta}$$

$$dNBR = NBR\ pre\ fuego - NBR\ post\ fuego$$

Para los índices de severidad se utilizó las bandas 2 y 7 de MODIS Terra. Las fechas elegidas fueron el 10 de abril del 2014 para la situación previa al incendio y, para la situación posterior al mismo se utilizó una imagen del 10 de abril del 2015. Esta metodología es la que siguen *Key y Benson* (2006) para disminuir los efectos fenológicos de la vegetación. Para la evaluación de la severidad se recurrió a la escala utilizada por dichos autores.

Las capas políticas de la Argentina fueron descargadas del Instituto Geográfico Nacional (https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG) y la capa de ecorregiones fue elaborada por el *LART* (Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, *FAUBA*). Los SIG utilizados fueron QGIS 2.18.10 y QGIS 3.2; también se utilizó Microsoft Office.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el periodo estudiado se detectó un total de 14.689 focos de calor, siendo el año 2001 cuando más focos de calor se detectaron en la Patagonia, con un total de 2.227 (ver Anexo 1).

Los motivos de que el 2001 haya sido el año con más incendios son diversos, pero se destaca entre ellos que el año 2000 fue el año más lluvioso registrado desde 1995 (*Barros*, 2015); esto resultó en un mayor, y más rápido, crecimiento de la vegetación que, al no ser sustraída del lugar o aprovechada de alguna manera, la biomasa seca se acumuló, generando una gran cantidad de material combustible disponible (*Kunst*, 2017). Es así que estos factores, asociados a distintos eventos climáticos (rayos) y acciones antrópicas (quemas planificadas, negligencia, etc.), derivaron en una situación de alto riesgo de ocurrencia de incendios como el ocurrido.

De los 2.227 focos detectados en 2001, 1.804 se localizaron en la provincia de Río Negro, la que más focos presentó, superando ampliamente a Chubut, que la seguía con 205 (Figura 3). Río Negro fue la que se destacó por sobre las demás con 9.584 focos detectados (ver anexo 2). El año 2010 fue el año que presentó menor número de focos detectados en todo el periodo (Figura 3 y Figura 4). El año 2001 superó ampliamente el promedio entre los años 2004 y 2014 (466 focos de calor). Se observó también que entre los años 2015 y 2017 el número de focos de calor detectados aumentó sensiblemente respecto a los once años anteriores.

En los años 2015, 2016 y 2017 se observó un aumento muy importante en la cantidad de focos de calor detectados (Figura 3 y Figura 4); esto se debe a que en el año 2015 comenzaron a notarse los efectos de la que sería la sequía más importante desde la década de 1950, con precipitaciones hasta un 45% inferiores al promedio histórico (*Repetto*, 2016), tanto en forma de lluvia como nieve, acompañada por un aumento de las temperaturas, condiciones predisponentes a la ocurrencia de incendios, sumado al adelanto de las primaveras en el periodo estudiado (*Surraco y Cabana*, 2016). Según *Westerling* (2006), el adelanto de las mismas se asocia a un aumento en el déficit hídrico hacia mediados de verano. Fue en este momento cuando se detectaron la mayor cantidad de focos de calor durante el periodo estudiado.

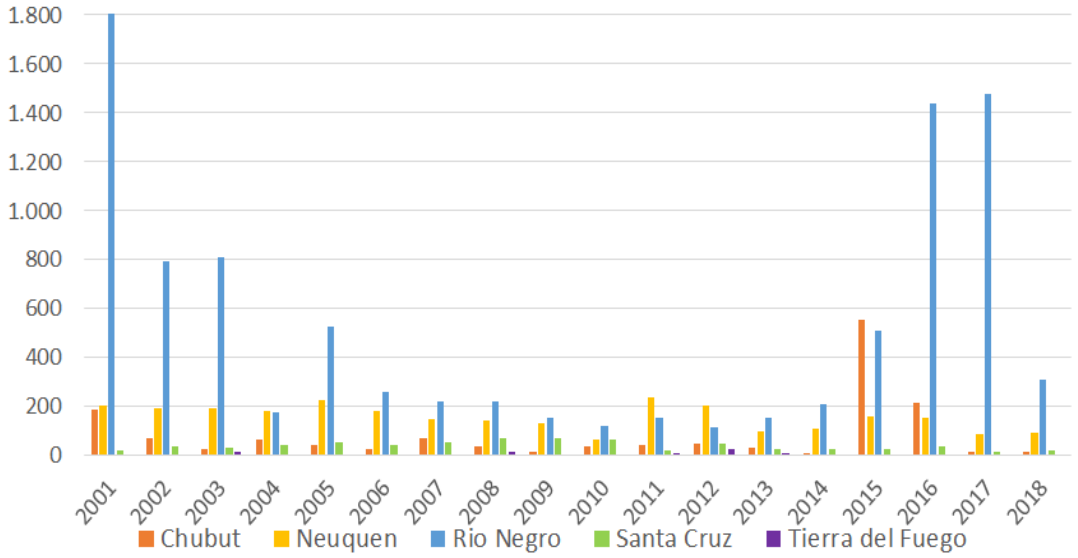


Figura 3 Cantidad de focos de calor por provincia y por año

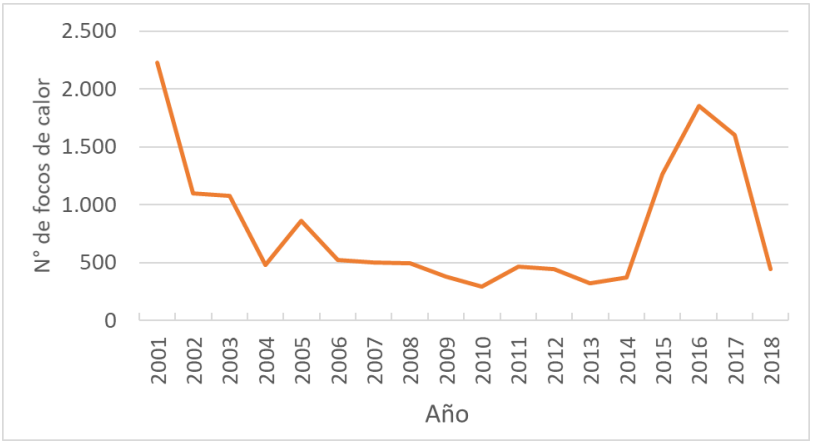
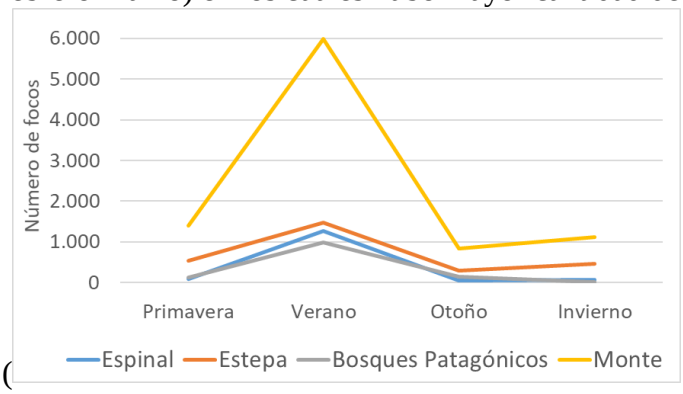


Figura 4 Cantidad de focos de calor por año detectados mediante el producto MOD14A2.

Fue en los meses del verano (enero-febrero-marzo) en los cuales hubo mayor cantidad de focos detectados (Figura 5), con un total de 9.730 (contabilizando todas las ecorregiones), de los cuales el 61% correspondieron a la ecorregión de monte. En estos meses se registraron el 11% de las precipitaciones anuales para esta región, los más bajos de todo el año; en otoño, invierno y primavera las precipitaciones fueron del 27, 46 y 16%, respectivamente reduciéndose el riesgo de ignición de combustibles (*ORA*, 2018). Es en verano también cuando se registran los menores valores de humedad relativa (*Paruelo et al.*, 1998).



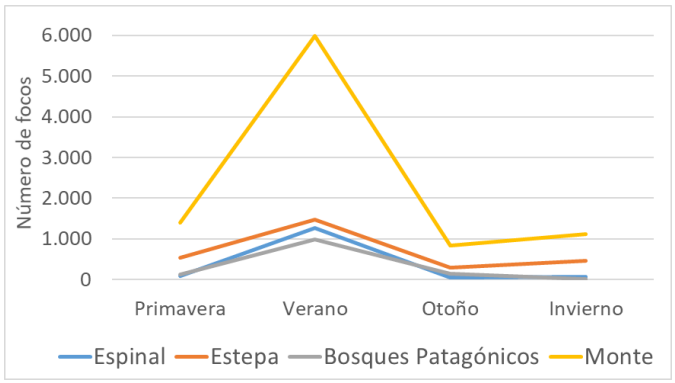


Figura 5 Focos de calor detectados en las distintas estaciones en las diferentes ecorregiones patagónicas

Como ya se mencionó, Río Negro fue la provincia con más focos detectados, aunque no por eso fue la provincia más afectada en cuanto a la gravedad de los incendios ocurridos. Tanto en esta provincia como en Chubut, Neuquén y Santa Cruz se observó una tendencia de aumento en el número de focos de calor entre el otoño y el verano (Figura 6). La ecorregión monte, en Río Negro, fue también la ecorregión que más focos de calor presentó durante todo el transcurso del estudio (ver Anexo 3).

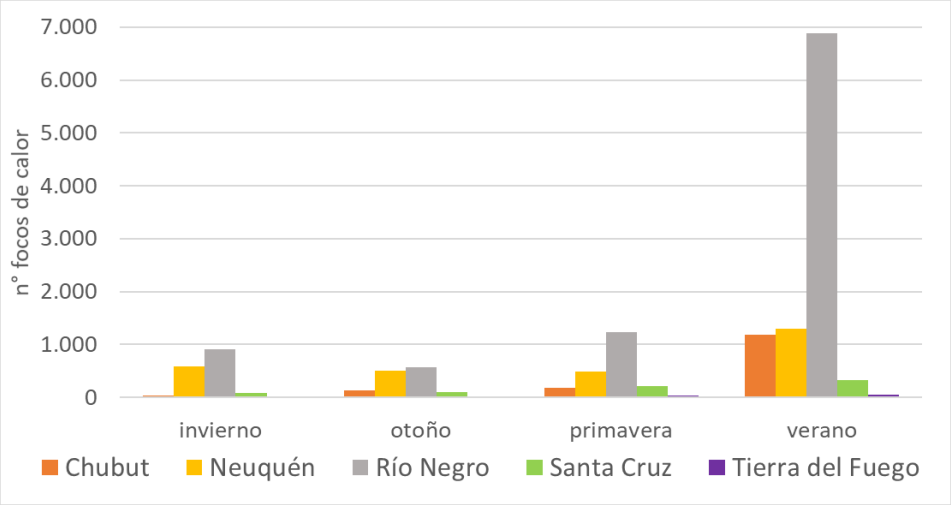


Figura 6 Focos de calor detectados en las distintas estaciones, en las provincias patagónicas

La cantidad de focos detectados, tanto en Río Negro como en la ecorregión monte donde se detectaron en mayor número, están íntimamente asociados. En el noreste de Río Negro, donde se encuentra el monte oriental, el régimen hídrico está comprendido entre los 230 y 270 mm anuales y las comunidades florísticas son muy homogéneas y constantes (*León et al.*, 1998; *Peter et al.*, 2012). Según *Peter et al.* (2012), esta ecorregión donde se practica la ganadería presenta baja presión de pastoreo, aunque suficiente como para conducir a la extinción de las especies más palatables de sus comunidades. El ganado pastorea repetidamente estas especies, que son reemplazadas por arbustos de características xerófitas, típicas del monte propiamente dicho (*Borrelli*, 2001; *Oyarzábal et al*. 2018). A esto se suma la degradación debida al pisoteo (*Carabelli*, 2003). Los pastos no logran desplazar a los arbustos instalados, siendo las labores mecánicas y el uso controlado del fuego las únicas alternativas para reinstalarlos (*Borrelli*, 2001; *Lini*, 2008). Cabe destacar también que esta zona de Río Negro está parcialmente dedicada a la agricultura de secano marginal y en el proceso de desmonte se recurre a la utilización del fuego (*Lini*, 2008), tanto por su costo como por el arraigo cultural en su uso. Lo mismo ocurre en varias regiones de la Patagonia, ya que desde la colonización se recurrió a la quema para habilitar nuevas tierras para la ganadería ovina (*Carabelli*, 2003; *Mundo et al.*, 2017).

En la Figura 7 se observa la distribución de focos de calor en la Patagonia en una grilla, de las cual cada celda representa un área de 784 km^2 (28km de lado), superficie que permitió representar los focos y asociarlos a las distintas provincias y ecorregiones. Se pone en evidencia aquí que es en la transición de las ecorregiones de monte y espinal, al este de la provincia de Río Negro, donde se han detectado la mayor cantidad de focos en el período de estudio.

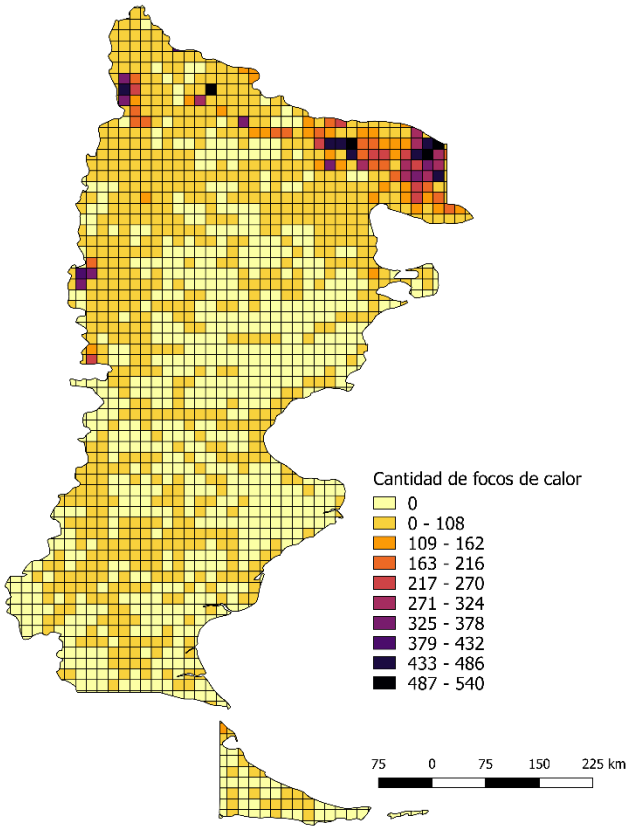


Figura 7 Grilla de densidad de focos de calor en la Patagonia argentina en el periodo estudiado.

En la Figura 8 se puede observar la distribución de los focos de calor en la Patagonia en las distintas estaciones del año. La mayoría de los focos detectados en la zona de transición monte-espinal ocurrieron durante el verano; y, aunque la distribución territorial resultó más homogénea durante la primavera, el número de focos detectados fue mucho menor.

Por otra parte, en los meses comprendidos para las estaciones de otoño-invierno (abril-septiembre) se observan patrones en los focos de calor en las zonas aledañas al Valle del Río Negro, donde se destaca la producción frutícola. El 72% de las explotaciones presentan un bajo nivel tecnológico aplicando métodos de prevención de heladas que incluyen la quema de distintos combustibles (*Avellá et al.*, 2007) que pueden ser detectados por los distintos productos satelitales a los que se recurrió en este trabajo. Situación que se evidencia en las distintas estaciones con riesgo de heladas (otoño y primavera).

Esto puede observarse también en la Figura 3 donde se repiten estos mismos patrones espaciales, tanto en el monte oriental como en las zonas aledañas al Río Negro.

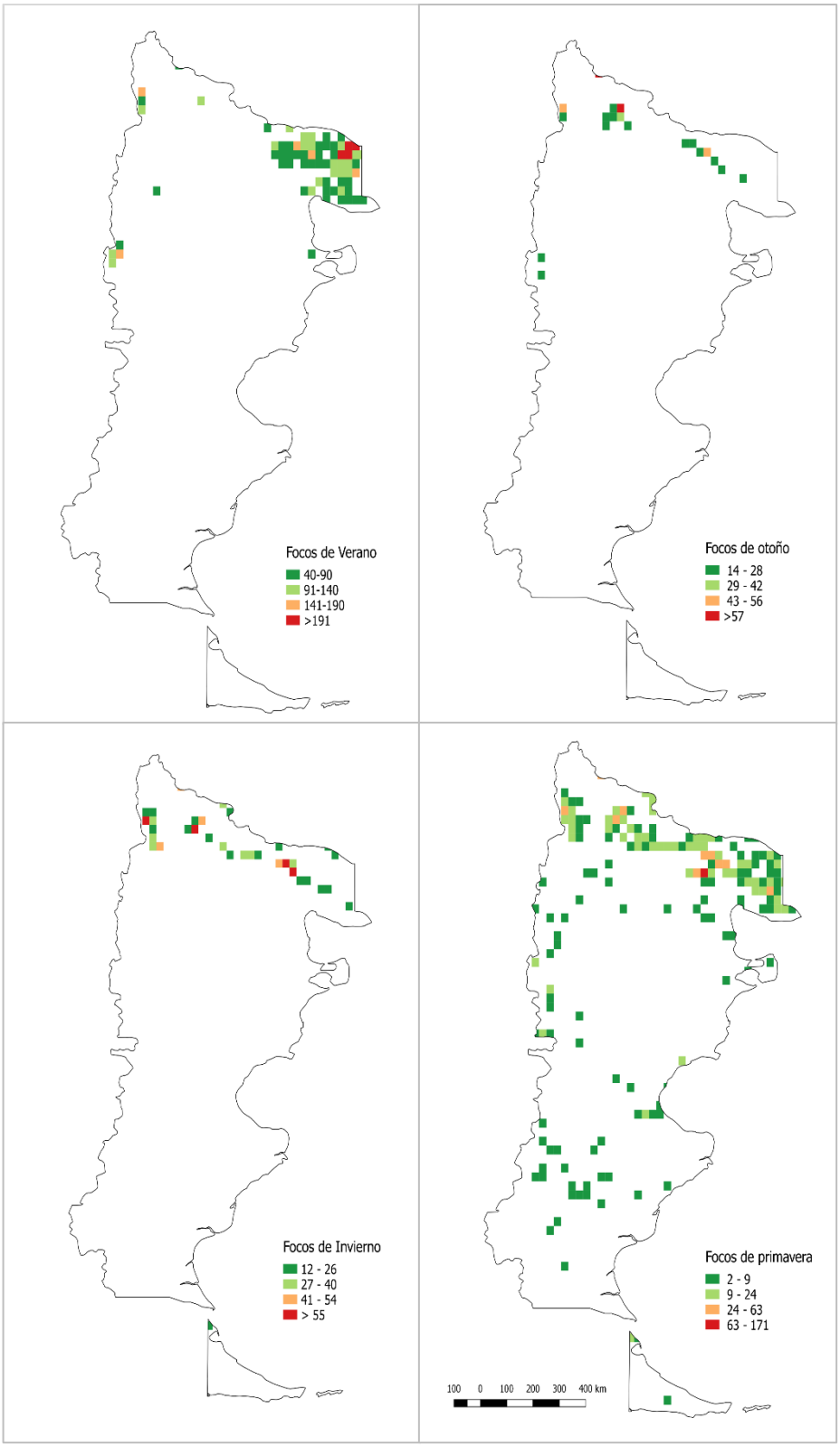


Figura 8 Distribución espacio-temporal de los focos de calor para las distintas estaciones de año.

CARACTERIZACION DE LOS INCENDIOS EN CHOLILA OCURRIDOS EN EL AÑO 2015

Al noroeste de la Figura 7 puede observarse una concentración de focos de calor detectados, esta región corresponde a la localidad de Cholila, en la provincia de Chubut. Esta localidad se vio afectada por un incendio durante los meses de febrero, marzo y abril del año 2015. El mismo fue el más grande de la historia argentina (*Rebozzio*, 2015). En la Figura 9 podemos ver el progreso de dicho incendio, detectado el 15 de febrero (punto 1). La mayor cantidad de focos se detectó el 23 de febrero, con un total de 71 (punto 2); el 28 de marzo se detecta un único foco (punto 3), cuando el incendio se consideró controlado, dándose por finalizado el 6 de abril, habiendo abarcado unas 41.000 hectáreas.

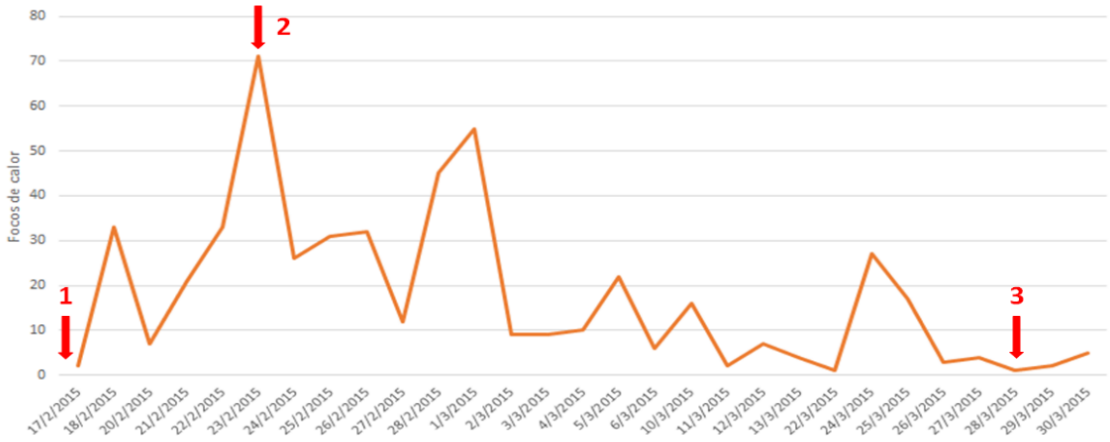


Figura 9 Progreso de los focos de calor en la localidad de Cholila. 1) Detección del incendio (17 de enero). 2) Máximo número de focos detectados (23 de febrero) 3) Fin del incendio (28 de marzo). Los días faltantes corresponden a falta de datos

Según el Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (*CREAN*), la zona afectada se encontraba, al momento del incendio, en un estado de sequía entre incipiente y moderado teniendo en cuenta el *ISP* (*índice estandarizado de precipitaciones*) y en estado de sequía moderada según el *PDSI* (*índice de sequía de Palmer*), lo cual implica un alto riesgo de ocurrencia de incendios en este tipo de ambientes. Esto lo confirma INTA Chubut (2018), que no sólo detectó una gran anomalía de precipitaciones durante este año, sino que a su vez identificó que las precipitaciones medias anuales disminuyeron drásticamente a partir del 2007 en toda la región circundante a Cholila, donde el promedio histórico registra 877 mm, no superando en el período 2011-2018 los 421mm. En esta región de la provincia de Chubut, las precipitaciones se reducen drásticamente hasta los 400 mm anuales (a pocos kilómetros al oeste, cerca de la frontera internacional con Chile las mismas pueden alcanzar los 3000 mm), con un régimen mediterráneo con una marcada estación seca entre los meses de octubre y marzo; a su vez se trata de una región muy ventosa, cuyos vientos estivales se asocian a una disminución de la humedad relativa, aumentando los riesgos de ignición y propagación del fuego (*Díaz*, 2014)

En la Figura podemos ver una mayor concentración de focos en la región circundante del pueblo de Cholila. Esto mismo se verifica en la Figura 11, donde puede observarse los focos de calor y el área quemada. Ambos productos se superponen con excepción de la región quemada que se encuentra hacia el noreste, más alejada del pueblo homónimo a la localidad; esto puede deberse, entre otros factores a que los focos de calor ocurrieron en horas en que los sensores, dada su resolución temporal, no lograron detectarlos; también la presencia de nubes, o más probablemente humo, que afectan la detección de focos de calor activos (*Alonso y Merino de Miguel*, 2009; *Justice et al.*, 2002).

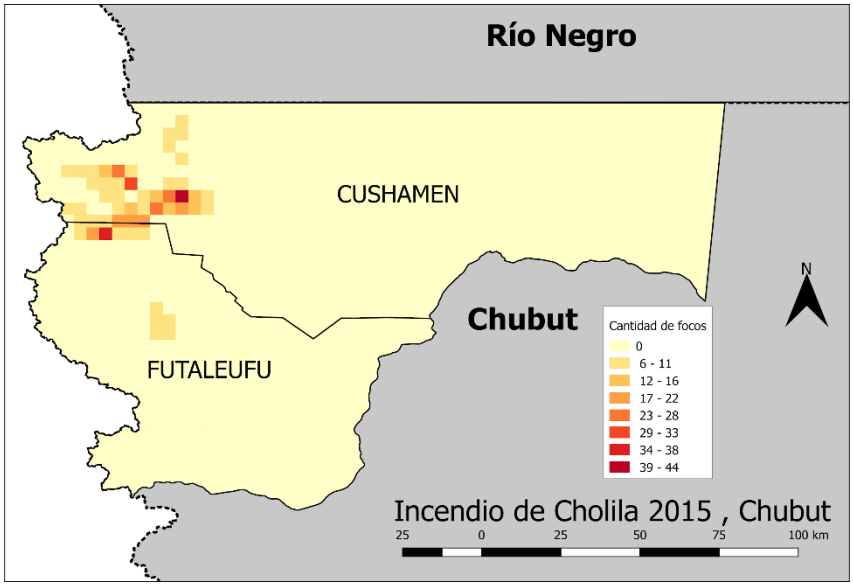


Figura 10 Grilla de densidad de focos detectados en el incendio de Cholila, 2015.

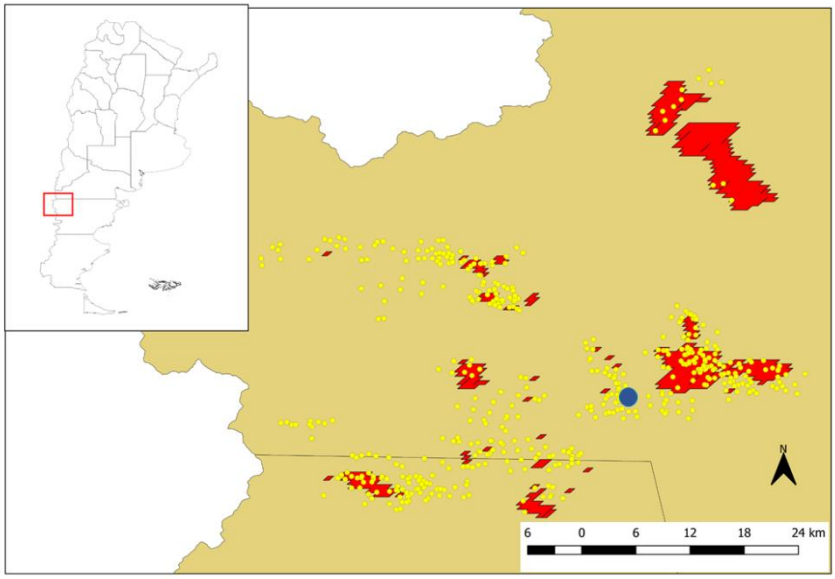


Figura 10 Detección de focos de calor correspondientes al incendio de Cholila 2015 (puntos amarillos). En rojo se representa el área quemada (MCD45A1). El pueblo de Cholila se denota con el punto azul.

A estos factores climáticos se suma que gran parte de la región presenta una cubierta de *Austrocedrus chilensis* (ciprés de la cordillera), especie que conserva por mucho tiempo las ramas secas, aumentando la cantidad de combustible disponible (*La Manna et al.*, 2011), siendo este uno de los principales motivos de la exponencialidad en el avance del fuego, que alcanzó la mayor cantidad de focos de calor detectados el día 23 de febrero. Esta cobertura boscosa se observa también en los mapas biogeográficos publicados por *Oyarzábal et al.* (2018), los bosque andino-patagónicos y su pérdida producto del fuego también se observan en los mapas generados por *Hansen et al. (2013)* que, como ya se mencionó, indica zonas donde al momento del incendio la cobertura arbórea superaba los 5 m de altura y se perdió como consecuencia de este disturbio (Figura 12). Tanto la disminución en la cantidad de focos de calor detectados, como finalmente la extinción del incendio *per se* (en el mes de abril), se asoció no sólo a las medidas de combate tomadas, sino también a la ocurrencia de lluvias a fines de marzo que disminuyeron la combustibilidad de los distintos combustibles aún presentes en el terreno (*Desarrollo Forestal*, 2015).

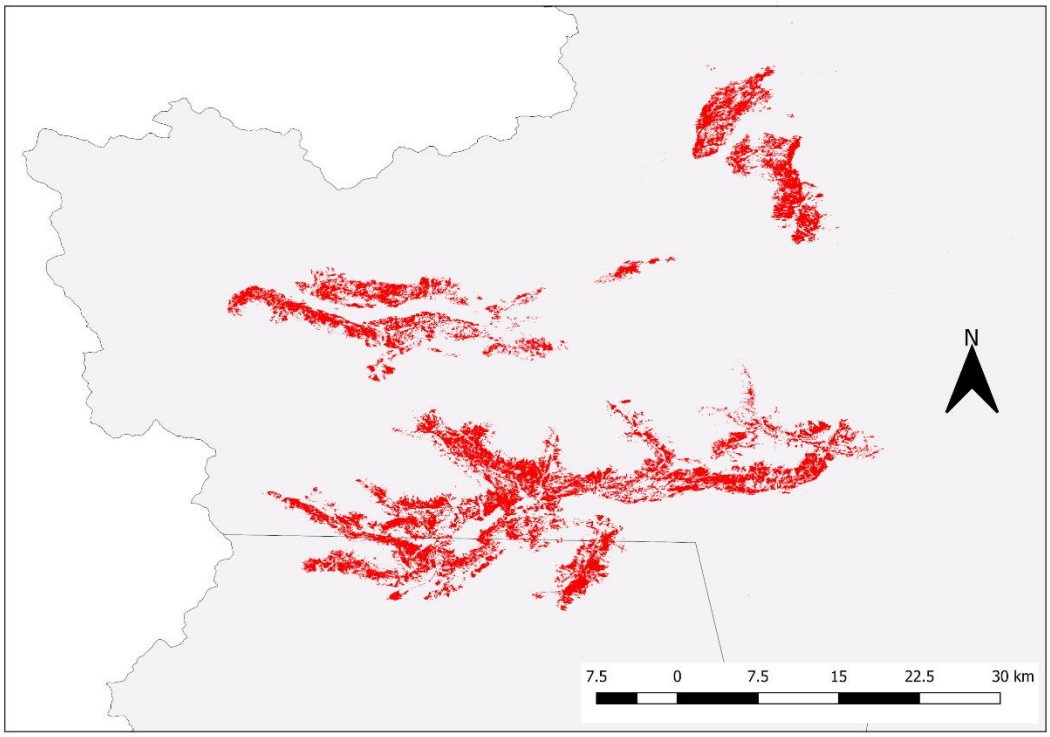


Figura 11 Zonas afectadas por el incendio donde la cobertura vegetal superaba los 5m de altura (bosque) y fue afectada por fuegos (adaptado de *Hansen et al*., 2013).

La Figura 13-a permitió evaluar los niveles de recuperación de la zona afectada por el incendio (punto promedio afectado); en la Figura 13-b se observan dos curvas correspondientes al progreso del incendio para el caso de un punto control promedio no afectado por el mismo (no incluido en el área quemada), y un punto promedio afectado por el incendio y el índice Q-IVN. En estos gráficos puede observarse el nivel de impacto que tuvo el incendio en el IVN en diferentes zonas. Previo al incendio la zona afectada presentaba un IVN más alto, asociado a una mayor cantidad de biomasa y actividad fotosintética asociada (*Gamon et al.*, 1995), el cual cayó abruptamente debido a los efectos del fuego y la

destrucción de la biomasa fotosintética. En este trabajo nos centramos en el promedio de IVN de la celda utilizada por SATVeg, pero se esperan diferencias en los niveles de recuperación para los distintos puntos afectados por el incendio. *Peña y Ulloa* (2017), encontraron que, donde las coberturas vegetales presentaban una mayor biomasa, la severidad de los incendios suele ser mayor debido la cantidad de combustible presente y la posterior regeneración de la vegetación es más lenta.

La recuperación se evalúa mediante el análisis del valor de Q-IVN. Cuando el valor del mismo en la situación post-incendio iguala al valor pre-incendio podemos considerar que hubo una recuperación total de la actividad fotosintética. Los niveles de recuperación se deben a distintos factores; entre ellos las precipitaciones y la temperatura, que influyen en la formación de biomasa, reflejada en los niveles de IVN (*Peña*, 2017). La recuperación es un proceso complejo que dependerá entre otros factores, de la severidad de los daños generados por el fuego (*Díaz Delgado et al.*, 2003), la misma puede ser evaluada por la caída del Q-IVN que en este caso fue de 0,73 (previo al incendio el Q-IVN era de 0,97 y en el día 0 desde el incendio pasó a ser de 0,24). *Díaz Delgado et al. (2003)* indica entre los factores con influencia en la propagación de fuego, no sólo a las propiedades de los combustibles, sino también la pendiente y los vientos, que en este caso pudieron haber variado entre una zona y otra del incendio, refiriéndonos a las distintas zonas afectadas en los departamentos de Cushamen y Futaleufú, y que pudieran haber influido en la intensidad del fuego en la velocidad de propagación y la severidad del mismo, traduciéndose en distintos niveles de daño y recuperación de la actividad fotosintética. Durante el período de estudio no se alcanzó la recuperación de la zona estudiada, lo cual se confirma no sólo en la Figura 13, sino también en la Figura 13. Esta figura corresponde a una regresión lineal entre el Q-IVN y el tiempo transcurrido desde el incendio y nos permitiría estimar el tiempo de regeneración de esta zona. La correlación entre ambas es muy baja, principalmente porque no se está considerando la variación en las comunidades vegetales en toda la zona afectada. La regeneración está asociada no solo a las características de la vegetación de la zona, sino también a la disminución sustancial en las precipitaciones detectadas en la zona por *INTA Chubut* (2018). Este mismo Instituto suma que se esperan precipitaciones inferiores a las normales en el futuro, con lo cual podemos suponer que la recuperación de la vegetación se verá postergada en el tiempo.

Podemos observar en la Figura 14 el patrón de severidad que tuvo este incendio en la zona afectada (dNBR). Los pixeles referenciados en violeta indican zonas donde hubo regeneración de la vegetación; esto generalmente sucede donde el incendio tuvo baja severidad y propició el rebrote, generalmente en especies herbáceas (*Key y Benson*, 2016). Se puede observar, también, el aumento de la severidad desde baja a extrema. Dichas variaciones dependen no solo de las comunidades vegetales afectadas, sino también de las condiciones geográficas y ambientales correspondientes a cada pixel (*Delegido et al.*, 2018).

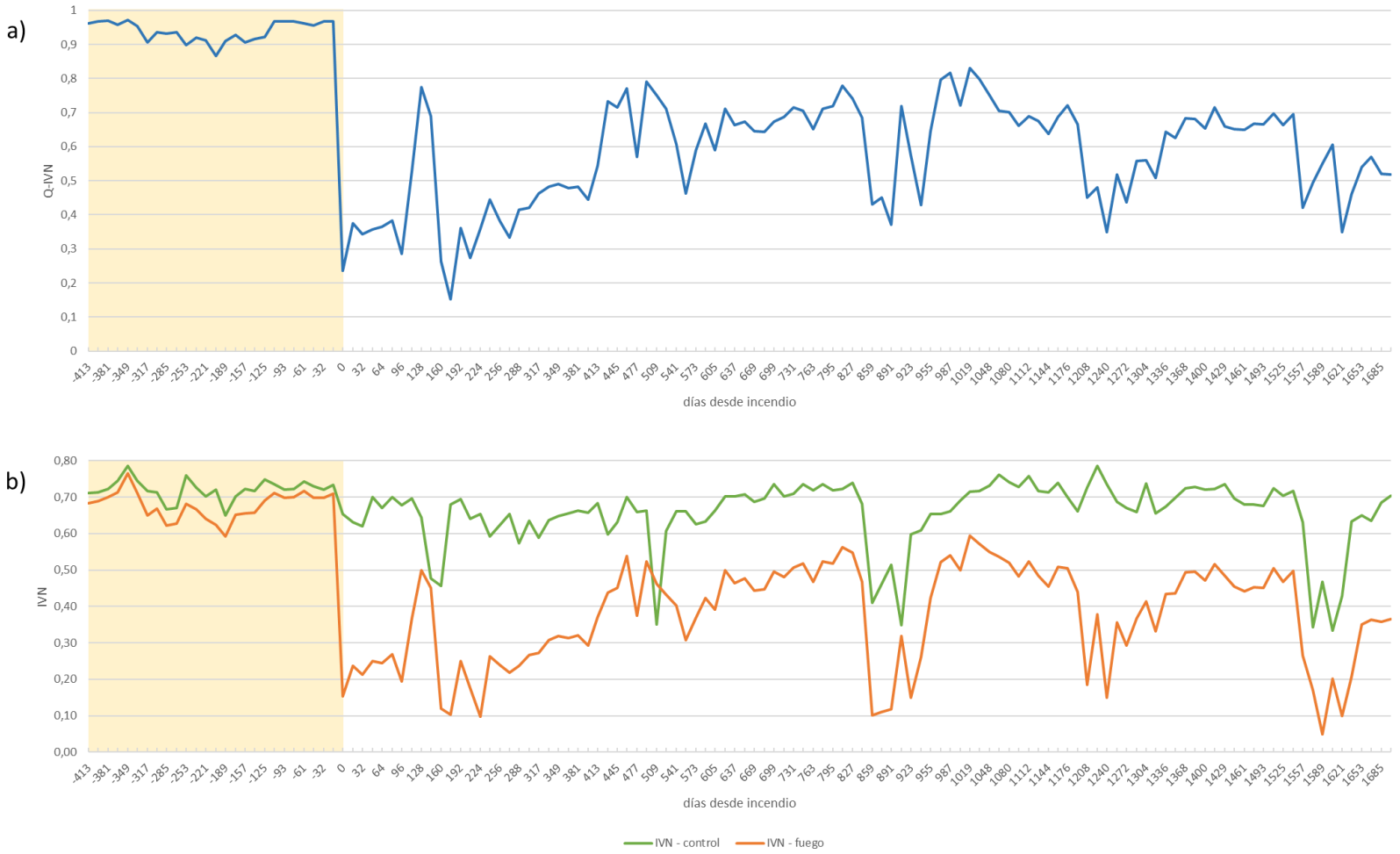


Figura 12 a) Progreso del Q-IVN calculado a partir del área afectada por el fuego y el área control. b) Progreso del IVN del área afectada por fuego y el área control, referencia no afectada por fuego. La zona sombreada indica el momento previo al incendio.

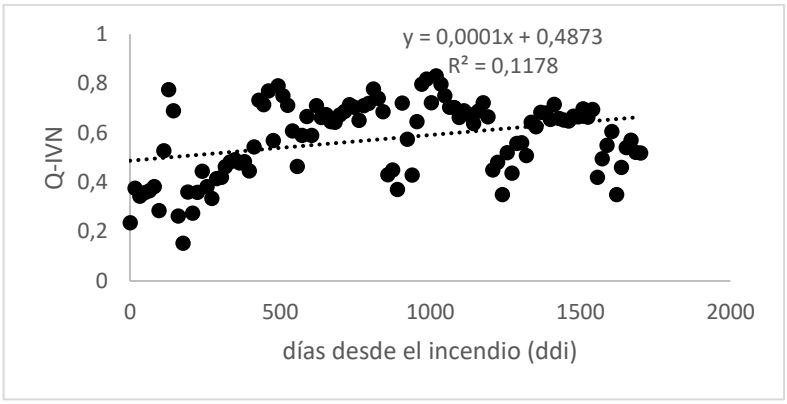


Figura 13 Regresión lineal entre Q-IVN y días desde el incendio

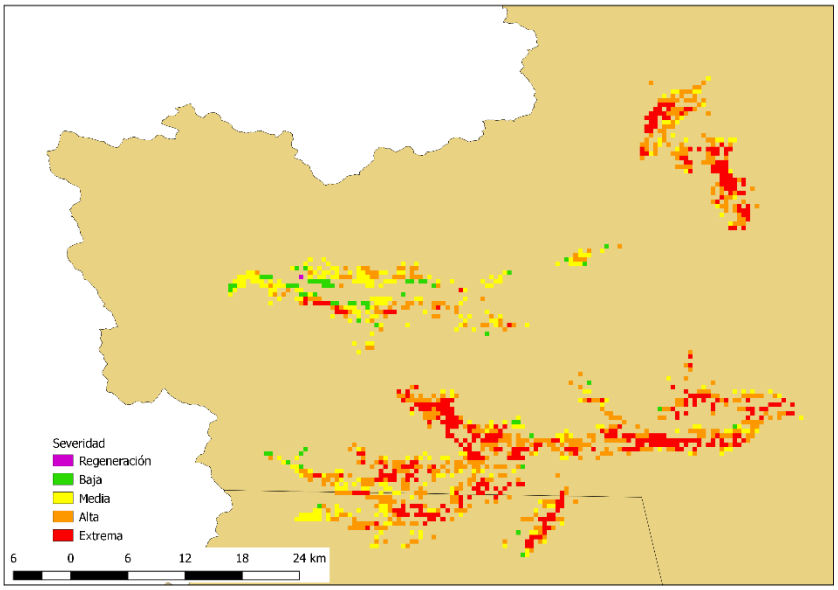


Figura 14 dNBR del incendio de Cholila

CONCLUSIONES

- Los índices y productos utilizados resultan de valor para estudiar incendios y procesos de regeneración de la vegetación.
- La cantidad de focos de calor aumenta cuando a un período con mayores precipitaciones le sigue otro de sequía.
- Distintas acciones antrópicas tienen efectos en la frecuencia y severidad de los incendios.
- La ocurrencia de incendios en la Patagonia, identificados a partir focos de calor, se concentraron en los años y meses más calurosos que son, a su vez, los más secos y ventosos.
- En la zona afectada por el incendio de Cholila en 2015 la actividad fotosintética no logró, al 2018, recuperar los niveles iniciales del periodo de estudio analizado, debido a la severidad generalizada del fenómeno.

- La regeneración y recuperación de la vegetación depende de factores climáticos y propios de la vegetación.

RECOMENDACIONES

Las herramientas SIG son muy poderosas y valiosas, aunque insuficientes y deben complementarse junto con la teledetección para generar nuevas estrategias que permitan conocer mejor cómo se desarrollan los fuegos en la Patagonia argentina y poder así accionar correctamente ante su ocurrencia, teniendo en cuenta la función ecológica de los incendios, pero también su impacto socioeconómico. Las mismas deberían continuarse en el tiempo y presentarse de una manera estandarizada, de modo que la información pueda ser provista de manera ininterrumpida, ya que, para adoptar medidas adecuadas de prevención debemos conocer, no solo por qué se producen los incendios, sino cuales son las condiciones que favorecen su propagación.

Resultaría de gran interés e importancia estudiar en mayor profundidad el clima, la topografía y comunidades vegetales para asociarlas con mayor precisión a las distintas componentes que caracterizan a los incendios.

ANEXO 1

AÑO	Chubut	Neuquen	Rio Negro	Santa Cruz	Tierra del Fuego	Total
2001	190	205	1.804	22	6	2.227
2002	74	194	796	34	3	1.101
2003	27	195	810	31	15	1.078
2004	67	184	179	46	1	477
2005	43	227	527	56	5	858
2006	29	181	263	42	6	521
2007	69	149	222	53	7	500
2008	40	146	221	70	16	493
2009	15	135	155	73	1	379
2010	38	66	122	66	3	295
2011	44	240	155	20	9	468
2012	49	206	115	47	25	442
2013	30	102	154	26	8	320
2014	13	112	213	27	5	370
2015	557	161	513	28	4	1.263
2016	216	155	1.441	36	3	1.851
2017	16	89	1.478	17	2	1.602
2018	18	95	309	20	2	444
Total	**1.535**	**2.842**	**9.477**	**714**	**121**	**14.689**

Cantidad de focos de calor detectados en cada provincia patagónica en el período 2001-2018.

ANEXO 2

AÑO	Espinal	Estepa Patagónica	Bosque Patgónico	Monte	Total
2001	122	232	47	1.826	2.227
2002	78	150	49	824	1.101
2003	235	180	7	656	1.078
2004	0	212	18	247	477
2005	75	211	32	540	858
2006	27	201	6	287	521
2007	1	177	9	313	500
2008	9	125	76	283	493
2009	0	123	38	218	379
2010	8	126	10	151	295
2011	9	211	37	211	468
2012	13	170	90	169	442
2013	10	86	23	201	320
2014	55	61	52	202	370
2015	118	127	610	408	1.263
2016	481	181	103	1.086	1.851
2017	150	81	16	1.355	1.602
2018	42	95	16	291	444
Total	**1.433**	**2.749**	**1.239**	**9.268**	**14.689**

Cantidad de focos de calor detectados en cada ecorregión patagónica en el período 2001-2018.

BIBLIOGRAFÍA

- Avellá, B., Mauricio, B., Romagnoli, S., Viñuela, M., Zunino, N. (2007) Área irrigada de la provincia de Río Negro. Caracterización socio-económica y técnico-productiva. INTA EEA Alto Valle. P 12-14
- Barros, V. (2015). Estudio de los cambios climáticos observados en el clima presente y proyectados a futuro en la República Argentina (Presentación). Comunicación Nacional de la República Argentina en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático.
- Blackhall, M., Raffaele, E., Veblen, T.T. (2015). Efectos combinados del fuego y el ganado en matorrales y bosques del noroeste patagónico. Ecología Austral, (25):1-10
- Carabelli, F., Antequera, S. (2003) La reducción de las superficies de bosque en la región andino patagónica: análisis de algunos factores involucrados. Reporter Emergency News Agency. p 1-3
- Chuvieco, E., Opazo, S., Sione, W., Del Valle, H., Anaya, J., Di Bella, C. M., Cruz, I., Manzo, L., López, G., Mari, N., González Alonso, F., Morelli, F., Setzer, A., Csiszar, I., Kanpandegi, J.A., Bastarrika, A., Libonati, R. (2008). Global burned-land estimation in Latin Ameri causing MODIS composite data. Ecological Applications, 18 (1): 64-79
- Cingolani, A., Noy-Meir, I., Reinison, D.D., Cabido, M. (2008). M. La ganadería extensiva, ¿es compatible con la conservación de la biodiversidad y de los suelos? Ecología Austral 18(3): 253-271
- Colombani, E.N. (27/02/2019). Precipitaciones en la provincia de Chubut durante el año 2018 (Informe de divulgación). INTA E.E.A. Chubut
- Delegido, J., Pezzola, A., Casella, A.A., Winschel, C., Urrego, P., Jimenez-Muñoz, J.C., Sobrino, J., Soria Barres, G., Moreno, J. (2018). Estimación del grado de severidad de incendios en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, usando Sentinel-2 y su comparación con Landsat-8. Revista de Teledetección. 47
- Desconocido (marzo 2003). Los incendios en Cholila y Lago Puelo "están controlados"; se espera que el fuego se extinga en abril. Desarrollo Forestal. Recuperado de www.maderamen.com.ar/desarrollo-forestal/wp-content/uploads/sites/2/2017/07/ForMarzo15-baja.pdf el 18/05/2019
- Di Bella, C.M., Fischer, M.A., Jobbágy, E.G. (2011). Fire patterns in north-eastern Argentina: Influences of climate and land use/cover. International Journal of Remote Sensing. 32. 4961-4971
- Di Bella, C.M., Posse, G., Beget, M.E., Fischer, M.A., Mari, N., Verón, S. (2008). 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): 39-41
- Díaz, A.E. (2014). Informe de impacto ambiental para la etapa de explotación de la cantera “Ardidos Cholila II” (Informe)
- Díaz-Delgado, R., Lloret, F., Pons, X. (2003). Influence of fireseverity on plant regeneration through remote sensing imagery. International Journal of Remote Sensing. (24): 1751-1763
- Embrapa (2015). Sistema de análise temporal da vegetação – SATVeg. www.satveg.cnptia.embrapa.br
- ESRI (2012). GIS for the Fire Service. ESRI. pp 6-10

● Fischer, M.A., Di Bella, C.M., Jobbágy, E.G. (2014). Influence of fuel conditions on the occurrence, propagation and duration of wildlandfires: A regionalapproach. Journal of AridEnvironments, 120: 63-71

● Gamon, J., Field, C., Goulden, M., Griffin, K., Hartley, A., Joel, G., Penuelas, J., Valentini, R. (1995). Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. Ecological Applications. (5): 28-41

● Hansen, M. C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., Townshend J. R. G. (2013). High-Resolution global maps of 21st-Century forest cover change. Science. 342: 850–53

● Herráez, D., Asensio, M., Ferragut, L., Cascón, J., Rodríguez, A. (2017). A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model. International Journal of Geographical Information Science. 31(11): 2142-2163

● Holz, A., Veblen, T. (2011). The amplifyingeffects of humans on fireregimes in temperate rain forests in Western Patagonia. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 311(1-2): 82

● Justice, C.O; Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J.T., Roy,D., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F., Kaufman, Y. (2002). The MODIS fire products. Remote Sensing of Environment. (82):244-262

● Kaufman, Y.J., Justice, C.O., Flynn, L.P., Kendall, J.D., Prins, E.M., Giglio, L., Ward, D.E., Menzel, P., Setzer, A.W. (1998). Potential global fire monitoring from EOS-MODIS Journal of Geophysical Research Atmospheres, 107 (D24): 32215-32238

● Key, C., Benson, N. (2006). FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service (51): LA1-LA48

● Kunst, C.R. (2017). Fuegos en la vegetación: ¿Problema policial o problema ecológico? INTA EEA Santiago del Estero

● La Manna, L., Barroetaveña, C. (2011). Propiedades químicas del suelo en bosques de *Nothofagusantarctica* y *Austrocedruschilensis* afectados por fuego. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. (43): 41-55

● Lini, R.M. (2008). Evaluación del avance del desmonte para uso agrícola en el noreste rionegrino mediante la utilización de sistemas de información geográfica (Informe). Servicio forestal zonas áridas, Dirección de Bosques, Ministerio de Producción, Provincia de Río Negro

● Maier, S. W., Russell-Smith, J., Edwards, A. C., Yates, C. (2013). Sensitivity of the MODIS firedetectionalgorithm (MOD14) in the savannaregion of the NorthernTerritory, Australia. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. (76): 11–16

● Mari, N., Di Bella, C.M., Fischer, M.A., Ferrer, F., Kanpandegi, J.A. (2007). TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional. Buenos Aires. Ed. Martin

● Meng, R., Dennison, P.E., D'Antonio, C.M., Moritz, M.A. (2015). Effects of fire severity and post-fire climate on short-term vegetation recovery of mixed-conifer and red fir forests in the Sierra Nevada Mountains of California. Remote Sensing of Environment 171: 311-325

● Miller, J., Thode, A. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (RdNBR). Remote Sensing of Environment. 109. 66-80.

● Mundo, I., Villalba, R., Veblen, T., Kitzberger, T., Holz, A., Paritsis, J., Ripalta, A. (2017). Firehistory in southern Patagonia: Human and climate influences on fireactivity in *Nothofagus pumilio*forests. Ecosphere. 8: (9)

● Oficina de Riesgo Agropecuario (2018). Informe de precipitación y temperatura. Disponible en http://www.ora.gov.ar

● Oyarzabal, M., Clavijo, J., Oakley, L., Biganzoli, F., Tognetti, P., Barberis, I., Maturo, H., Aragón, R., Campanello, P., Prado Darien, Oesterheld, M., León, R. (2018). Unidades de Vegetación de la Argentina. Ecología Austral. (28): 40-63

● Paruelo, J., Beltrán, A.B., Jobbágy, E.G., Sala, O.E., Golluscio, R. (1998). The climate of Patagonia: General patterns and controls on biotic processes. Ecología Austral. (8): 85-101.

● Paruelo, J., Di Bella, C.M., Milkovic, M. (2014). Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en agronomía y ciencias ambientales. Editorial Hemisferio Sur. (9): 205-208

● Peña, M., Ulloa, J. (2017) Mapping the post-firevegetationrecovery by NDVI time series. 1-8

● Peter, G., Funk, F.A., Loydi, A., Casalini, A., Leder, C. (2012). Variación de la composición y cobertura específicas del pastizal bajo diferentes presiones de pastoreo en el Monte Rionegrino. PHYTON (Buenos Aires), (81) 233-237

● Rebozzio, A. (2/03/2015). Argentina sufre el incendio forestal más grande de su historia. El País. Recuperado de www.elpais.com/internacional/2015/03/02/actualidad/1425314539_340054.html

● Repetto, J.M. (25/09/2016) El norte de la Patagonia afronta unas de las peores sequías en 60 años. Sobre La Tierra. Recuperado de www.sobrelatierra.agro.uba.ar/el-norte-de-la-patagonia-afronta-unas-de-las-peores-sequias-en-60-anos/

● Schmidt, W. (1996). Incendios en la Patagonia II. Ficha técnica. Patagonia Forestal 2 (4): 5

● Snyder, A., Fulé P., Crouse, J. (2005). Comparison of burn severity assessment using differenced normalized burn ratio and ground data. International Journal of Wildland Fire.

● Surraco, C., Cabana, J.A. (30/05/2016) El INTA brinda asesoramiento técnico para la implantación de una pastura a escala productiva (Noticia). INTA E.E.A. Santa Cruz, Calafate, C.R. Patagonia Sur

● Viana-Soto, A., Aguado, I., Martinez, S. (2017). Assessment of post-fire vegetation recovery using fire severity and geographical data in the Mediterranean region (Spain). Environments. (4): 90

● Westerling, A., Hidalgo, H., Cayan, D., Swetnam, T. (2006). Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity. Science. 313. 940-3

● Yeung, C., Li, R. (2018). Comparison of vegetation regeneration after wildfire between Mediterranean and tundra ecosystems by using Landsat images. Annals of GIS. 24. 1-14