

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETACIONAL
AFECTADA POR INCENDIOS EN EL PARQUE NACIONAL TORRES DEL
PAINE UTILIZANDO DATOS ÓPTICO-MICROONDAS PASIVAS**

CAROLINA IVONE RIVERA VENEGAS

Santiago, Chile

2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETACIONAL
AFECTADA POR INCENDIOS EN EL PARQUE NACIONAL TORRES DEL
PAINE UTILIZANDO DATOS ÓPTICO-MICROONDAS PASIVAS**

**SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSIS OF VEGETATION BURNED BY FIRES
IN THE TORRES DEL PAINE NATIONAL PARK USING PASSIVE OPTICAL
MICROWAVE DATA**

CAROLINA IVONE RIVERA VENEGAS

Santiago, Chile

2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETACIONAL
AFECTADA POR INCENDIOS EN EL PARQUE NACIONAL TORRES DEL
PAINE UTILIZANDO DATOS ÓPTICO-MICROONDAS PASIVAS**

Memoria para optar al Título Profesional de:
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

CAROLINA IVONE RIVERA VENEGAS

Profesor Guía	Calificaciones
Sr. Cristian Mattar B. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Dr.	7,0
Profesores Evaluadores	
Sr. Miguel Castillo S. Ingeniero Forestal, Dr.	6,2
Sr. Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,7
Colaborador	
Sr. Claudio Durán T. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables.	

Santiago, Chile

2016

Dedicada a mi familia y a mis jermallones

AGRADECIMIENTOS

Al terminar este gran proceso de mi vida, sólo me queda expresar mis agradecimientos. En primer lugar, a mis padres Eliana, Miguel, mi hermano Nicolás y mi Lulú, por su infinito amor y soporte emocional, pues gracias a su esfuerzo y dedicación hoy soy una profesional.

A mi grupo querido de amigos, Javi, Clau, Calu, Sole, Danu, Emi, Maca, Tami, Uva, Iván, Cristobal y Coto, por compartir los mejores y peores momentos de la mejor etapa de mi vida. Por las traspasos de estudio por Calculo, o las entregas interminables de Hidro y Percepción, por las múltiples salidas a terreno a nuestra querida Quebrada de la Plata, por los terremotos compartidos en las fondas antumapinas y las múltiples actividades de la semana recursora. Gracias por su amistad.

A todos los miembros del Laboratorio de Análisis de la Biósfera, en especial a Claudia y Diego, por el tiempo compartido en el laboratorio y en los terrenos, sin duda, las mejores tortas del sur las compartí con ustedes. A Víctor, Luis, Dager y Claudio por su apoyo incondicional en la realización de esta memoria y a mi profesor guía Cristian Mattar por su colaboración y su vocación recursora.

Por último, gracias al proyecto Conicyt – Fondecyt Iniciación 1013059 “Estimating the Surface soil moisture at regional scale by using a synergic optical-passive microwave approach and remote sensing data” por hacer posible esta memoria.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivos	6
Objetivo General	6
Objetivos Específicos.....	6
MATERIALES Y MÉTODO	7
Área de estudio.....	7
Datos	9
Landsat	9
MODIS.....	10
SMOS.....	11
Datos meteorológicos.....	11
Datos cartográficos.....	12
Metodología	12
Estimar la tendencia del vigor y área foliar de la vegetación afectada por los incendios	12
Analizar los cambios regenerativos en la vegetación posterior a los incendios	14
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	18
Estimar la tendencia del vigor y área foliar de la vegetación afectada por los incendios	18
Máscara de vegetación	18
Análisis espacial de las tendencias mensuales de NDVI	21
Interpolación de imágenes Landsat.....	23
Estimación del área quemada.....	24
Incendio 2005.....	25
Incendio 2011-2012	29
Análisis de promedio y desviación estándar de NDVI	32
Análisis de Humedad del suelo (SMOS) y precipitaciones	33
DISCUSIÓN	35

CONCLUSIÓN.....	36
BIBLIOGRAFÍA	37
ANEXOS	44
Anexo 1: Fauna en el PNTP.....	44
Anexo 2: Principales senderos y zonas de atracción turística.....	46

Índice de Cuadros

Cuadro 1: Imágenes Landsat utilizadas, en orden cronológico.....	10
Cuadro 2: Clasificación ΔNBR	15
Cuadro 3: Reclasificación de coberturas de suelo del mapa Land Cover de ESA/CCI.....	18
Cuadro 4. Superficie de cada cobertura y porcentaje de variación entre los mapas de vegetación reclasificada de los años 2005 y 2010.	20

Índice de Figuras

Figura 1: Parque Nacional Torres del Paine y su ubicación en el territorio Nacional.	9
Figura 2: Estación meteorológica Torres del Paine.	11
Figura 3. Proceso metodológico para el análisis de tendencias espacio temporales de la vegetación en el PNTP.	17
Figura 4: Máscara de vegetación de ESA/CCI reclasificada en el área de estudio, donde (a) es el año 2005 y (b) el año 2010.	19
Figura 5. Máscara de vegetación reclasificada en el área de estudio.....	21
Figura 6. (a) Anomalías mensuales de NDVI y (b) Tendencia de la anomalía mensual de NDVI, durante los últimos 16 años a partir del producto MOD13A3.....	22
Figura 7. Interpolación de Delaunay en tres imágenes Landsat 7 ETM+ correspondiente a los días 13 de febrero del 2014, 5 de abril del 2015 y 1 de diciembre de 2015 (de arriba hacia abajo, respectivamente).	23
Figura 8. Imagen del Parque Nacional Torres del Paine (límite en negro) con las áreas afectadas por incendio del año 2005 (verde) y 2011/2012 (rojo).	24
Figura 9. Imagen falso color del área afectada por incendio en el año 2005. (A) Corresponde al 20 de Agosto de 2004, (B) al 28 de Febrero del 2005 y (C) al 1 de Mayo de 2016.....	25
Figura 10. Imagen de ΔNBR , donde (A) índice entre los años 2004 y 2005, y (B) índice entre los años 2004 y 2016.....	26
Figura 11. Superficie afectada según nivel de severidad, para las coberturas de vegetación indicadas, en el incendio del año 2005. Nótese las diferencias de escalas en el eje y.	28
Figura 12. Imagen falso color del área afectada por incendio en el año 2011. (A)	

Corresponde al año 2011, (B) al año 2013 y (C) al año 2015. En la figura C se aprecia un importante efecto de sombra debido a la hora de paso del sensor L8.....	29
Figura 13. Imagen de ΔNBR , donde (A) índice entre los años 2011 y 2013, y (B) índice entre los años 2011 y 2016.....	30
Figura 14. Superficie afectada según nivel de severidad, para las coberturas de vegetación indicadas, en el incendio del año 2011. Nótese las diferencias de escalas en el eje y.	31
Figura 15. Serie temporal de NDVI y desviación estándar en el área afectada por el incendio del 2011 a partir de imágenes Landsat.	33
Figura 16. Análisis de Humedad de suelo y precipitaciones para el incendio del año 2011/2012.....	34

RESUMEN

El Parque Nacional Torres del Paine (PNTTP) se caracteriza por ser un área geográfica representativa de los ecosistemas del mundo, al contener una alta belleza paisajística y amplia diversidad de ecosistemas. Estas características han transformado al parque en una atracción turística de alta demanda, lo que junto a las características ambientales del lugar (e.g. humedad del suelo, viento y precipitación), han convertido a esta área en un escenario óptimo para la generación de incendios. Tres de los incendios más importantes ocurrieron en los años 1985, 2005 y 2011/2012 transformando las condiciones naturales del parque. El objetivo de este trabajo es analizar las tendencias espacio temporales de la vegetación en el PNTTP mediante el uso de imágenes remotas de la plataforma Landsat, del sensor “Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer” (MODIS), correspondientes al producto MOD13A3, los mapas de cobertura de superficie Global Land Cover Maps del ESA/CCI del año 2000, 2005 y 2010 y el mapa de cobertura de suelo de Chile continental de Zhao *et al.* (2016). Además, se utilizaron los productos de “Soil moisture and ocean salinity” (SMOS), y datos meteorológicos de la Estación Torres del Paine para analizar las condiciones ambientales que presentó el parque mientras ocurría el incendio del año 2011/2012, para determinar las condiciones de peligro y propagación de un incendio. Para determinar la magnitud de los cambios de la vegetación afectada por incendio del PNTTP se realizó un análisis no paramétrico de la tendencia del índice “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) de MODIS en el periodo 2002-2016. El vigor de la vegetación del PNTTP no ha variado significativamente los últimos 16 años, sólo ocurre una disminución estacional para los periodos de incendios (2005 y 2011/2012) y posterior a los incendios existe un aumento del vigor de vegetación, que se atribuye a las precipitaciones sobre la vegetación. Para la estimación de la severidad del área quemada, se utilizó el índice “Normalized Burn Ratio” (NBR) para los incendios de los años 2005 y 2011/2012 y la variación de la severidad a través de los años. El área de vegetación afectada por el incendio del 2005 fue de 15.628 ha y la cobertura más afectada fue “Matorral”, cuyo nivel de severidad disminuyó un 93% de la superficie entre los años 2005 y 2016. En el incendio del año 2011/2012 el área de vegetación afectada fue de 16.362 ha, en donde las coberturas “Bosque” y “Matorral” fueron las más afectadas, cuyas áreas de severidad alcanzaron las 77,6 ha y 3.224 ha, respectivamente, cuyas áreas afectadas con niveles de severidad disminuyeron un 90% y un 70% en el año 2016. En el análisis del comportamiento de la humedad de suelo y la precipitación durante el incendio del año 2011/2012 se identificó que los valores de humedad disminuyeron un 67% una vez iniciado el incendio. Este trabajo sirve como una herramienta para la gestión de incendios en Chile, con la cual se puede generar una planificación para evitar que se sigan dañando paisajes nativos del país y para restaurar aquellas áreas afectadas por incendios.

Palabras clave: Parque Nacional Torres del Paine, NBR, NDVI, Humedad de suelo, área quemada.

ABSTRACT

Torres del Paine National Park (PNTP) is characterized as a representative geographical area of the world's ecosystems, containing high scenic beauty and wide variety of ecosystems. These features have transformed the park into a tourist attraction of high demand, and the environmental characteristics of the site (e.g. soil moisture, wind and precipitation) have turned this area into an optimal scenario for fire generating. Three of the major fires occurred in 1985, 2005 and 2011/2012 transforming the natural conditions of the park. The aim of this work is to analyze the spatial and temporal trends of vegetation in the PNTP using remote images from the Landsat platform, sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), corresponding to the MOD13A3 product, coverage maps surface Global Land cover Maps of ESA / CCI 2000, 2005 and 2010 and a land cover map of continental Chile by Zhao *et al.* (2016). In addition, the products of Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) and meteorological data from the Torres del Paine station were used to analyze the environmental conditions that presented the park while the fire occurred the year 2011/2012, to determine the conditions of risk and spread of fire. To determine the magnitude of the changes of vegetation affected by fire in the PNTP a nonparametric trend analysis was use with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of MODIS from 2002 to 2016. The vigor of the vegetation PNTP has not significantly changed the last 16 years, only a later seasonal decline occurs on periods of fire (2005 and 2011/2012) and after fires there is an increased force of vegetation, attributed to precipitation on vegetation. The Normalized Burn Ratio (NBR) index was used for 2005 and 2011/2012 fires to estimate the severity of the burned area. Vegetation area affected by the fire of 2005 was 15,628 hectares and the coverage with more hectares affected was "Scrub", whose level of severity decreased by 93% of the area between 2005 and 2016. In the fire of 2011/2012 vegetation area affected was 16,362 hectares, where the coverage "Forest" and "Scrub" were the most affected areas whose severity reached the 77.6 hectares and 3,224 hectares, respectively, which affected areas with levels of severity 90% and 70%. In analyzing the behavior of soil moisture and precipitation during the fire of the year 2011/2012 it was identified that humidity values decreased by 67% once the fire started. This work serves as a tool for fire management in Chile, because it's can create planning to prevent further damaging the country's native landscapes and to restore areas affected by fires.

Key words: Torres del Paine National Park, NBR, NDVI, Soil moisture, Burned area.

INTRODUCCIÓN

La Patagonia chilena se caracteriza por tener gran importancia para la biósfera, ya que es uno de los lugares en donde existe una importante reserva de vida silvestre debido a su diversidad de ecosistemas y a sus características bióticas, climáticas y geomorfológicas (Delgado et al., 2013). Es por esto que, en el año 1959 el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) crea el Parque Nacional del turismo Lago Grey (Decreto N° 383/1959), el cual luego se amplió y denominó Parque Nacional Torres del Paine (PNTP), con el fin de proteger los ecosistemas existentes dentro de éste (Decreto N° 1050/1962). Este parque fue declarado como Reserva de la Biósfera en 1978 por la mesa directiva del Consejo Internacional de Coordinación del Programa sobre el hombre y la Biosfera de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura (UNESCO) por ser un área geográfica representativa de los ecosistemas del mundo, por su belleza paisajística y por su diversidad de ecosistemas (UNESCO, 2015).

El PNTP cuenta con una alta heterogeneidad de paisajes en los cuales se insertan múltiples ríos, lagunas, glaciares, entre otros (Salinas, 2011; Pisano, 1974). En estas coberturas existe una alta diversidad de especies de plantas vasculares y de fauna relacionadas con los ecosistemas templados australes (Iriarte et al., 1991; Vidal, 2007). Por ejemplo, se han registrado alrededor de 130 especies de aves y 25 especies de mamíferos, 6 de reptiles, 3 de anfibios y 6 de peces (Vidal 2007; Salinas, 2011). La distribución vegetacional del PNTP también es basta y cuenta con 450 especies de flora, de las cuales 85 son especies introducidas (Domínguez et al., 2006; Vidal et al., 2015). También se han descrito las formaciones vegetacionales presentes, las cuales son: Matorral pre-andino, Bosque magallánico de hoja caduca, Estepa patagónica y Desierto andino (Gajardo, 1994; Pisano, 1974).

Las características paisajísticas y ecológicas han transformado al PNTP en una atracción con alta demanda turística, que recibió un total de 211.886 personas en el año 2015 (CONAF, 2016a), esto ha generado un gran impacto en el paisaje del parque haciéndolo susceptible a accidentes de causa antrópica, tales como incendios (Repetto y Cabello, 2015). Los incendios más importantes han acontecido en 1985, 2005 y 2011-2012 (Contreras and Irrarazabal, 2010; Mattar et al., 2012) y han transformado los ecosistemas a semi-naturales, con dominancia de especies colonizadoras post-incendio (Vidal y Bauk, 2014).

El incendio de 1985 ocurrió el 10 de febrero y se desconoce la cantidad de hectáreas que afectó¹. Sin embargo, el incendio ocurrido en el 2005 afectó la zona del desagüe de la Laguna Azul, comenzó el día 17 de febrero de 2005 y tuvo una duración de 18 días, afectando 17.138 ha (Navarro et al., 2008; Navarro et al., 2015). A su vez, el incendio ocurrido el 27 de diciembre del 2011, en la zona del Lago Grey, se propagó rápidamente

¹ Mimica, J. Consulta ciudadana OIRS, CONAF. 2016. E-mail

debido a la inaccesibilidad del lugar y a vientos superiores a los 100 km h⁻¹ con una duración 70 días. Todavía no existe un estudio acabado del área consumida, aunque la zona afectada se estimó en 18.059 ha a partir de datos derivados de teledetección (Mattar et al., 2012).

Una herramienta utilizada para la prevención, evaluación y gestión del impacto de incendios forestales es la teledetección, mediante tres fases: determinación de condiciones de peligro (antes del incendio), detección de focos activos (durante el incendio) y evaluación de daños (después del incendio) (Chuvienco, 2009). Durante la fase de determinación de las condiciones de peligro de incendio forestal se deben considerar dos factores que permiten valorar el riesgo de incendio, tales como el peligro o probabilidad de ocurrencia de incendios y la vulnerabilidad del lugar. El riesgo de incendio se define como el producto entre la ignición y la propagación, en donde la ignición considera aspectos físicos y humanos que explican el inicio del fuego y la propagación se relaciona con las condiciones que explican la expansión del fuego. La vulnerabilidad tiene relación con las características del lugar como los factores socio-económicos y ecológicos-paisajísticos. Mediante el uso de la teledetección es posible generar variables críticas para la ignición o propagación de incendios así como las zonas de mayor vulnerabilidad. Los factores que se consideran en estudios de determinación de condiciones de peligro son diversos, tales como la humedad del suelo, el contenido de agua y las propiedades estructurales de la vegetación, la topografía del lugar, entre otras (Chuvienco, 2009). Es importante destacar que el contenido de agua de la vegetación es una variable importante en la determinación de condiciones de peligro, ya que la cantidad de agua de la planta es inversamente proporcional a su inflamabilidad (i.e. capacidad de inflamarse) y a la velocidad de propagación (Chuvienco, 2003). Este peligro de incendio puede ser complementado además por un mapa de clasificación de los combustibles naturales según su inflamabilidad, los cuales constituyen la base para la realización de modelos predictivos de propagación y comportamiento del incendio forestal. Este tipo de información es útil para la entrega de cartografías de riesgo de incendio de un ecosistema, además de seleccionar las especies para reforestación, disminuyendo el peligro de incendios (Dimitrakopoulos y Papaioannou, 2001; Ceccato et al., 2003; Chuvienco, 2003).

Para la detección de focos activos la teledetección juega un rol fundamental ya que permite identificar las anomalías térmicas en el territorio donde están ocurriendo incendios, lo cual es crítico para adquirir una visión global con el fin de caracterizar los regímenes estacionales de los incendios del mundo (Csiszar et al., 2005; Chuvienco et al., 2008; Dwyer et al., 2000; Korontzi et al., 2006).

Finalmente, la evaluación de daños producto de un incendio, consiste en determinar los cambios que se hayan producido en el territorio como consecuencia del fuego, los que dependerán de la intensidad y severidad del incendio, así como de las condiciones del territorio en el momento en el cual se inicia el siniestro. Con la teledetección se pueden analizar los impactos a escala regional y global, mediante cartografías de las áreas quemadas y evaluar los daños y establecer condiciones potenciales de regeneración (Chuvienco, 2009; Cocke et al., 2005; Ruescas et al., 2010). En este contexto, la Agencia

Espacial Europea (ESA) y la Agencia Espacial Francesa (CNES) crean, en el año 1999, la Carta Internacional sobre el Espacio y las Grandes Catástrofes en el año 1999. Posteriormente, se sumaron diversos países como Estados Unidos, Canadá, Japón, Alemania, Noruega, entre otros, con la finalidad de proporcionar un sistema unificado de adquisición y entrega de datos espaciales relacionados con catástrofes naturales o antropogénicas. Esta organización genera una evaluación de daño y monitoreo de incendios forestales, ya que existen algunos sensores capaces de captar calor, humo y la tierra quemada, mediante sensores de infrarrojo (ESA, 2010). Este tipo de mapas están disponibles en el corto plazo (i.e. par de horas), lo que permite predecir la trayectoria que un incendio, generar evaluaciones de riesgo para prevenir la ignición y propagación de incendios (ESA, 2010).

Un índice utilizado para la gestión de incendios principalmente en la evaluación de daños es el “Normalized Burned Ratio” (NBR), que provee medidas de severidad del daño del incendio, entendida como el grado de cambio ambiental producido por el fuego en el paisaje afectado. Los resultados del NBR corresponden a cambios físicos y químicos del suelo, conversión de la vegetación y de combustibles en carbono inorgánico y transformaciones estructurales y composicionales que producen nuevos microclimas y nuevas relaciones entre especies (Key y Benson, 1999; Key y Benson, 2006). Este índice ha sido utilizado en diversas investigaciones relacionadas a la gestión del impacto del fuego, tales como Mattar et al. (2012) y Navarro et al. (2008), en el Parque Nacional Torres del Paine, Veraverbeke et al. (2010) en Grecia, Miller y Thode (2007) en California, Estados Unidos, Cocke et al. (2005) en Arizona, Estados Unidos, Miller y Yool (2002) en Nuevo Mexico, Estados Unidos, Brewer et al. (2005) en Montana, Estados Unidos y Escuin et al. (2008) en el sur de España.

Como información adicional de la cobertura terrestre utilizada en la cuantificación de los impactos de incendios, se encuentran los índices de vigor y de área foliar (Chuvieco et al., 2004; Serbin et al., 2013). Dentro de estos, están “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) y el Índice de Área foliar (LAI), que se utilizan para evaluar la recuperación de la vegetación después de la ocurrencia de un incendio (Chuvieco et al., 2004; Lanorte et al., 2014; De Angelis et al., 2012; Mattar et al., 2016).

Existen diferentes fuentes de datos adquiridos por sensores remotos que pueden ayudar a la creación de cartografías de combustibilidad, como lo son Landsat y MODIS. Landsat es un satélite de observación terrestre que se caracteriza por tener la colección de información remota de la Tierra más larga a escala temporal, entregando una colección de productos de resolución espacial media con píxeles de 30m, cuya información es utilizada para investigaciones de cambios en la Tierra, y al monitoreo ambiental (USGS, 2015a). Por otra parte, el programa “Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer” (MODIS), es un sensor a bordo de los satélites Aqua y Terra, que otorga datos con resolución espacial de 250m, 500m y 1000m (LPDAAC, 2015). Además de estos avances, el lanzamiento de la misión “Soil Moisture Ocean Salinity” (SMOS) ha generado una nueva capa de información, útil para el estudio de los incendios mediante teledetección, con el uso de los productos de humedad del suelo derivados de SMOS (Kerr et al., 2010; Kerr et al., 2012).

Estos productos de agua del suelo a nivel diario, así como datos complementarios entregados por sensores ópticos como el programa Landsat y MODIS, ha sido utilizados en otras partes del mundo para el monitoreo y la generación de información sobre cartografía de combustibilidad y contenido de humedad (Mattar et al., 2016; Piles et al., 2011). Sin embargo, el uso sinérgico de estos productos satelitales no han sido analizados sobre los incendios que han ocurrido en el PNTP y más todavía, sobre la aplicabilidad que pueden tener los productos de humedad del suelo en el monitoreo de la vegetación post-incendio. Por lo tanto, el principal impacto de esta memoria es analizar los cambios en la vegetación del PNTP a partir de datos óptico-microondas pasivos para los dos incendios que han afectado significativamente la cobertura de vegetación el PNTP.

Objetivos

Objetivo General

Analizar las tendencias espacio temporales de la vegetación en el Parque Nacional Torres del Paine.

Objetivos Específicos

Estimar la tendencia en la cobertura vegetal afectada por los incendios.
Analizar los cambios regenerativos en la vegetación posterior a los incendios.

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio

El PNTP pertenece a la Comuna Torres del Paine, Provincia Última Esperanza, Región de Magallanes y la Antártica chilena, Chile (BCN, 2013). Se ubica entre las latitudes 49° 21' y 51°08' y las longitudes 73°07' y 74°, tiene una superficie de 240.532 ha² y su elevación varía entre los 100 y 2500 m.s.n.m. (Pisano, 1974; Decreto N° 1050/1962) (Figura 1). De acuerdo a la clasificación climática de Köppen-Geiger, existen dos climas dentro del PNTP, tundra, con una variación de temperatura máxima entre los 0°C y 10° C, y clima de estepa árido, con una precipitación media anual de 180 mm/año y una temperatura media anual de 18°C (Kottek et al., 2006).

La distribución vegetal está fuertemente influenciada por las precipitaciones, existiendo diversas formaciones vegetacionales, tales como Matorral pre-andino, presente en las llanuras y mesetas, con vegetación adaptada a la escasez hídrica (Gajardo, 1994), presentando asociaciones de matorral xerófito pre-andino (*Mulinetum spinosum*), asociación de matorral mesófito pre-andino (*Escallonietum rubrum*) y asociación de disclimax nano-arbustivo (*Pernettyetum mucronatum*) (Pisano, 1974) (SIIT, 2015). Otra de las coberturas es el bosque magallánico de hoja caduca, el cual aparece en lugares con aumentos adiabáticos de las precipitaciones y condiciones orográficas-geológicas que generan suelos forestales, lo que permite una predominancia de especies arbustivas, siendo *Nothofagus pumilio* (Lenga) la especie dominante (Pisano, 1974, Gajardo, 1994). El bosque de Lenga también puede estar presente en un bosque mixto, conformado por *Nothofagus pumilio* y *Nothofagus betuloides* (Coihue de Magallanes) (Pisano, 1974) así como *Pilgerodendron uviferum* (Cipres de las Guaitecas) y el *Nothofagus antártica* (Ñirre) (SIIT, 2015). Otra de las coberturas vegetacionales que se encuentra en el PNTP es la estepa Patagónica, con vegetación de estepa fría (Gajardo, 1994), que cubre llanuras y terrenos mesiformes, con clima de estepa frío, conformada por gramíneas perennes de altura media a baja con crecimiento en forma de champa (Pisano, 1974). Finalmente, otra cobertura del suelo es el desierto andino, cuyas condiciones climáticas determinadas por la altitud, generan que la vegetación sea carente de árboles y arbustos altos y este compuesta por hierbas perennes (Pisano, 1974). En este contexto es importante mencionar que en el PNTP existe un total de 85 especies (21 familias) de flora introducidas, cuyas familias más representadas son *Poaceae*, *Asteraceae* y *Caryophyllaceae* (Domínguez et al., 2006).

La fauna está asociada a los ecosistemas descritos anteriormente, siendo más diversa en humedales, matorral y bosques, en comparación con ambientes de desierto andino y de glaciares. Algunas especies de aves presentes son *Chloephaga rubidiceps* (Canquén colorado), *Coscoraba coscoraba* (Cisne coscoroba), *Pterocnemia pennata* (Ñandú), entre

² En el Decreto N°1050/1962 se indica que el área del parque es de 24.532ha

otros. Algunas especies de mamíferos son *Hippocamelus bisulcus* (huemul), *Puma concolor* (Puma), *Galictis cuja* (Quique), *Pseudalopex culpaeus* (Zorro culpeo), entre otros. Entre los anfibios y reptiles se encuentran las especies *Liolaemus magallanicus* (Lagartija magallánica), *Diplolaemus darwini* (Cabezón de Darwin) y *Pleurodema bufonina* (Sapo de cuatro ojos del sur) Finalmente, las especies presentes de peces son *Aplochiton taenianus* (Peladilla) y *Galaxias maculatus* (Puye). De dichas especies, varias se encuentran con problemas de conservación, 7 en peligro de extinción, 11 en estado vulnerable, 9 raras y 9 poco conocidas (CONAF, 2007). La mayoría de las especies son nativas, endémicas de la zona geográfica austral y de Chile, sin embargo, existen algunas especies exóticas presentes como *Lepus capensis* (Liebre) y ganado bovino, que ingresa de manera temporal al parque (CONAF, 2007). En el Anexo 1 se encuentra un resumen de la fauna del PNTP.

Debido a todo lo anterior, el PNTP se ha transformado en una atracción con alta demanda turística, no sólo por sus paisajes, sino que también por todas las actividades que se pueden realizar en él. Las más importantes son las caminatas, ya que cuenta con dos famosos recorridos, uno llamado “W” que consta de 76,1 kilómetros, y que lleva ese nombre debido a la forma en la cual se ve el recorrido en el mapa. Este circuito incluye el paso por el Glaciar Grey, el ascenso al Valle del Francés y el ascenso a la base de las Torres, al este del cordón montañoso. El segundo recorrido, llamado Circuito Macizo Paine u “O”, es más desafiante que el anterior, ya que rodea todo el macizo montañoso, incluyendo el recorrido “W”. Además de estos dos circuitos, también se pueden realizar caminatas de menor dificultad como el sendero al Mirador Cuernos, a orillas del lago Nordenskjöld, sendero aledaño al salto Grande y circuitos a la Isla y al Chorrillo de los Salmones, cercanos al Lago Grey. Otra actividad turística que se lleva a cabo son recorridos en vehículos, que pueden acceder a lugares como Lago y Glaciar Grey, Salto grande, cascada del Río Paine, Lago Pehoé, y Laguna Azul, y además pueden acceder a algunos senderos cortos como el mirador Sierra del Toro, Mirador Cóndor, Sendero de la naturaleza misceláneas silvestres, mirador Ferrier y mirador Los Cuernos. Además, en el parque se puede realizar pesca deportiva con devolución, caminata en hielo, navegaciones, cabalgatas, kayak, escalada deportiva, investigación y filmaciones y fotografía (CONAF, 2016b; 2016c; 2016d). En el Anexo 2 se detallan los principales senderos y zonas de atracción turística.

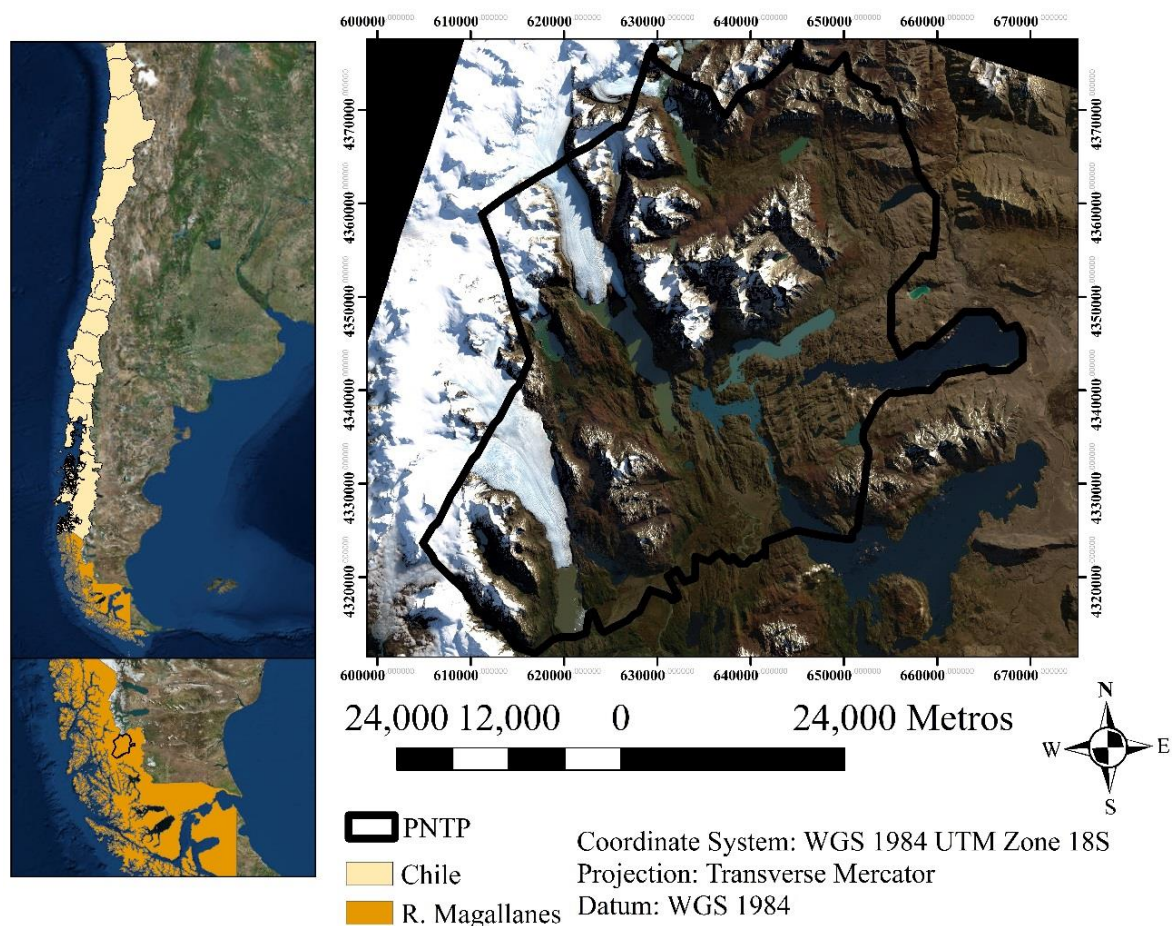


Figura 1: Parque Nacional Torres del Paine y su ubicación en el territorio Nacional.

Datos

En esta investigación se utilizaron diferentes bases de datos, dependiendo de su origen. Se utilizaron datos de teledetección obtenidos a través de diversos satélites, y por otro lado, se usaron datos meteorológicos correspondientes al periodo 2000-2016. Además, se utilizó información cartográfica provenientes de ESA/CCI (ESA, 2016), correspondiente a los años 2000, 2005 y 2010, así como una cartografía nacional reciente (Zhao et al., 2016). A continuación se detalla cada uno de los conjuntos de datos utilizados en esta memoria.

Landsat

Se utilizó información de reflectancia de superficie de Landsat-5TM, Landsat-7 ETM+ y Landsat-8OLI entre los años 2000 al 2011, 2000 al 2013 y 2013 al 2016, respectivamente. La resolución temporal de cada escena es de 16 días y la resolución espacial es de 30 m

(USGS, 2015a). Las escenas corresponden al “Path” 230 y “Row” 96, descargándose del sistema EROS “Science Processing Architecture” de USGS (ESPA, <https://espa.cr.usgs.gov/>). El producto de reflectancia de superficie es generado por el “Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System” (LEDAPS) para L5TM y L7ETM+ (USGS, 2015a; Claverie et al., 2015), y por el algoritmo de L8SR para L8OLI (USGS, 2015b).

Como criterio de selección para estas imágenes, se determinó que el área de estudio no debía estar cubierta de por más de un 50% de nubes. Las imágenes utilizadas se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Imágenes Landsat utilizadas, en orden cronológico.

ID	Características de las imágenes			
	Date	Path	Row	Cloud cover (%)
LT52300962004233COA00	20-08-2004	230	96	34,00
LE72300962005051EDC00	20-02-2005	230	96	0,11
LT52300962005059COA00	28-02-2005	230	96	27,32
LT52300962005091COA00	01-04-2005	230	96	26,86
LT52300962007257COA00	14-09-2007	230	96	18,03
LT52300962009342COA00	08-12-2009	230	96	47,27
LT52300962011284COA00	11-10-2011	230	96	23,00
LE72300962012007EDC00	07-01-2012	230	96	54,68
LE72300962012055EDC00	24-02-2012	230	96	21,63
LC82300962013353LGN00	19-12-2013	230	96	6,39
LE72300962014044ASN00	13-02-2014	230	96	23,25
LC82300962015023LGN00	23-01-2015	230	96	4,49
LE72300962015095EDC00	05-04-2015	230	96	34,42
LC82300962015103LGN00	13-04-2015	230	96	16,80
LC82300962015263LGN00	20-09-2015	230	96	15,12
LE72300962015335EDC00	01-12-2015	230	96	32,69
LC82300962016010LGN00	10-01-2016	230	96	33,33
LC82300962016122LGN00	01-05-2016	230	96	7,47

MODIS

Se utilizaron series temporales de los años 2002 a 2016 del producto MOD13A3 índices de vegetación, específicamente el “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI), que representa la diferencia entre los valores normalizados de reflectancia de las bandas Infrarrojo cercano (NIR) y Rojo (R) (Rouse et al., 1974). Estos productos presentan una resolución espacial de 1 km y una resolución temporal mensual calculados partir de la

reflectancia bidireccional de superficie que se encuentra corregida atmosféricamente. Este producto NDVI es desarrollado con un proceso que elimina cuerpos de agua, nubes, sombras de nubes y los efecto de aerosoles (Huete et al., 2002).

SMOS

Se utilizaron imágenes de los productos Piles et al. (2011), generados mediante un desarrollo de algoritmos de fusión de datos, para proporcionar información de la humedad del suelo a una resolución espacial de 1 km. Estas imágenes se generan a partir de los productos “Soil Moisture Level Products” provenientes de SMOC-BEC (<http://cp34-bec.cmima.csic.es/>), de resolución espacial de 43 km, para los años 2010 a 2012. El conocimiento del estado de esta variable se puede utilizar como herramienta para el manejo de incendios (SMOS-BEC Team, 2015).

Datos meteorológicos

Se utilizaron datos de precipitación mensual (mm) de los años 2011-2012 de la Estación Torres del Paine, de coordenadas $51^{\circ} 11' 03''$ S y $72^{\circ} 58' 01''$ O (Figura 2).

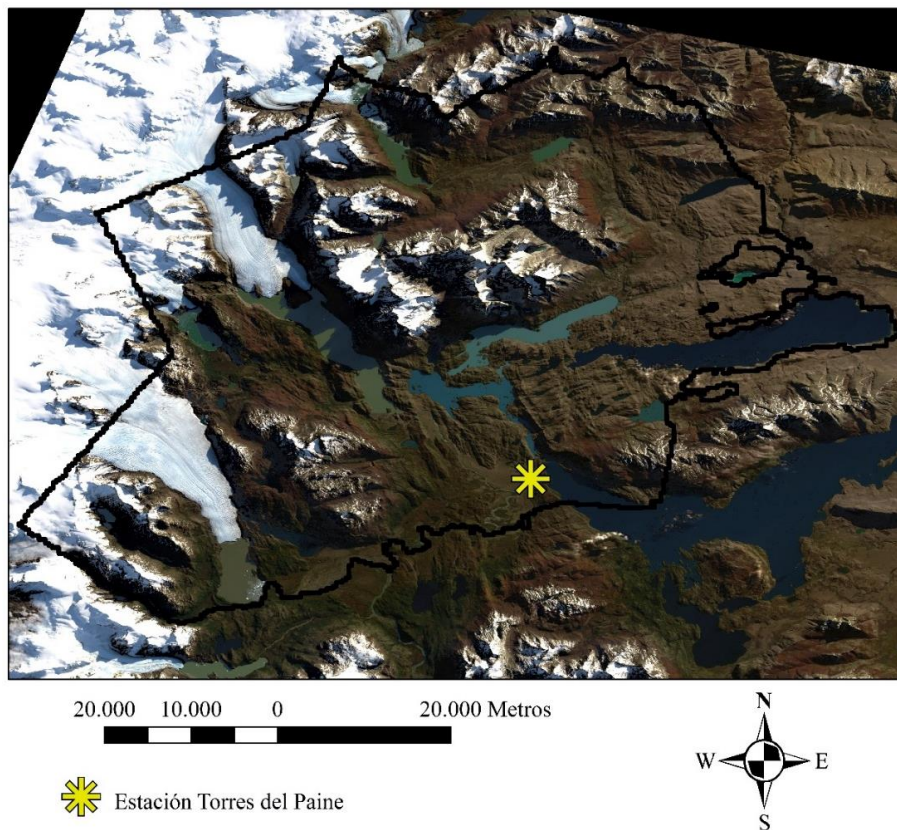


Figura 2: Estación meteorológica Torres del Paine.

Datos cartográficos

Se utilizó el mapa “Global Land Cover Maps” del ESA/CCI del año 2005 y 2010, con resolución espacial de 300 metros. Estos mapas contienen el promedio de 5 años de información cada uno (1998-2002, 2003-2007 y 2008-2012 respectivamente) y se obtuvieron del sitio < <http://www.esa-landcover-cci.org/>> (ESA, 2016). Además, se utilizó la cartografía de Zhao et al. (2016) que presenta un Land cover de Chile continental actualizado al 2014 en una resolución espacial de 30 metros. Estas dos cartografías se utilizaron para el análisis sobre los diferentes tipos de resoluciones espaciales que presentaban los datos remotos.

Metodología

Estimar la tendencia del vigor y área foliar de la vegetación afectada por los incendios

Para analizar la tendencia de la vegetación se utilizaron los productos de media mensual de NDVI de MODIS de los años 2002 a 2016. Primero se calcularon las anomalías de esta variable y luego se realizó un análisis de tendencias de los índices de vegetación.

Máscara de vegetación MODIS: Con el fin de analizar los índices de vegetación sólo en zonas con vegetación en el PNTP, se realizó una máscara del área de estudio donde sólo se incluyó la vegetación, utilizando el “Global Land Cover Maps” de ESA/CCI de los años 2005 y 2010, para todas las imágenes MODIS disponibles entre los años 2004 a 2015, excluyendo todo aquello que no corresponda a vegetación, como cuerpos de agua, glaciares, macizos montañosos, entre otros. Esta máscara fue utilizada para el cálculo de las tendencias basado en anomalías de NDVI. Además, las imágenes MODIS han sido corregidas atmosféricamente y se ha eliminado el porcentaje de cobertura de nubes.

Cálculo de anomalías: Se calcularon las anomalías de cada variable utilizando la Ecuación 1, con el fin de eliminar el efecto de la estacionalidad de las series temporales.

$$xa_i = (x_i - \bar{x}) \quad (1)$$

Donde xa_i es la anomalía de cada dato, x_i corresponde al dato mensual de los productos MODIS, y \bar{x} a la media por mes de los años de la serie de tiempo.

Estimación de la tendencia temporal de la vegetación: Para estimar la tendencia del vigor y del índice de área foliar de la vegetación se utilizó el método de Mann-Kendall (1975) y Sen’s slope (Sen, 1968). Este método es un test no paramétrico utilizado para

datos que no presentan distribución normal y no se ve afectado por la presencia de valores extremos (Sen, 1968; Gilbert, 1987). Se calculó la pendiente entre todos los pares ordenados de una dispersión de puntos mediante la Ecuación 2. En las series temporales se consideró al tiempo en el eje de las abscisas y a NDVI en el eje de las ordenadas. Luego se determinó la mediana del conjunto de datos creados (m_q), el resultado corresponde a la tendencia no paramétrica de la serie de tiempo analizada (Sen, 1968; Gilbert, 1987).

$$m_q = \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}; i < j \quad (2)$$

Donde m_q es la serie de pendientes entre todas las combinaciones de pares ordenados y q son números naturales desde 1 hasta k (Ecuación 3).

$$k = \frac{(n)(n-1)}{2} \quad (3)$$

Donde n es el número total de puntos. El cálculo de tendencias se aplicó a las anomalías generadas a partir de las variables que conciernen a los productos correspondientes. Una vez calculadas las pendientes, se estima un promedio correspondiente a la tendencia paramétrica.

Estimación de la significancia: Para estimar si existe una tendencia significativa en las series de tiempo, se utilizó el test no paramétrico propuesto por Kendall (1975), que consiste en comparar los incrementos con los decrecimientos entre pares consecutivos registrados en fechas consecutivas. En la Ecuación 4 se presenta el estadístico que representa el signo de la tendencia de la serie analizada. Un valor de t positivo indica una tendencia creciente y viceversa.

$$t = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signo}(x_j - x_i) \quad (4)$$

Donde x es el promedio de la tendencia y $\text{signo}(x)$ extrae el signo de la expresión ingresada (Ecuación 5).

$$\text{signo}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Cuando el estadístico t se calcula con más de diez datos, presenta una distribución aproximadamente normal, por lo que es posible someterlo a una prueba de hipótesis estadística, por lo que se debe calcular el estadístico z , que está en función de t y de su varianza, que se calculó con la Ecuación 6.

$$var(t) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{q=1}^g tq(tq-1)(2tq+5) \right] \quad (6)$$

Para calcular el estadístico z se utilizó la Ecuación 7.

$$z = \begin{cases} \frac{t-1}{\sqrt{var(t)}} & t > 0 \\ 0 & t = 0 \\ \frac{t+1}{\sqrt{var(t)}} & t < 0 \end{cases} \quad (7)$$

El nivel de significancia del test es de 0,05 y debido a que es del tipo bilateral, el rango de rechazo del estadístico t será de $[z_{0,025}; z_{-0,025}]$.

Analizar los cambios regenerativos en la vegetación posterior a los incendios

Para analizar los cambios regenerativos en la vegetación del PNTP se utilizó el método realizado por Mattar et al. (2012), en donde se estimaron índices de área quemada y de vegetación, antes y después de los dos últimos eventos. Para este método se usaron los productos de reflectancia de superficie de las imágenes Landsat 5-TM, Landsat 7-ETM y Landsat 8-OLI para los años 2004 a 2016, excluyendo las fechas de incendio activo (17 de febrero al 4 de marzo de 2005 y 27 de diciembre de 2011 al 7 de marzo de 2012).

Interpolación de imágenes Landsat-SLC-off: Aquellas imágenes Landsat 7 que presentaban bandeo, debido al efecto SLC-off, fueron corregidas mediante una interpolación para cubrir aquellos píxeles sin datos (Zhang et al., 2007; Pringle et al., 2009). Esta interpolación se realizó mediante una triangulación de Delaunay relacionada con estructuras generadas a partir del diagrama de Voronoi. Este método permite interpolar una imagen con ausencia de datos a partir de una triangulación basada en los datos vecinos (Alani et al., 2001; Zhang et al., 2007; Pringle et al., 2009).

Máscara de vegetación imágenes Landsat: Se utilizó la máscara de vegetación de Zhao et al. (2016), para todas las imágenes Landsat entre los años 2000 a 2016, excluyendo todo aquello que no sea vegetación, como cuerpos de agua, glaciares, macizos montañosos, entre otros. La resolución espacial de esta máscara es de 30 x 30 m y consta de las clasificaciones “Bosque”, “Cultivos”, “Pastizales”, “Matorral”, “Humedal”, “Cuerpos de agua”, “Superficies impermeables”, “Tierras desnudas”, “Hielo y nieves” y “Nubes” (Zhao et al., 2016).

Estimación del área quemada: Para identificar el área quemada de los incendios de los años 2005 y 2011-2012, se realizaron dos actividades en conjunto. Primero se utilizó una imagen falso color (bandas 7-4-2 para Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ y bandas 7-5-3 para Landsat 8OLI), entre las imágenes antes y después del incendio. Luego se estimó el área quemada mediante el análisis del índice “Normalized Burned Ratio” (NBR) (Ecuación 8) (Key y Benson 2005; Escuin et al., 2008), para obtener áreas representativas que hayan sido afectadas, caracterizar el grado de afectación de las áreas quemadas y su posterior regeneración.

$$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2} \quad (8)$$

Donde *NIR* es la banda infrarroja cercana y *SWIR2* la banda infrarrojo medio.

Luego de calculado este índice, se realizó una diferencia de NBR en el área, con escenas tomadas antes y después de cada evento, para así estimar la variación del nivel de severidad del área afectada por el incendio. Para esta diferencia se utiliza sólo una imagen tomada antes del incendio y todas las imágenes tomadas después del incendio y existirán tantos ΔNBR como imágenes post incendio existan (Ecuación 9).

$$\Delta NBR = NBR_{pre\ incendio} - NBR_{post\ incendio} \quad (9)$$

Los resultados de esta diferencia se clasifican según nivel de severidad (Cuadro 2), los cuales fueron analizados a escala temporal.

Cuadro 2: Clasificación ΔNBR .

Valor de ΔNBR	Nivel de severidad
< - 0,25	Alto crecimiento post incendio
-0,25 a -0,1	Bajo crecimiento post incendio
-0,1 a +0,1	No quemado
0,1 a 0,27	Área quemada de baja severidad
0,27 a 0,44	Área quemada de severidad media
0,44 a 0,66	Área quemada de severidad media-alta
> 0,66	Área quemada de severidad alta

Fuente: Key y Benson, 2006

Este índice utiliza las bandas NIR y SWIR2, en donde NIR decrece y SWIR2 aumenta desde el pre-incendio al post-incendio, siendo esta combinación la mejor manera de distinguir entre áreas quemadas y no quemadas. Además, identifica la magnitud del cambio ambiental causado por el fuego y los efectos producidos en las comunidades vegetativas existentes. Las áreas quemadas toman valores muy positivos o muy negativos, dependiendo

de si el fuego daña el sitio o permite que mejore la productividad de este (Key y Benson, 2006).

Media y desviación estándar de NDVI: Para complementar el estudio de las variaciones de la vegetación, se estimó la media y desviación estándar del índice NDVI para todas las imágenes y se analizaron las diferencias de las series temporales. Luego, se realizó un análisis de los resultados obtenidos del índice *NBR*, de los tres periodos en los cuales han ocurrido incendios en el PNTP, en el cual se estudió el grado de regeneración de la vegetación en las áreas afectadas por los siniestros. Adicionalmente, se analizaron las condiciones ambientales del parque en el periodo del incendio del año 2011-2012, ya que estas determinan la condición de peligro y de propagación de un incendio (Chaparro et al., 2015). Para esto se realizó una serie temporal con datos de SMOS para el incendio del año 2011-2012, mediante el uso del producto de humedad de suelo de SMOS, determinado por el método de reducción de escala de Piles et al. (2011). A partir de esta serie, se compararon los datos de precipitaciones con los datos obtenidos de humedad de suelo.

A continuación, en la Figura 3 se presenta un diagrama explicativo sobre la metodología.

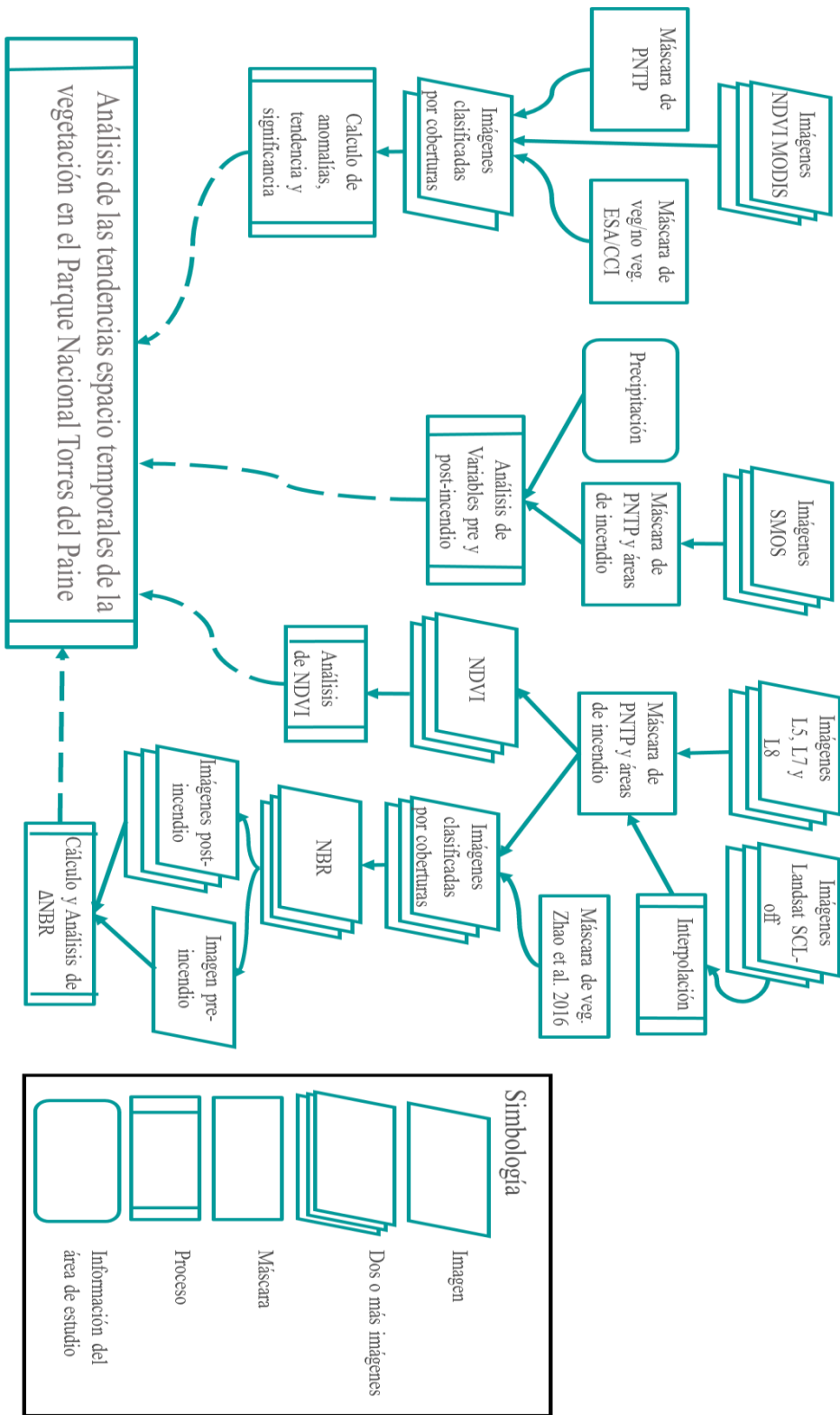


Figura 3. Proceso metodológico para el análisis de tendencias espacio temporales de la vegetación en el PNTP.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Estimar la tendencia del vigor y área foliar de la vegetación afectada por los incendios

Máscara de vegetación

Para el análisis de la vegetación se utilizaron dos tipos de máscaras, generadas con el fin de estimar el área quemada según la resolución espacial a la cual fueron creadas las coberturas de uso de suelo. Para el caso de MODIS se utilizó el mapa de cobertura de ESA/CCI el cual fue regrillado desde 300 m a 1 x 1 km, en cambio, para el caso de Landsat (5, 7 y 8), se utilizó la cartografía de Zhao et al. (2016).

Con el fin de reagrupar las categorías de clasificación de coberturas de suelo, en el Cuadro 3 se presenta la reclasificación de las Coberturas del mapa Land Cover de ESA/CCI, que considera los 20 tipos de cobertura de suelo que se encontraban en el parque y en la reclasificación se agruparon 8 tipos de cobertura.

Cuadro 3: Reclasificación de coberturas de suelo del mapa Land Cover de ESA/CCI.

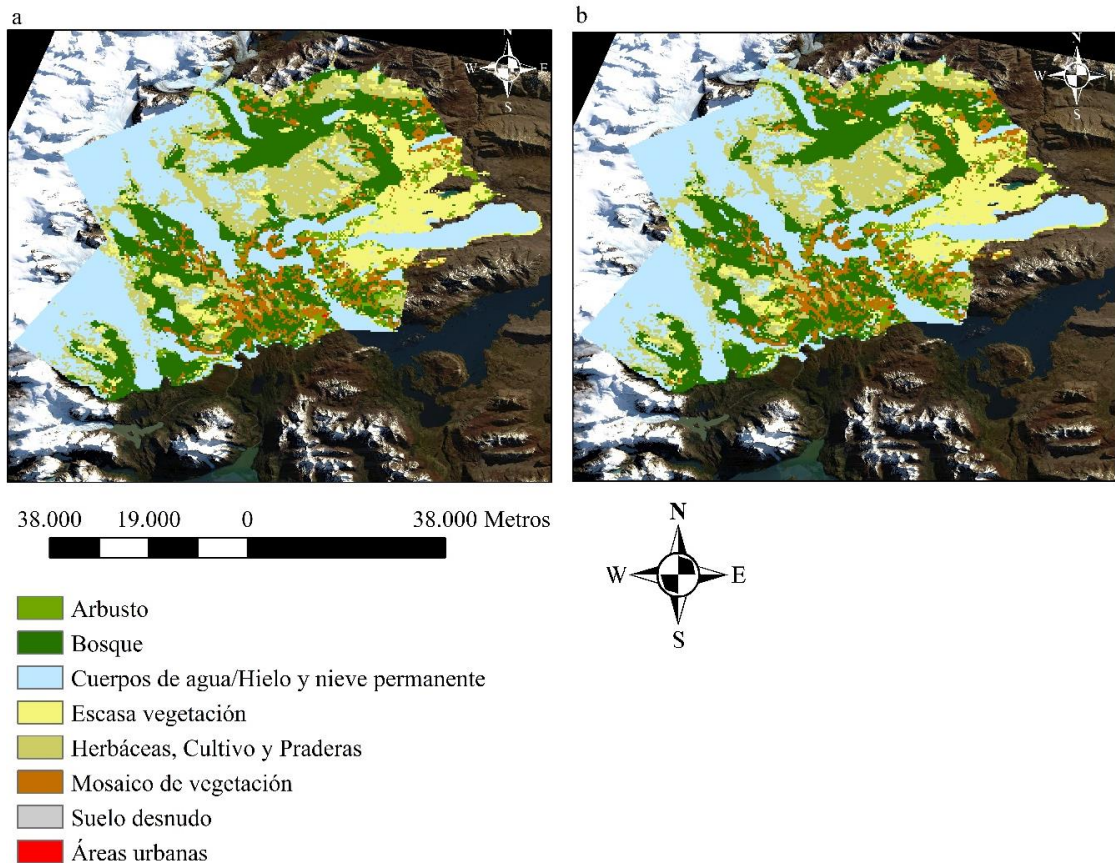
Valor	Clasificación Land cover	Reclasificación
10	Cropland	Herbáceas, Cultivo y Pradera
11	Herbaceous cover	Herbáceas, Cultivo y Pradera
30	Mosaic cropland (>50%)/natural vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<50%)	Herbáceas, Cultivo y Pradera
40	Mosaic natural vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (>50%)/ cropland (<50%)	Mosaico de vegetación
50	Tree cover, broadleaved, evergreen, close to open (>15%)	Bosque
60	Tree cover, broadleaved, deciduous, close to open (>15%)	Bosque
61	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed (>40%)	Bosque
62	Tree cover, broadleaved, deciduous, open (15-40%)	Bosque
90	Tree cover, mixed leaf type (broadleaved and needleleaved)	Bosque
100	Mosaic tree and shrub (>50%)/ herbaceous cover (<50%)	Mosaico de vegetación
110	Mosaic herbaceous cover (>50%)/tree and shrub	Mosaico de vegetación

(Continuación)

120	Shrubland	Arbusto
130	Grassland	Herbáceas, Cultivo y Pradera
150	Sparse vegetation	Escasa vegetación
153	Sparse herbaceous cover	Escasa vegetación
180	Sparse or herbaceous cover	Escasa vegetación
190	Urban areas	Áreas urbanas
200	Bare areas	Suelo desnudo
210	Water bodies	Cuerpos de agua/ Hielo y nieve permanente
220	Permanent snow and ice	Cuerpos de agua/ Hielo y nieve permanente

La Figura 4 muestra la reclasificación de los tipos de cobertura de suelo mencionada anteriormente, en una máscara del área del PNTP, según la clasificación del ESA/CCI para los años 2005 y 2010.

Figura 4: Máscara de vegetación de ESA/CCI reclasificada en el área de estudio, donde (a) es el año 2005 y (b) el año 2010.



Ambas máscaras presentan variaciones en las superficies de cada tipo de cobertura de suelo, las cuales se presentan en el Cuadro 4. Los mapas de los años 2005 (con información del año 2002 al 2007) y 2010 (con información del años 2008 al 2012), poseen un porcentaje de variación de cada una las coberturas menor al 2%, lo que implica una escasa variación desde el año 2000. Esto implica que el incendio del año 2005 no generó un significativo impacto en la cartografía ESA/CCI, ya que el área quemada del parque en el año 2005 corresponde al 6,8% de la superficie total del parque, caracterizándose principalmente por praderas correspondiente escasa vegetación.

Cuadro 4. Superficie de cada cobertura y porcentaje de variación entre los mapas de vegetación reclasificada de los años 2005 y 2010.

Clasificación de coberturas	Años		
	2005 (ha)	2010 (ha)	Variación (%)
Arbusto	10.904,5	11.050,3	1,3
Bosque	62.142,9	62.358,5	0,3
Cuerpos de agua/Hielo y nieve permanente	84.002,6	83.951,9	-0,1
Escasa vegetación	29.404,1	29.372,4	-0,1
Herbáceas, cultivo y pradera	41.589,2	41.652,6	0,2
Mosaico de vegetación	18.664,4	18.727,8	0,3
Suelo desnudo	348,7	355	1,8
Áreas urbanas	44,4	44,4	0

Para el caso de la cartografía de Zhao et al. (2016), solo se consideraron las grandes clasificaciones, consistente es “Bosque”, “Cultivos”, “Pastizales”, “Matorral” y “Humedal”. Esta cartografía, así como el porcentaje de cobertura, se muestra en la Figura 5.

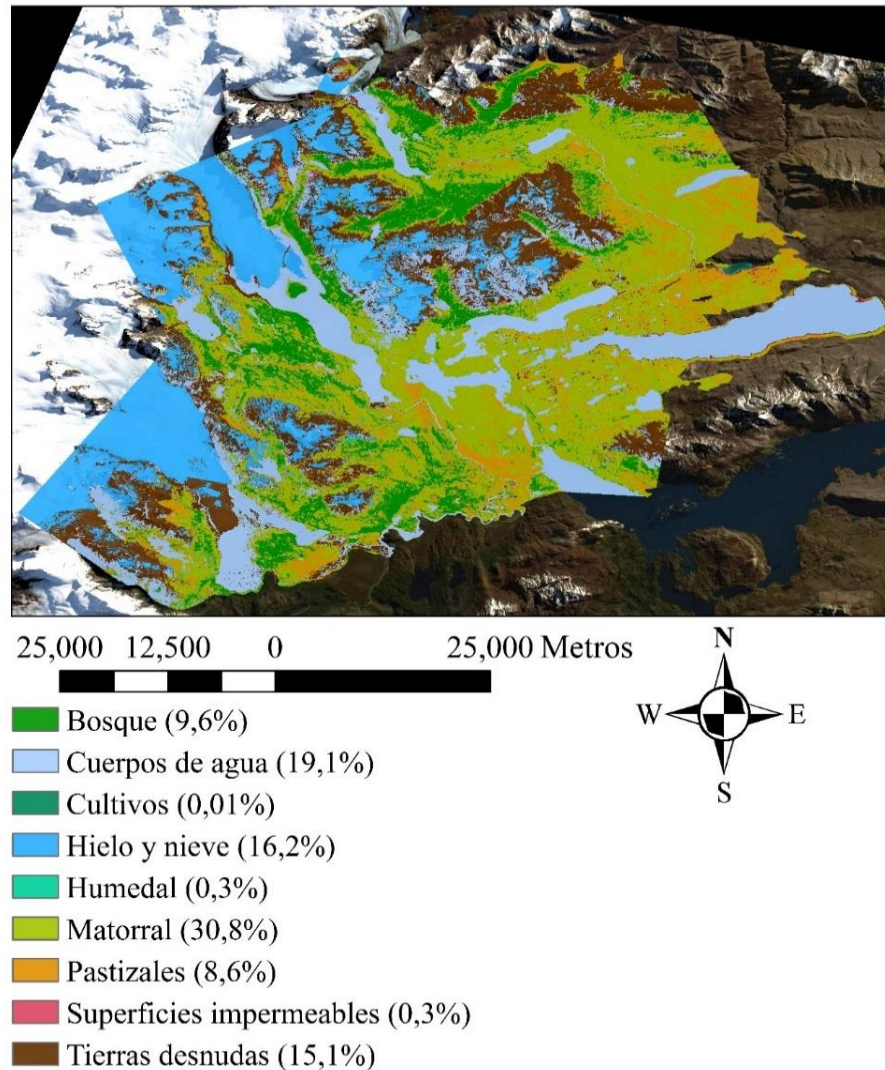


Figura 5. Máscara de vegetación reclasificada en el área de estudio

Análisis espacial de las tendencias mensuales de NDVI

Durante el periodo 2002-, las tendencias de NDVI muestran un aumento de su vigor en las zonas que no fueron afectadas por el incendio del parque nacional tanto en 2005 como en 2011/2012, explicando un aumento del vigor de la vegetación con una significancia estadística ($p\text{-value} > 0,05$). Existen dos zonas que experimentaron una tendencia negativa y están principalmente ligadas al impacto de los incendios del 2005 y 2011/2012, respectivamente. Así mismo, es posible distinguir ciertas zonas con valores negativos de la tendencia del NDVI en donde no se ha producido ningún incendio. Esto se podría relacionar con el impacto de la cobertura de nieve, que podría afectar las fases fenológicas de la vegetación en zonas de acumulación y donde existe un acentuado derretimiento en épocas estivales. Las variaciones en estas épocas podrían atribuirse a un cambio o desfase

en el vigor de la vegetación producto del año en particular. La anomalía del NDVI y su respectiva variación durante los últimos 16 años se muestra en la Figura 6.

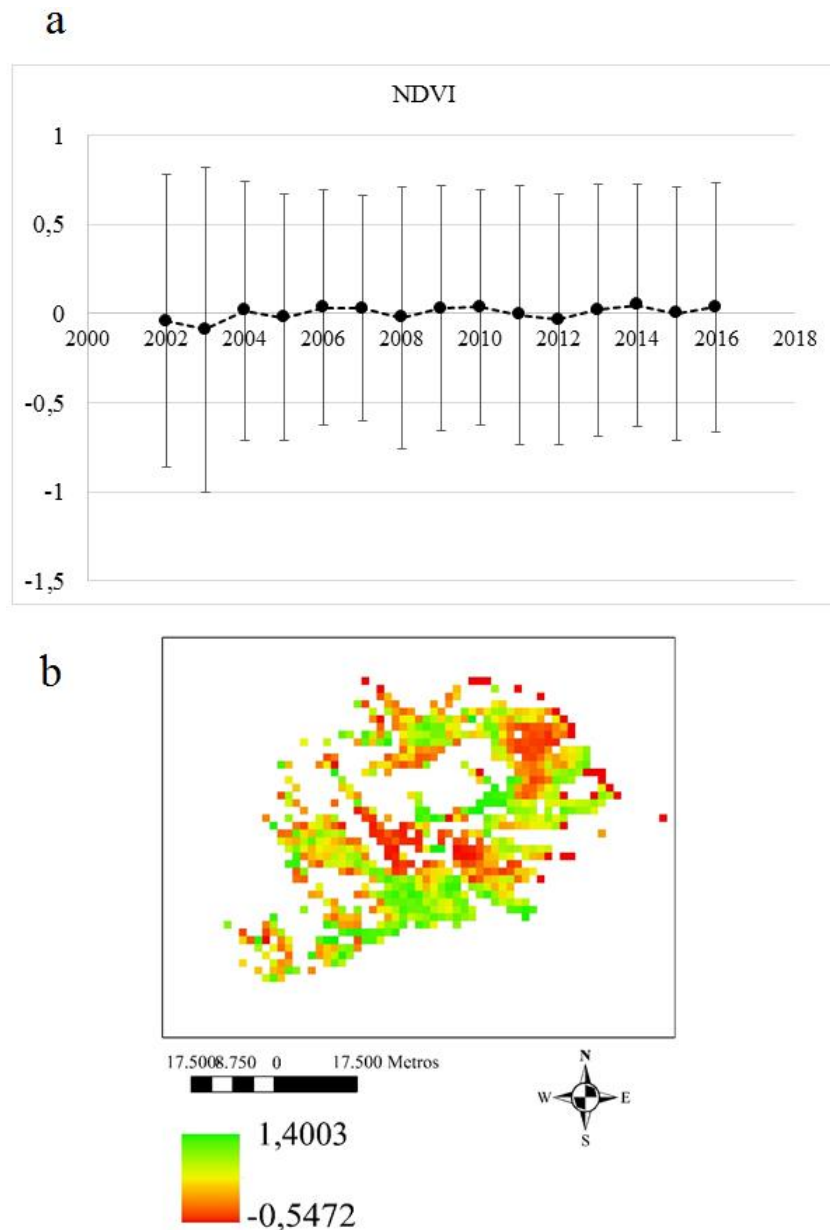


Figura 6. (a) Anomalías mensuales de NDVI y (b) Tendencia de la anomalía mensual de NDVI, durante los últimos 16 años a partir del producto MOD13A3.

Durante los últimos 16 años, el vigor de la vegetación en el PNTTP no ha presentado ninguna variabilidad significativa ($p < 0,05$) y solo es posible apreciar una disminución estacional para los periodos de incendios (2005 y 2011-2012). Si bien es cierto que para los años 2002 -2003 los valores de anomalía son negativos, esto se podría atribuir a un efecto climático local, como acumulación de nieves, baja precipitación o a la proporción de nubes

que influirían en una menor disponibilidad de datos para la estimación del vigor a partir de datos MODIS. Es importante destacar que posterior a los incendios existe un leve aumento del vigor, lo cual se atribuye al impacto de las precipitaciones sobre las primeras sucesiones ecológicas de vegetación posterior a los incendios (Luken, 1990).

Interpolación de imágenes Landsat

Con el fin de generar una imagen Landsat sin el efecto SLC-Off, la Figura 7 muestra el resultado de la interpolación de *Delaunay* sobre tres imágenes Landsat 7 ETM+ correspondiente a los días 13 de febrero del 2014, 5 de abril del 2015 y 1 de diciembre de 2015. Este tipo de interpolación completa la información faltante en términos espectrales y espaciales, generando una visualización continua de la imagen. A pesar que existen efectos de bandeo que todavía permanecen en las imágenes, los cuales pueden verse identificados en las laderas con una alta proporción de sombra o superficies de alto reflectividad (nieve y glaciar), este método ha sido utilizado en trabajos anteriores de cuantificación de áreas quemadas (Mattar et al., 2012; Stepanov y MacGregor, 2012).

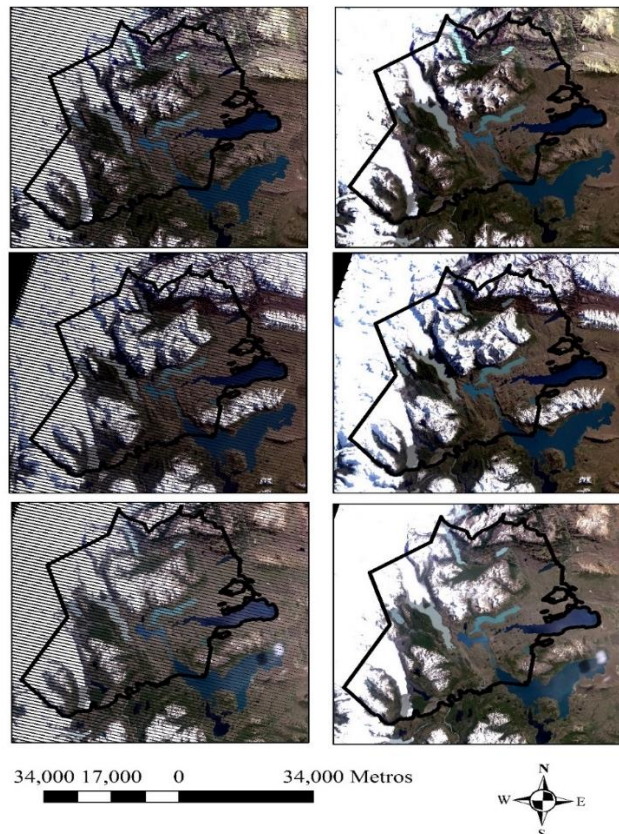


Figura 7. Interpolación de Delaunay en tres imágenes Landsat 7 ETM+ correspondiente a los días 13 de febrero del 2014, 5 de abril del 2015 y 1 de diciembre de 2015 (de arriba hacia abajo, respectivamente).

Estimación del área quemada

En la Figura 8 se presenta el área total del parque, junto a las dos zonas de los incendios ocurridos en el 2005 y 2011-2012. El incendio del 2005 ocurrió en la zona de lago Sarmiento, la cual está mayoritariamente cubierta por vegetación no boscosa ni matorrales. Por su parte, el incendio ocurrido entre el 2011/2012 fue en las cercanías de Lago Grey, afectando principalmente una zona boscosa (e.g. Lenga). Ambas zonas cubren más de 34 mil hectáreas, afectan las zonas más transitadas del parque y son las que tiene mayor riesgo de combustibilidad debido a los campos viento de la zona ($> 7 \text{ mseg}^{-1}$). A continuación se detallan las coberturas afectadas para cada uno de los incendios ocurridos en el PNTP.

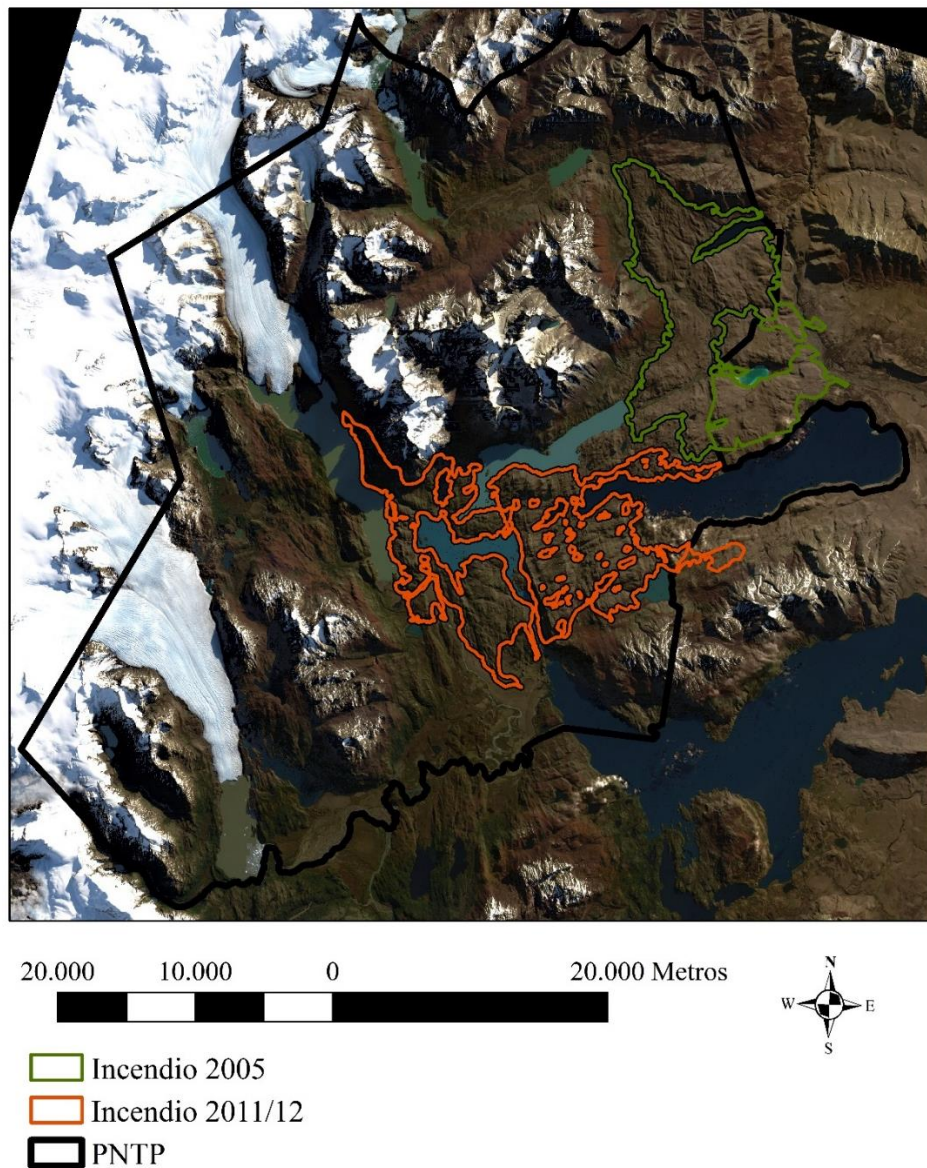


Figura 8. Imagen del Parque Nacional Torres del Paine (límite en negro) con las áreas afectadas por incendio del año 2005 (verde) y 2011/2012 (rojo).

Incendio 2005

El área quemada en el año 2005 se muestra en la Figura 9, en donde se utilizó una imagen falso color (bandas 7-4-2 para L5 y L7 y bandas 7-5-3 para L8), entre las imágenes antes y después del incendio. La superficie de vegetación afectada se estimó en 15.628 ha.

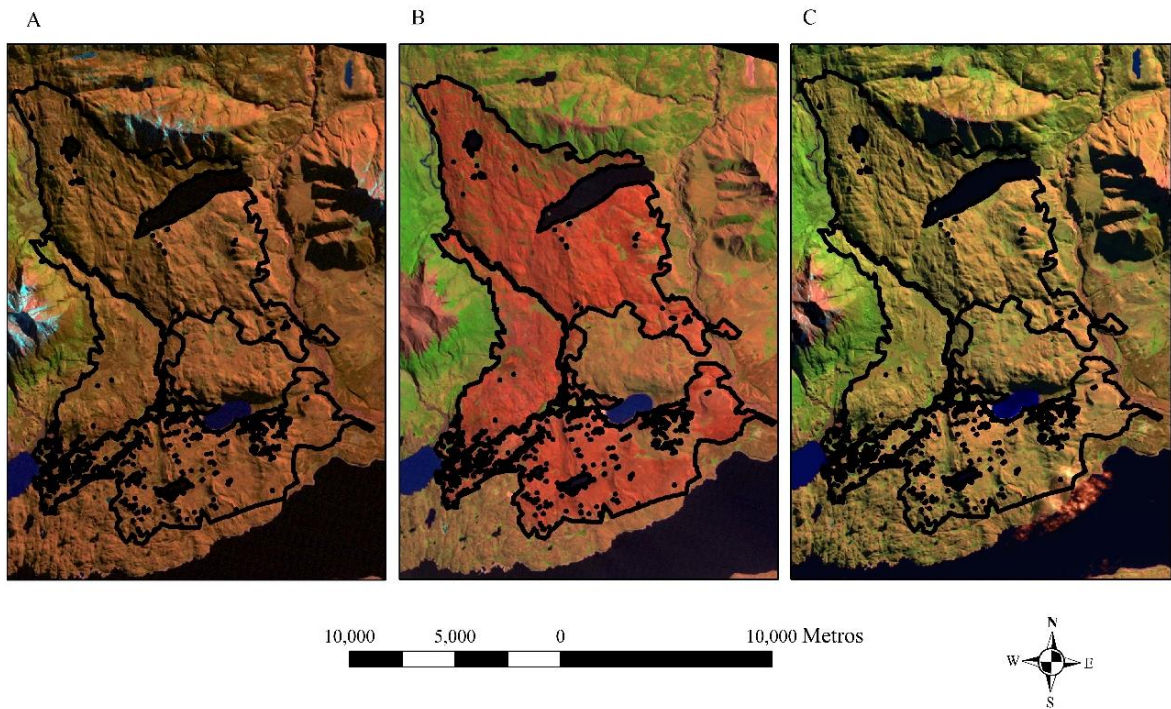


Figura 9. Imagen falso color del área afectada por incendio en el año 2005. (A) Corresponde al 20 de Agosto de 2004, (B) al 28 de Febrero del 2005 y (C) al 1 de Mayo de 2016.

Con el fin de estimar el impacto del incendio, la Figura 10 muestra el ΔNBR estimado para el área afectada por el incendio del año 2005. En esta figura el índice presenta categorías según el tipo de cobertura siniestrada y según la regeneración, en donde se diferencia el área no quemada, las áreas que sufrieron un grado siniestralidad y aquellas que presentan regeneración. En el ΔNBR 2004-2005 es posible apreciar diferencias significativas en los tipos de crecimiento (Alto y Bajo) totalizando más de 476 ha, aunque el tipo de clasificación “No quemado” fue superior al 20% del área siniestrada. Esto implica que existe un cambio regenerativo significativo después de transcurrido un año. Sin embargo, las zonas con algún grado de severidad, correspondientes principalmente a coberturas de “Bosque” o “Matorral”, no presentaron ningún tipo de regeneración a un año de transcurrido el incendio, totalizando 11.966 ha. Para la comparación 2004 y 2016, es posible establecer que la mayor parte del área quemada presentaba una clasificación de “No quemado” lo que implica una regeneración similar a la situación pre-incendio. No obstante, las zonas que tuvieron un grado de severidad “Área quemada de severidad alta” o “Área quemada de severidad media alta”, no experimentaron ningún tipo de regeneración en

relación a la cobertura pre-incendio, totalizando 118,71 ha.

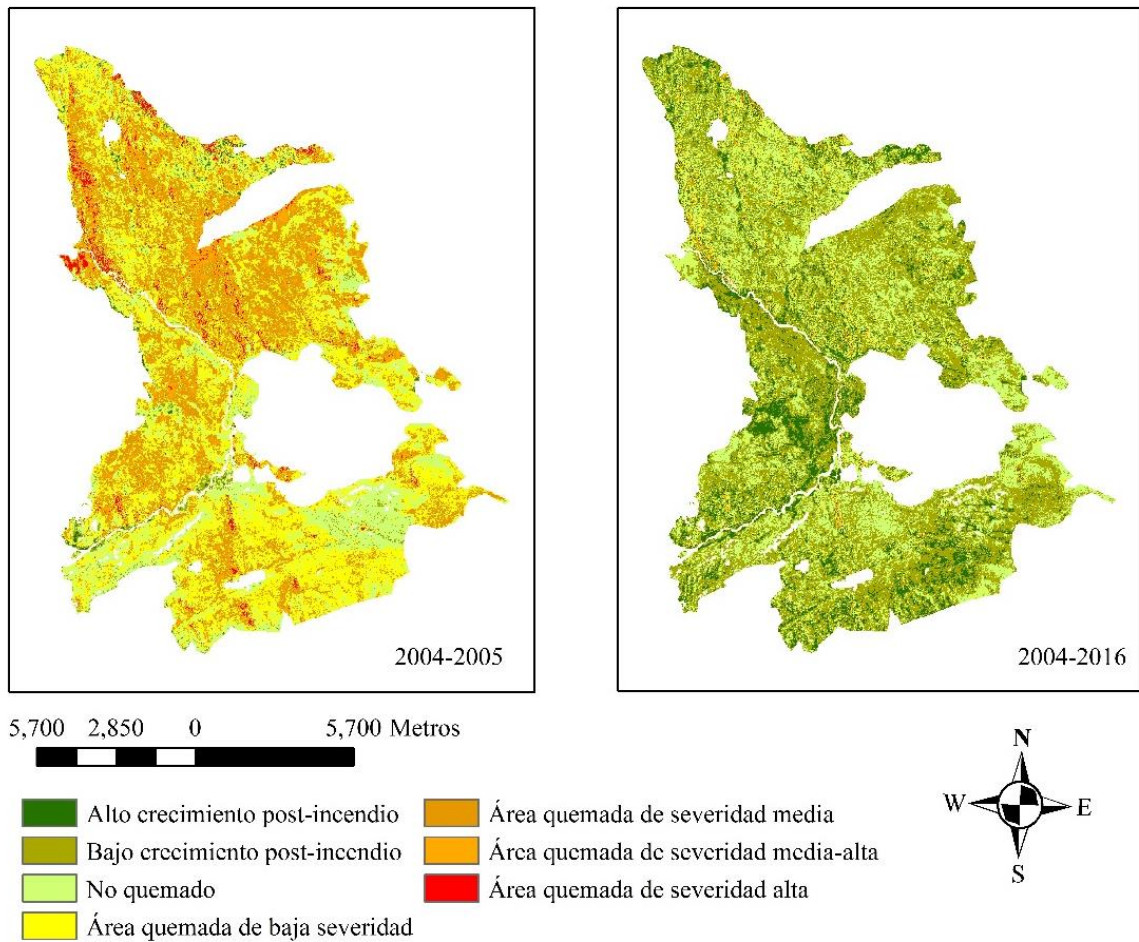


Figura 10. Imagen de ΔNBR , donde (A) índice entre los años 2004 y 2005, y (B) índice entre los años 2004 y 2016.

La Figura 11 muestra el criterio de crecimiento según las coberturas afectadas por el incendio 2005. Para la cobertura de “Bosque”, se aprecia una tendencia positiva al crecimiento post-incendio aunque se aprecia un posible efecto de estacionalidad en los años 2007 y 2011. En el caso de “Cultivos”, es posible apreciar un aumento sostenido de la regeneración a partir del 2013 con un fuerte efecto estacional el 2012. Esto se puede atribuir a algún efecto pluviométrico que generó un aumento significativo del vigor durante ese año en particular. En el caso de “Pastizales”, se observó un comportamiento similar al de “Bosque”, pero es destacable una fuerte disminución en el tiempo del “Área quemada de severidad alta”. Así mismo, el tipo de alto y bajo crecimiento experimentó un aumento significativo a partir del 2012 (posiblemente atribuible al efecto estacional pluviométrico). En el caso de “Matorral”, se evidenció una fuerte superficie de “Área quemada de severidad baja”, “Área quemada de severidad media alta” y “Área quemada de severidad alta” (aprox. 8.894 ha.) Sin embargo, esta superficie disminuyó significativamente al

segundo año post-incendio, donde la superficie “No quemado” aumentó de 2.000 a 6.000 ha. Al igual que en “Pastizales” y “Cultivo”, se evidenció un fuerte crecimiento a partir del año 2012. Finalmente, para “Humedal”, se observó un crecimiento sostenido de esta cobertura así como una disminución en el área clasificada como “Área quemada de severidad alta” y “Área quemada de severidad media alta”.

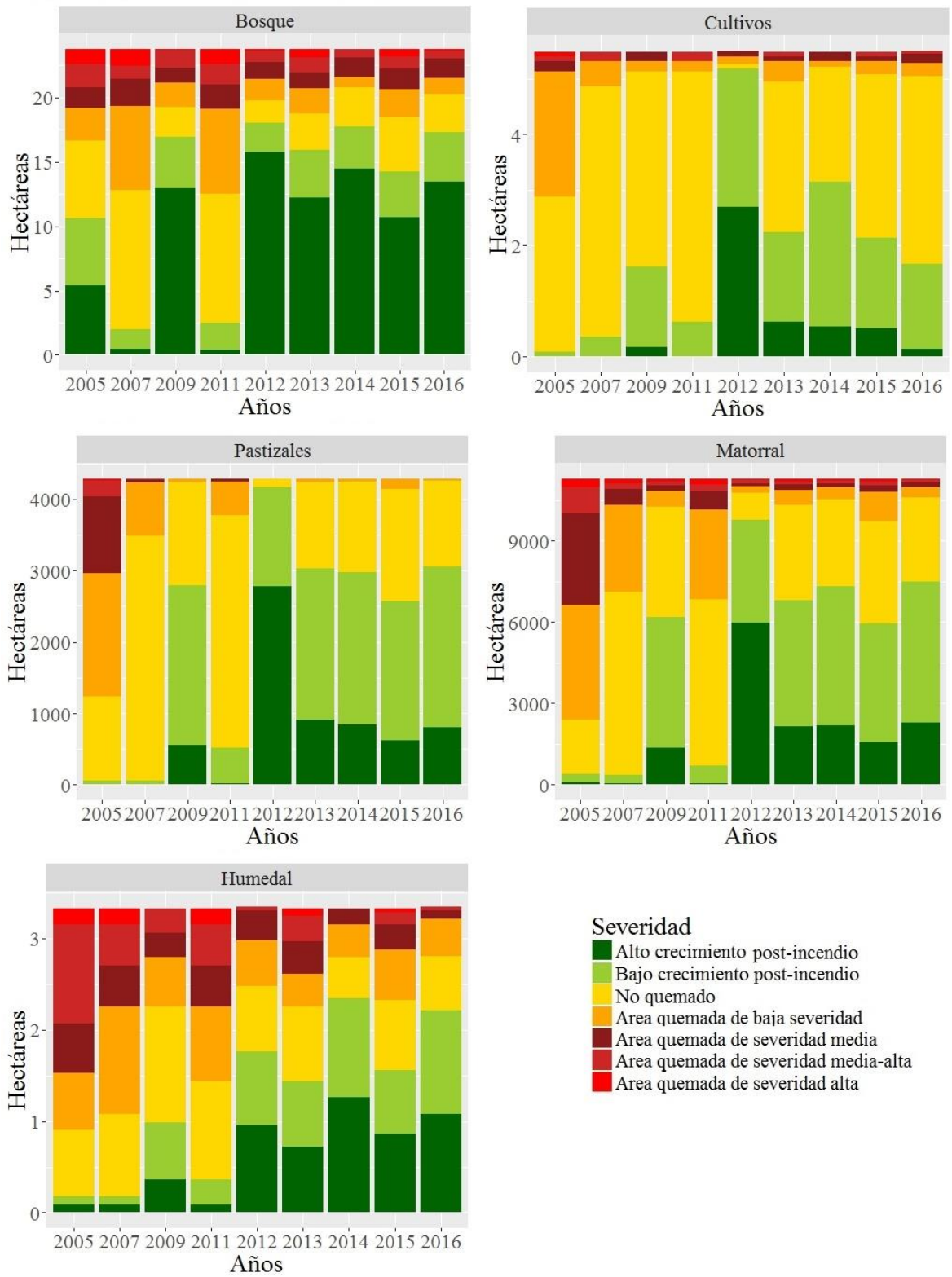


Figura 11. Superficie afectada según nivel de severidad, para las coberturas de vegetación indicadas, en el incendio del año 2005. Nótese las diferencias de escalas en el eje y.

Incendio 2011-2012

A continuación, se presentan los resultados de la estimación del área quemada por el incendio del año 2011/2012. En la Figura 12 se muestra el área quemada por el fuego en los años 2011/2012, mediante una imagen falso color (bandas 7-4-2 para L5 y L7 y bandas 7-5-3 para L8), entre las imágenes antes y después del incendio. La superficie de vegetación afectada se estimó en 16.362 ha.

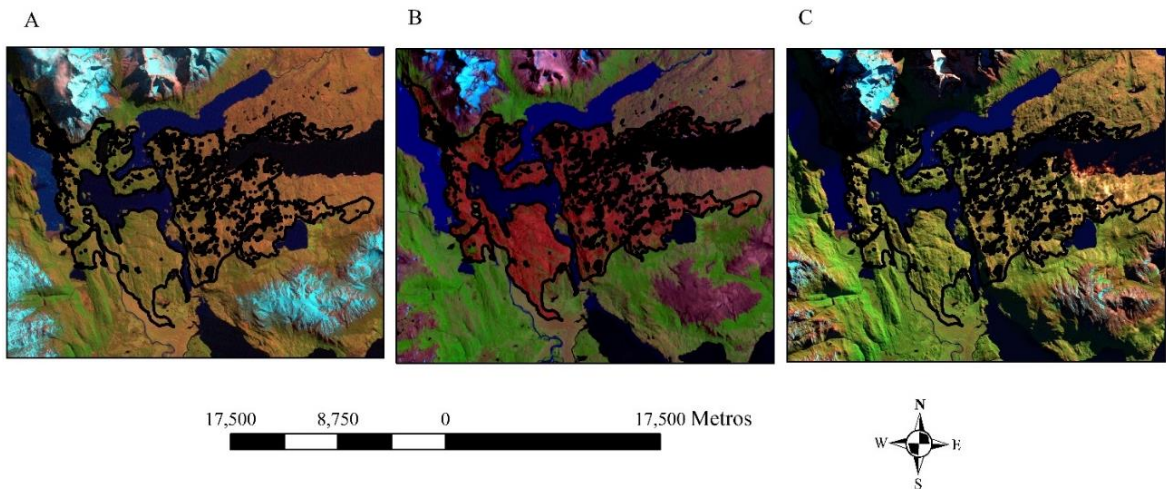


Figura 12. Imagen falso color del área afectada por incendio en el año 2011. (A) Corresponde al año 2011, (B) al año 2013 y (C) al año 2015. En la figura C se aprecia un importante efecto de sobra debido a la hora de paso del sensor L8.

En el caso del incendio ocurrido el año 2011/2012, la Figura 13 muestra el ΔNBR estimado para el área afectada, con el fin de estimar el impacto del incendio. En esta figura el índice presenta categorías según el área no quemada, las áreas que sufrieron un grado de siniestralidad y aquellas que presentan crecimiento post-incendio. En el ΔNBR 2011-2012 las categorías de crecimiento post incendio alcanzan un total de 8.528 ha (52% del área siniestrada), seguido de la categoría “No quemada” que alcanza un 26% del área siniestrada. Estos resultados implican que luego de ocurrido el incendio existe un cambio regenerativo en más de la mitad del área. Las zonas con grados de severidad se totalizaron en 3.541 ha, correspondientes a las coberturas “Bosque” y “Matorral”. Para el ΔNBR 2011-2016 los tipos de categoría de crecimiento han aumentado, alcanzando un 63% del área. La categoría “No quemada” se totaliza en 4.805 ha y las zonas de severidad del parque disminuyen significativamente, llegando a las 1.200 ha.

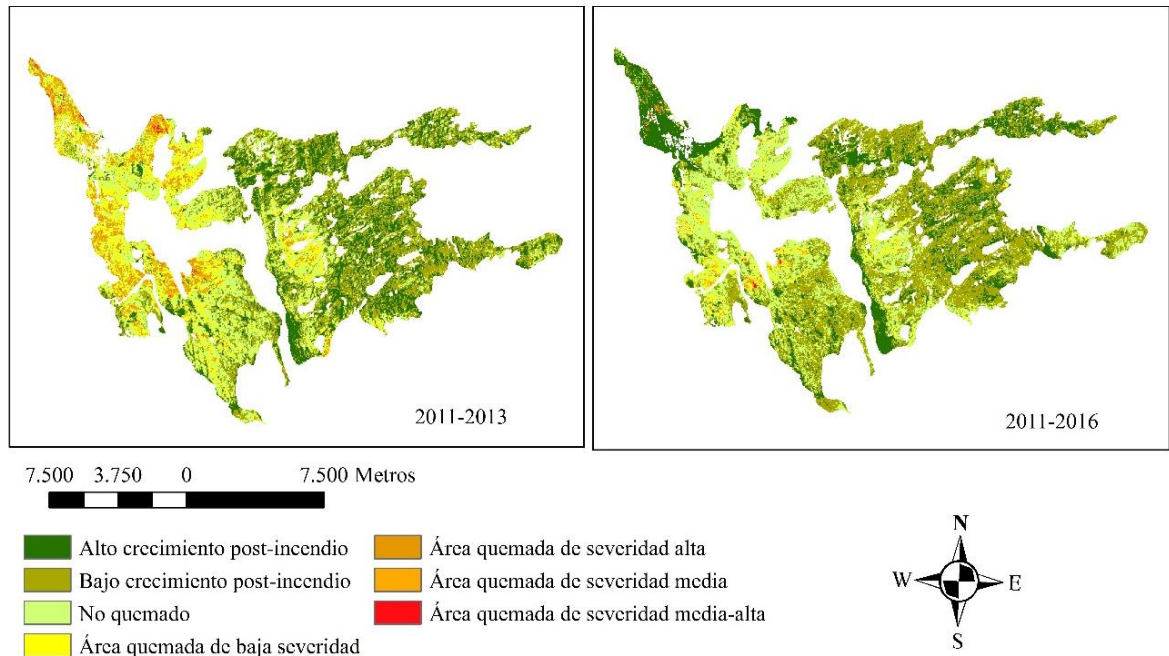


Figura 13. Imagen de ΔNBR , donde (A) índice entre los años 2011 y 2013, y (B) índice entre los años 2011 y 2016.

La Figura 14 muestra los niveles de severidad de ΔNBR según las coberturas afectadas por el incendio del año 2011/2012. Las categorías de crecimiento post incendio y “No quemado” de la cobertura “Bosque” presentan un cambio regenerativo positivo donde la superficie se duplica desde el año 2013 al 2016. La superficie de área quemada con distintos niveles de severidad de “Bosque” disminuye, aunque permanecen sectores afectados. En la cobertura “Cultivos”, las categorías de crecimiento y la categoría “No quemado” aumentan un ~50% y las categorías de áreas quemadas presentan una tendencia negativa. La cobertura “Pastizales” mantiene la superficie con categorías de crecimiento y la categoría “No quemado” a través de los años, y las categorías de área quemada disminuyen, llegando a tener solo 6,44 ha en el años 2016. En el caso de “Matorral”, es la cobertura con mayor superficie afectada, en donde al 2013 se totalizan 3.224 ha que permanecen quemadas. Las categorías de crecimiento presentan una tendencia positiva, aumentando 2.000 ha de su superficie entre los años 2013 y 2016. Finalmente, la cobertura de “Humedal” presenta un comportamiento similar a “Matorral”, en donde las categorías de crecimiento tienen tendencia positiva y las categorías de áreas quemadas una tendencia negativa, en donde el “Área quemada de severidad alta” llega a las 0 ha.

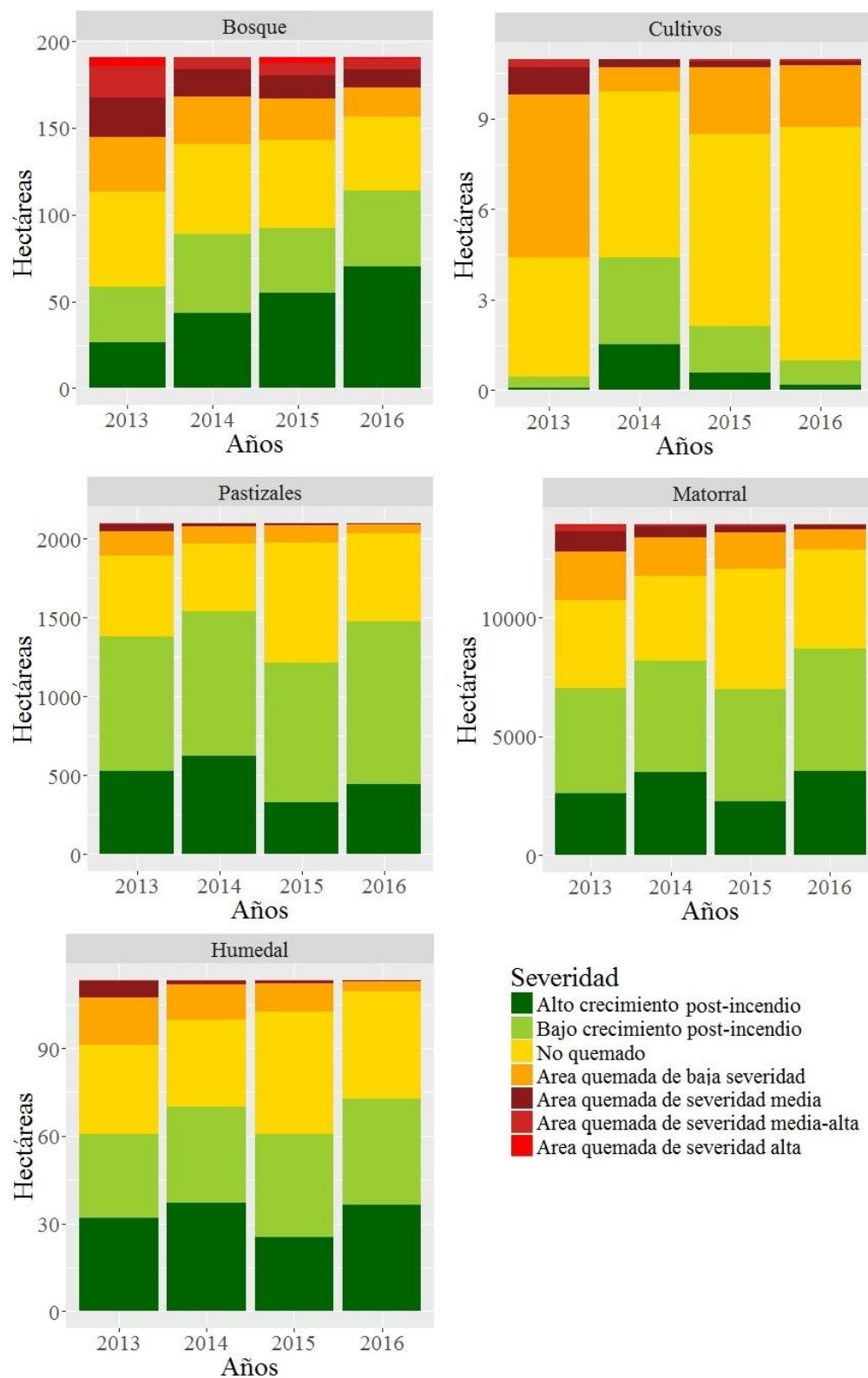


Figura 14. Superficie afectada según nivel de severidad, para las coberturas de vegetación indicadas, en el incendio del año 2011. Nótese las diferencias de escalas en el eje y.

Análisis de promedio y desviación estándar de NDVI

En la Figura 15 se presenta una serie temporal de NDVI del área total del parque, del incendio del 2005 y del incendio del 2011/12. El NDVI en el área del parque muestra una disminución en los años posteriores al incendio del 2005 y el 2011/2012. Esta disminución fue en promedio sólo un 10% en ambos incendios, debido a que las áreas afectadas equivalen al 6,8% y 7,5% del parque, para los incendios del año 2005 y 2011/2012, respectivamente. Por otra parte, se puede identificar un aumento de la desviación estándar desde el año 2004 al 2005 de 25,6% y desde el año 2011 al 2013 de un 36,9%. El NDVI para el área del incendio 2005, evidencia una disminución del promedio de NDVI entre el 2004 y 2005, aunque un aumento significativo del vigor posterior al 2006. Si bien es cierto, el aumento del vigor no se logra apreciar al considerar toda el área del PNTP, entre el 2005 y el 2015 el NDVI subió del 10 al 50% en 10 años considerando solo el área del incendio del 2005, generando un significativo crecimiento ($p < 0,05$) y posterior regeneración de la vegetación para el área afectada. Para el caso de la tendencia del NDVI en el área correspondiente al incendio del año 2011/2012, se aprecia que el NDVI tiene una variación menor al 6% posiblemente debido a factores estacionales como la pluviometría de la zona. Sin embargo, se aprecia un fuerte descenso del vigor de la vegetación provocado por el incendio del 2011/2012, equivalente a un 23%; sin embargo, se presenta un fuerte aumento del NDVI (~35%) para el año 2013. Si bien es cierto, en la tendencia temporal de NDVI utilizando el área total del parque también es posible visualizar un aumento similar, este es máximo dentro del área equivalente al incendio del 2011/2012. Posterior a esta fecha, el NDVI tiene una variación menor al 4% entre el 2013 y el 2016.

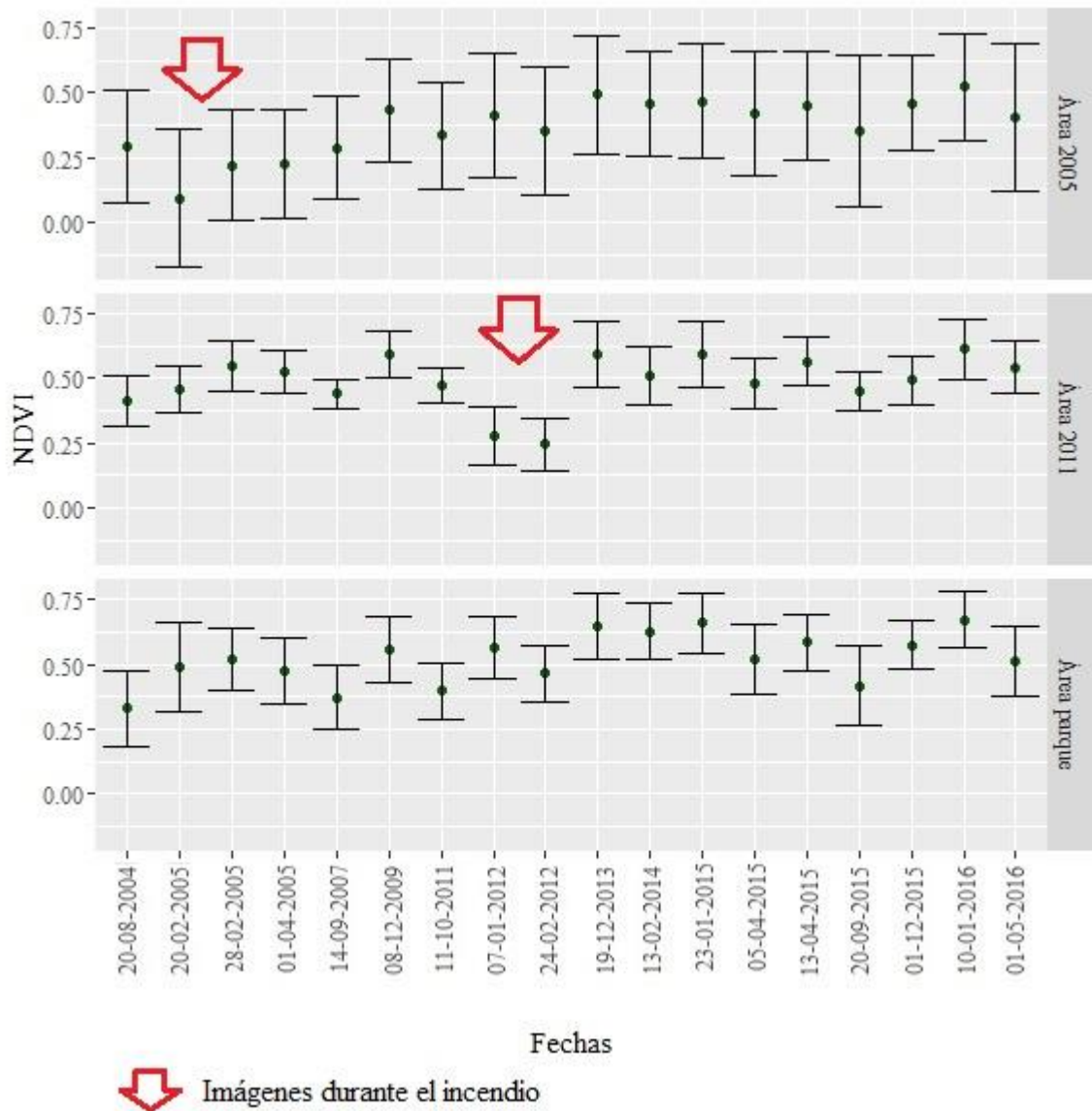


Figura 15. Serie temporal de NDVI y desviación estándar en el área afectada por el incendio del 2011 a partir de imágenes Landsat.

Análisis de Humedad del suelo (SMOS) y precipitaciones

En la Figura 16 se presenta el análisis de las variables humedad del suelo (m^3m^{-3}) y precipitación (mm) para el incendio 2011/2012. Este análisis se realizó entre los días 1 de diciembre y 31 de enero, con el fin de identificar las variaciones antes y durante el incendio. La humedad del suelo presenta valores que no superan los $0,2 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ durante los dos meses, siendo el menor valor registrado un $0,06 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ el día 13 de enero. Los valores más altos de humedad se encuentran en los días anteriores al incendio y luego de este la humedad del suelo disminuye aproximadamente un 67%. En cuanto a la precipitación, en

diciembre se alcanzaron 19,3 mm, con 7 días de lluvia y una máxima diaria de 10 mm (31 de diciembre). En enero la precipitación mensual fue de 21 mm, 9 días de lluvia y una máxima de precipitación diaria de 5,2 mm (10 de enero). En la figura se puede observar que de 34 días durante los que se incendiaba el parque (27 de diciembre del 2011 al 6 de marzo del 2012), sólo llovió 12 días, lo que podría haber aumentado las probabilidades de propagación.

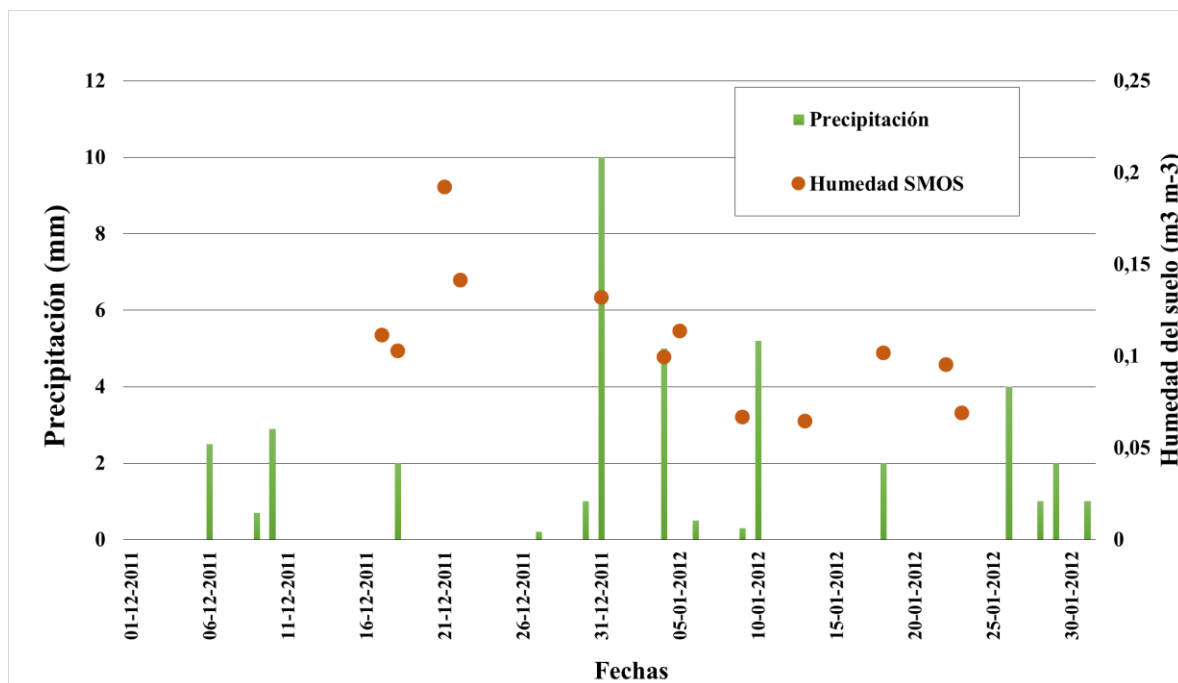


Figura 16. Análisis de Humedad de suelo y precipitaciones para el incendio del año 2011/2012.

DISCUSIÓN

El análisis de la tendencia espacio temporal de la vegetación en el Parque Nacional Torres del Paine se realizó entre los años 2004 y 2016, incluyendo los incendios del año 2005 y del año 2011/2012. La información disponible para el año 1985 no pudo ser considerada debido a la ubicación del incendio ocurrido ese año y la alta proporción de nubes sobre la única escena cercana a la fecha del incendio.

En la diferencia del índice NBR entre la escena antes del incendio y las escenas del año 2016 de los incendios del 2005 y 2011/2012, se obtuvieron resultados de crecimiento de área quemada con diferentes niveles de severidad, esto puede deberse a que el índice se ve afectado por estacionalidad. Sin embargo, otras combinaciones de bandas se influyen con mayor grado que NBR (Key y Benson, 2006). A pesar de que ambos incendios afectaron grandes superficies de vegetación, el vigor del parque no se ve afectado significativamente, lo cual se evidencia en el análisis del índice NDVI en las áreas de incendio y del parque, ya que el área siniestrada no supera el 15% del área de vegetación del Parque Nacional Torres del Paine. Además, se puede evidenciar que ambos se encuentran cercanos a las rutas de *trekking* y que ambos incendios ocurrieron en verano, fecha donde se genera el mayor ingreso de personas al parque y coincide con altas temperaturas y bajas precipitaciones. Junto a esto, las variables de humedad de suelo y precipitaciones muestran una disminución en su magnitud una vez ocurrido el incendio del 2011/2012 (27 de diciembre del 2011 al 6 de marzo del 2012) por lo cual se podrían haber generado otras medidas complementarias para evitar una propagación o severidad del fuego. Los datos de viento de las estaciones dentro del PNTP no están disponibles, por lo cual no se puede realizar el análisis de esta variable.

El análisis de vegetación afectada por incendios es fundamental para la toma de decisiones, en cuanto a las medidas de restauración que se deben aplicar sobre la superficie del parque y en la creación de planes de manejo que incluyan al impacto antrópico. Un ejemplo es el plan de manejo de incendios del Parque Nacional Yellowstone, en el cual existen medidas de prevención y mitigación de incendios por causa humana, donde incluye severas restricciones al público con respecto a manejo irresponsable del fuego (fogatas, colillas de cigarrillos, etc) y planes de educación ambiental (National Park Service, 2014). En Chile existe la plataforma CARTO <<http://bit.ly/1MIcuDe>> que ha sido utilizada en diversos incendios forestales para evitar su propagación, ya que entrega un mapa de riesgo interactivo al público. Sin embargo, es necesario mejorar diversos aspectos ligados con la resolución espacial de los datos entregados (2x2 km) y la generación de cartografías preventivas asociadas, con el fin de evitar futuros desastres naturales como el ocurrido en el Parque Nacional Torres del Paine. Por último, es necesario mencionar que para relacionar los indicadores de intensidad y/o severidad de un incendio con lo ocurrido en el campo es necesario complementar los datos de teledetección con trabajo de terreno.

CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó una estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine después del incendio ocurrido entre febrero y marzo del 2005 (15.628 ha, 6,8% de superficie total del Parque) y el incendio ocurrido entre diciembre del 2011 y marzo del 2012 (16.362 ha, 7,5% de superficie total del Parque). Junto a esto se analizó el tipo de cobertura de suelo afectada por los incendios y el grado de siniestralidad que presentaba el área quemada a través de los años, desde antes de ocurrido cada incendio, hasta el año 2016. Esto se realizó a partir de la comparación de imágenes con el índice ΔNBR que identifica las variaciones de áreas quemadas, aunque puede ser afectado por factores como las precipitaciones y la humedad del suelo. Los resultados de ΔNBR para ambos incendios entregan tendencias de crecimiento positivas para las clasificaciones de crecimiento post-incendio y de áreas no quemadas, y tendencias negativas para las áreas con clasificaciones de áreas quemadas con severidad. La cobertura “Matorral” fue la más afectada en ambos incendios y la cobertura “Bosque” afectada por el incendio del 2005, sólo se ha recuperado en un 56%. Además se realizó un análisis de tendencias de las anomalías del índice de vegetación NDVI de los años 2002-2016, con el cual se determinó que aumenta el vigor en zonas de no incendio y se identifican zonas con tendencia negativa asociadas a los incendios de los años 2005 y 2011/2012.

Los resultados de esta investigación pueden ser utilizados como herramienta para la gestión de incendios, ya que se ha obtenido el estado pre y post-incendio de la vegetación, y el comportamiento de las variables humedad del suelo y precipitación. Con esto se pueden generar análisis y cartografías de riesgos de incendio de una manera actualizada a partir de información remota disponible en diversas plataformas on-line y de acceso gratuito. Esta entrega de información técnica, así como las medidas adoptadas por las autoridades que resguardan los parques nacionales, son fundamentales para la preservación y conservación de la flora, fauna y belleza paisajística que podrían convertir a los parques nacionales de Chile en un patrimonio de la biósfera.

BIBLIOGRAFÍA

Alani, H., Tudhope, D. y Jones, C. 2001. Voronoi-based región approximation for geographical information retrieval with gazetteers. *International Journal of Geographical Information Science*, 15 (4): 287-306.

BCN (Biblioteca del Congreso Nacional). 2013. Reportes Estadísticos y Comunes 2013. Comuna Torres del Paine. Recuperado en <[http://reportescomunales.bcn.cl/2013/index.php/Torres del Paine](http://reportescomunales.bcn.cl/2013/index.php/Torres_del_Paine)> Citado el 16 de noviembre de 2015.

Brewer, C.K., Winne, J.C., Redmond, R.L., Opitz, D.W., y Mangrich, M.V. 2005. Classifying and mapping wildfire severity: A comparison of methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 71, 1311–1320.

Ceccato, P., Leblon, B., Chuvieco, E., Flasse, S. y Carlson, J. D. 2003. Estimation of Live Fuel Moisture Content, en *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping. The Role of Remote Sensing Data* (editado por E. Chuvieco). Singapore, World Scientific Publishing. 63-90.

Chaparro, D., M. Vall-llossera, M. Piles, A. Camps, and C. Rüdiger. 2015. Low soil moisture and high temperatures as indicators for forest fire occurrence and extent across the iberian peninsula. IGARSS 2015.

Chuvieco, E. (Ed.). 2003. *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping. The Role of Remote Sensing Data*, Series in Remote Sensing, vol. 4, Singapore, World Scientific Publishing.

Chuvieco, E., Cocero, D., Riaño, D., Martín, P., Martínez-Vega, J., De la Riva, J. and Pérez, F. 2004. Combining NDVI and Surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*. 92(3): 322-331.

Chuvieco, E., Giglio, L. and Justice, C. O. 2008. Global characterization of fire activity: Towards defining fire regimes from earth observation data. *Global Change Biology*, 14: 1488-1502.

Chuvieco, E. 2009. Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. X Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica. *Revista Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 103(1): 173-181.

Claverie, M., Vermote, E., Franch, B. and Masek, J. 2015. Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ surface reflectance products. *Remote Sensing of Enviroment*. 169:

390-403.

Cocke, A. E., Fule, P. Z. and Crouse, J. E. 2005. Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*. 14: 189-198.

CONAF (Corporación nacional forestal). 2007. Plan de manejo Parque Nacional Torres del Paine. Ministerio de Agricultura. 284p.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2016a. Estadística Visitantes Unidad SNASPE para el año: 2015. Gerencia de Áreas Protegidas y Medio Ambiente Unidad de Planificación y Control de Gestión. 1 p.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2016b. [en línea]. Senderismo. Recuperado en <<http://www.parquetorresdelpaine.cl/es/senderismo>> Citado el 01 de junio de 2016.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2016c. [en línea]. Que hacer en el parque. Recuperado en < <http://www.parquetorresdelpaine.cl/es/que-hacer-en-el-parque>> Citado el 01 de junio de 2016.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2016d. [en línea]. Caminata en hielo. Recuperado en < <http://www.parquetorresdelpaine.cl/es/caminata-en-hielo>> Citado el 01 de junio de 2016.

Contreras, S. and Irrazabal, P. 2010. Disturbance habitats effects on mammal species in Torres del Paine National Park and Biosphere Reserve, Magallanes Region, Chile. Santiago, Chile.

Csiszar, I., Denis, L., Giglio, L., Justice, C. O. and Hewson, J. 2005. Global fire activity from two years of MODIS data. *International Journal of Wildland Fire*. 14: 117-130.

De Angelis, A., Bajocco, S. and Ricotta, C. 2012. Modelling the phenological niche of large fires with remotely sensed NDVI profiles. *Ecological Modelling*. 228: 106-111.

Decreto N° 383/1959. Crea el Parque Nacional de Turismo “Lago Grey”. Ministerio de Agricultura. Publicado el 25 de junio de 1959. 1p.

Decreto N° 1050/1962. Amplia la extensión del Parque Nacional de Turismo “Lago Grey” y declara que en lo sucesivo se denominará Parque Nacional de Turismo “Torres del Paine”. Ministerio de Agricultura. Publicado el 18 de enero de 1962. 2p.

Delgado, L., Sepúlveda, M., Marín, V. 2013. Provision of ecosystem services by the Aysén watershed, Chilean Patagonia, to rural households. *Ecosystem Services*, 5: 102–109.

Dimitrakopoulos, A. y Papaioannou, K. K. 2001. Flammability assessment of

Mediterranean forest fuels. *Fire Technology*, 37: 143-152.

Dwyer, E., Pereira, J. M. C., Grégorie, J.-M. and Dacamara, C. C. 2000. Characterization of the spatio-temporal patterns of global fire activity using satellite imagery for the period April 1992 to March 1993. *Journal of Biogeography*, 27: 57-69.

Domínguez, E., Elvebakk, A., Marticorena, C. y Pauchard, A. 2006. Plantas introducidas en el Parque Nacional Torres del Paine, Chile. *Gayana Bot.* 63(2): 131-141.

ESA. 2010. The international Charter space and major disasters.

ESA. 2016. Climate change initiative Land cover newsletter. *Land Cover CCI Newsletter*, 8.

Escuin, S., R. Navarro and P. Fernández. 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4): 1053–1073.

Gajardo, R. 1994. La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica. Editorial Universitaria-CONAF.

Gilbert, R.O. 1987. Sen's Nonparametric Estimator of Slope. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. John Wiley and Sons, 217–219.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. & Ferreira, L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 83: 195–213

Iriarte, J. A., Johnson, W. E., & Franklin W. L. 1991. Feeding ecology of the Patagonia puma in southernmost Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 64, 145-156.

Kendall, M. G. 1975. Rank Correlation Methods. Charles Griffin: London.

Key, C. y Benson, N. 1999. Conference Paper: Measuring and remote sensing of burn severity: the CBI and NBR.

Key, C y Benson, N. 2006. Landscape assessment: Remote sensing of severity, the normalized burn ratio and ground measure of severity, the composite burn index. En: Lutes DC, RE Keane, JF Caratti, CH Key, NC Benson, & LJ Gangi (eds) FIREMON: fire effects monitoring and inventory system. General Technical Report RMRS-GTR-164-CD: 1-51.

Kerr, Y.H., Waldteufel, P., Wigneron, J. P., Delwart, S., Cabot, F. and Boutin, J. M. et al. 2010. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle. *Proc. IEEE*. 98(5):666–687.

Kerr, Y. H., Font, J., Martin-Neira, M. and Mecklenburg, S. 2012. Introduction to the Special Issue on the ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity Mission (SMOS)—Instrument Performance and First Results. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*.

Korontzi, S., Mccarty, J., Loboda, T., Kumar, S. and Justice, C. O. 2006. Global distribution of agricultural fires in croplands from 3 years of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(2):1-11.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. and Rubel, F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3): 259-263.

Lanorte, A., Lasaponara, R., Lovallo, M. and Telesca, L. 2014. Fisher-Shannon information plane analysis of SPOT/VEGETATION Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) time series to characterize vegetation recovery after fire disturbance. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 26: 441-446.

LPDAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center). 2015. [en línea]. MODIS Products Table. USGS. Recuperado en <https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table> Citado el 16 de noviembre de 2015.

Luken, J. O. 1990. Directing Ecological Succession. Estados Unidos: Chapman and Hall. 252 p.

Maselli, F., Romanelli, S., Bottai, L. and Zipoli, G. 2003. Use of NOAA-AVHRR NDVI images for the estimation of dynamic fire risk in Mediterranean areas. *Remote Sensing of Environment*, 86(2): 187-197.

Mattar, C., Santamaría-Artigas, A. y Durán-Alarcón, C. 2012. Estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine utilizando datos de teledetección. *Revista de Teledetección*. 38: 36-50.

Mattar, C., Santamaría-Artigas, A., Sobrino, J. A., and Jiménez-Muñoz, J.C. 2016. Chapter 7- Soil Moisture Retrieved From a Combined Optical and Passive Microwave Approach: Theory and Applications. *Satellite Soil Moisture Retrieval*, 135-158.

Miller H., and Yool, S. 2002. Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal landsat TM and ETM data. *Remote Sensing of Environment*, 82: 481-496.

Miller, J and Thode, A. 2007. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109: 66–80.

Navarro, R., Hayas A., García-Ferrer A., Hernández Clemente, R., Duhalde P., y González, L. 2008. Caracterización de la situación posincendio en el área afectada por el incendio de 2005 en el Parque Nacional de Torres del Paine (Chile) a partir de imágenes multiespectrales. *Revista Chilena de Historia Natural*, 81: 95-110.

National Service Park. 2014. Yellowstone National Park 2014 fire management plan. U.S. Department of interior. 218p.

Navarro R., F. Olave, A. Hayas, M. Castillo. 2015. Metodología para la elaboración de un plan de restauración post-incendio en Chile: la experiencia del Parque Nacional de Torres del Paine. *Anales Instituto Patagonia (Chile)*, 43(1):53-73.

Piles, M., Corbella, I. y Kerr, Y. 2011. Downscaling SMOS-Derived Soil Moisture Using MODIS Visible/Infrared Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 49(9): 3156-3166.

Pisano, E. 1974. Estudio ecológico de la Región Continental Sur del Área Andino-Patagónica. II. Contribución a la fito-geografía de la zona del Parque Nacional "Torres del Paine". *Anales Instituto Patagonia (Chile)*, 1-2.

Pringle, M. J., Schmidt, M. & Muir, J. S. 2009. Geostatistical interpolation of SLCOFF Landsat ETM+ images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6): 654-664.

Repetto, F y Cabello, J. 2015. Potencial de restauración ecológica en zonas de uso público en el Parque Nacional Torres del Paine. *Anales Instituto Patagonia (Chile)*, 43(1): 115-121.

Rouse, J.W., Haas, R.H, Schell, J.A. y Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS: Fraden S.C. Macanti E.P. & Becjer M.A. (eds.). Third ERT-1 Symposium, 10-14 dec. 1973. NASA SP-351. Washington D.C. NASA, pp. 309-317.

Ruescas, A., Sobrino, J. A., Julien, Y., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Hidalgo, V., Atitar, M., Franch, B., Cuenca, J. and Mattar, C. 2010. Mapping sub-pixel burnt percentage using AVHRR data: Application to the Alcalaten area in Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 31(20): 5315-5330.

Salinas, P. 2011. [en línea]. Chile, Torres del Paine. Recuperado en <<http://www.unesco.org/mabdb/br/brdir/directory/biores.asp?code=CHI+03&mode=all>> Citado el 3 de noviembre de 2015

Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63: 1379-1389.

Serbin, S., Ahl, D., and Gower, S. 2013. Spatial and temporal validation of the MODIS LAI and FPAR products across a boreal forest wildfire chronosequence. *Remote Sensing of*

Environment. 133: 71-84.

SIIT (Sistema Integral de Información Territorial). 2015. Clima y Vegetación Región de Magallanes. Biblioteca Nacional de Chile.

SMOS-BEC Team (SMOS-Barcelona Expert Center). 2015. SMOS-BEC Ocean and Land Products Description. 22 p.

Stepanov, A. & MacGregor, J. 2012. Modeling wildfire propagation with Delaunay triangulation and shortest path algorithms. *European Journal of Operational Research*, 218: 775–788.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2015. [en línea]. Chile, Torres del Paine. Recuperado en <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/sc_mab_TorresdelPaine_EN.pdf> Citado el 3 de noviembre de 2015

USGS (United States Geological Survey). 2015a. Landsat-Earth Observation satellites. Fact Sheet 2015–3081, November 2015. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.

USGS (United States Geological Survey). 2015. Product Guide Landsat 4-7 Climate Data Record (CDR) Surface Reflectance. 26 p

USGS (United States Geological Survey). 2015b. Product Guide Provisional Landsat 8 Surface Reflectance Product. 27p

Veraverbeke, S., Lhermitte, S., Verstraeten, W. and Goossens, R. 2010. The temporal dimension of Differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) fire/burn severity studies: The case of the large 2007 Peloponnese wildfires in Greece. *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2548-2563.

Vidal, O. J. 2007. Flora Torres del Paine field guide (2nd edition). Punta Arenas, Chile: Editorial Fantástico Sur.

Vidal, O. J., & Bauk, V. 2014. Plan AMA Torres del Paine de restauración ecológica en bosques incendiados de Torres del Paine. Punta Arenas, Chile: Dirección de Vialidad MOP.

Vidal, O. J., M. Aguayo, R. Niculcar, N. Bahamonde, S. Radic, C. San Martín, A. Kusch, J. Latorre and J. Féliz. 2015. Plantas invasoras en el Parque Nacional Torres del Paine (Magallanes, Chile): Estado del arte, distribución post-fuego e implicancias en restauración ecológica. *Anales Instituto Patagonia (Chile)*, 43(1): 75-96.

Zhang, C., Li, W., & Travis, D. 2007. Gaps-fill of SLC-OFF Landsat ETM+ satellite image

using a geostatistical approach. *International Journal of Remote Sensing*, 28(22): 5103-5122.

Zhao, Y., Feng, D., Yua, L., Wang, X., Chen, Y., Hernández, H.J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G., Radke, J. and Gong, P. 2016. Detailed dynamic land cover mapping of Chile: accuracy improvement by integrating multi-seasonal land cover data. *Remote Sensing of Environment*, 183: 170–185.

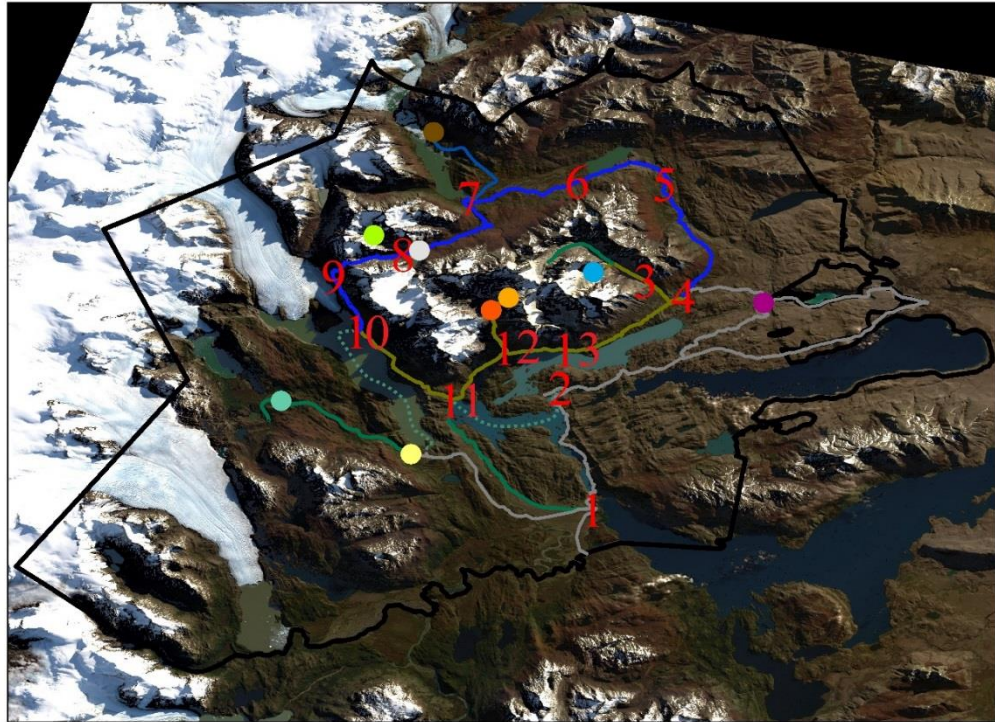
ANEXOS

Anexo 1: Fauna en el PNTF

Clases	Nombre común	Especies Nombre científico	Estado de conservación
Aves	<i>Chloephaga rubidiceps</i>	Canquén colorado	En peligro
	<i>Coscoroba coscoroba</i>	Cisne coscoroba	
	<i>Pterochemia pennata</i>	Ñandu	
	<i>Cygnus melancoryphus</i>	Cisne de cuello negro	
	<i>Phoenicopterus chilensis</i>	Flamenco chileno	Vulnerable
	<i>Campephilus magellanicus</i>	Carpintero negro	
	<i>Gallinago paraguayiae</i>	Becasina	
	<i>Falco peregrinus</i>	Halcón peregrino	Rara
	<i>Attagis gayi</i>	Perdicita cordillerana	
	<i>Ardea cocoi</i>	Garza cuca	
	<i>Buteo ventralis</i>	Aguilucho de cola rojiza	
	<i>Accipiter bicolor</i>	Peuquito	
	<i>Anas platalea</i>	Pato cuchara	
	<i>Tachyeres patachonicus</i>	Quetru volador	
	<i>Strix rufipes</i>	Concón	Inadecuadamente conocida
	<i>Asio flammeus</i>	Nuco	
	Mamíferos	<i>Oncifelis geoffroy</i>	Gato de Geoffroy
<i>Hippocamelus bisulcus</i>		Huemul	
<i>Ctenomys magellanicus</i>		Tuco Tuco de Magallanes	
<i>Lama guanicoe</i>		Guanaco	Vulnerable
<i>Puma concolor</i>		Puma	
<i>Euphractus pichiy</i>		Piche	

(Continuación)			
	<i>Galictis cuja</i>	Quique	
	<i>Lyncodon patagonicus</i>	Huroncito patagónico	Rara
	<i>Chaetophractus villosus</i>	peludo	
	<i>Abrothrix longipilis</i>	Ratón lanudo común	
	<i>Euneomys chinchilloides</i>	Ratón sedoso chinchilloides	Inadecuadamente conocida
	<i>Pseudalopex griseus</i>	Zorro gris	
	<i>Pseudalopex culpaeus</i>	Zorro culpeo	
	<i>Liolaemus magallanicus</i>	Lagartija magallánica	Vulnerable
	<i>Diplolaemus bibroni</i>	Cabezón de bibrón	
Anfibios y reptiles	<i>Diplolaemus darwini</i>	Cabezón de Darwin	Rara
	<i>Liolaemus archeforus sarmiento</i>	Lagartija patagónica de Sarmiento	
	<i>Pleurodema bufonina</i>	Sapo de cuatro ojos del sur	Inadecuadamente conocida
Peces	<i>Aplochiton taenianus</i>	Peladilla	En peligro
	<i>Galaxias maculatus</i>	Puye	Vulnerable

Anexo 2: Principales senderos y zonas de atracción turística.



27,500 13,750 0 27,500 Metros



- | | | |
|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 1 Administración | 10 Campamento Grey | ● Mirador Glaciar Los perros |
| 2 Pudeto | 11 Campamento Italiano | ● Base de las Torres |
| 3 Campamento Chileno | 12 Campamento Los Cuernos | ● Mirador Zapata |
| 4 Hosteria Las Torres | 13 Campamento Paine grande | ● Mirador de Los Cuernos |
| 5 Campamento Seron | ● Glaciar puma | — Sendero para caminantes |
| 6 Campamento Coiron | ● Guarderia Lago Grey | — Circuito W |